

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YAPAY ZEKA İLE BİR ŞEHRİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ
ANALİZİ: AFGANİSTAN HERAT ŞEHİRİ ÖRNEĞİ**

Edris NASERI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YAPAY ZEKA İLE BİR ŞEHRİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ
ANALİZİ: AFGANİSTAN HERAT ŞEHİRİ ÖRNEĞİ**

Edris NASERI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY ZEKA İLE BİR ŞEHRİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ
ANALİZİ: AFGANİSTAN HERAT ŞEHİRİ ÖRNEĞİ

Edris NASERİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY ZEKA İLE BİR ŞEHRİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ
ANALİZİ: AFGANİSTAN HERAT ŞEHİRİ ÖRNEĞİ

Edris NASERI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 23/06/2025 tarihinde jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Burçin DEDA ALTAN (Danışman)

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Abdülkadir KOÇER

Doç. Dr. Gülay YAKAR

Dr. Öğr. Üyesi Öner ATALAY

ÖZET

YAPAY ZEKA İLE BİR ŞEHRİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ ANALİZİ: AFGANİSTAN HERAT ŞEHİRİ ÖRNEĞİ

Edris NASERI

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Burçin DEDA ALTAN

Haziran 2025; 133 sayfa

Bu tez çalışmasında Herat Şehri'nin elektrik tüketimi yapay zeka uygulamasıyla ele alınarak sürdürülebilir enerji potansiyeli araştırılmıştır. Bu kapsamda enerji tüketim tahmin modelleri geliştirilerek sürdürülebilir enerji entegrasyonu ve verimliliğini destekleyen analizler yapılmıştır. Herat Şehri'nin üç yıllık saatlik elektrik tüketimi ve meteorolojik verileri kullanılarak gelişmiş makine öğrenimi metodolojileri uygulanmıştır. Veri ön işleme ve korelasyon analizi sonucunda, çiy noktası ile enerji tüketimi arasında güçlü, güneş radyasyonu ile ters korelasyonların olduğu ortaya çıkmıştır. Destek Vektör Regresyonu (SVR), Rastgele Orman (RF), Sinir Ağları (NN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağlarının karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Bu modeller arasında, LSTM (Model 12) üstün tahmin performansı göstererek enerji tüketimindeki karmaşık zamansal bağımlılıkları etkili bir şekilde yakalamıştır. Bu model, 0,891'lik bir test R^2 puanı ve 18,16'lık bir ortalama kare hatası (MSE) elde etmiştir. Ayrıca, bu tez çalışmasında Herat Şehri'nin sürdürülebilir enerji dönüşüm potansiyeli ve artan talebin güneş ve rüzgar enerjisi entegrasyonu ile karşılanabileceği analiz edilmiştir. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar, yenilenebilir enerji altyapısı için stratejik planlama ve yatırımların önemini de ortaya koymuştur. Böylelikle, veri kısıtlı ortamlarda enerji tüketimini tahmin etmede LSTM ağlarının etkinliğini göstererek sürdürülebilir enerji araştırmaları alanına katkıda bulunulmuştur. Elde edilen bu tez sonuçları ile Herat Şehri için veri odaklı sürdürülebilir enerji çözüm öngörülerini gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Enerji tüketim tahmini, Herat şehri, Makine öğrenimi, Sürdürülebilir enerji, Yapay zeka

JÜRİ: Prof. Dr. Burçin DEDA ALTAN

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Doç. Dr. Abdülkadir KOÇER

Doç. Dr. Gülay YAKAR

Dr. Öğr. Üyesi Öner ATALAY

ABSTRACT

ANALYSIS OF SUSTAINABLE ENERGY POTENTIAL OF A CITY WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE: THE CASE OF HERAT CITY, AFGHANISTAN

Edris NASERI

PhD Thesis in, Mechanical Engineering Department

Supervisor: Prof. Dr. Burcin DEDA ALTAN

June 2025; 133 pages

This doctoral thesis investigates the electricity consumption and sustainable energy potential of Herat City using artificial intelligence applications. To achieve this, energy consumption predicting models were developed, and analyses supporting sustainable energy integration and efficiency were conducted. Advanced machine learning methodologies were applied using three years of hourly electricity consumption and meteorological data from Herat City. Data preprocessing and correlation analysis revealed strong correlations between dew point and energy consumption, and inverse correlations with solar radiation. A comparative analysis was performed on Support Vector Regression (SVR), Random Forest (RF), Neural Networks (NN), and Long Short-Term Memory (LSTM) networks. Among these models, LSTM (Model 12) demonstrated superior predicting performance, effectively capturing complex temporal dependencies in energy consumption. This model achieved a test R^2 score of 0.891 and a Mean Squared Error (MSE) of 18.16. Furthermore, this thesis analyzes Herat City's potential for sustainable energy transition and concludes that the increasing demand can be met through solar and wind energy integration. The findings of this thesis also highlight the importance of strategic planning and investments for renewable energy infrastructure. Thus, this study contributes to the field of sustainable energy research by demonstrating the effectiveness of LSTM networks in predicting energy consumption in data-constrained environments. The results of this thesis provide data-driven sustainable energy solution insights for Herat City.

KEYWORDS: Artificial intelligence, Energy demand prediction, Herat city, Machine learning, Sustainable energy.

COMMITTEE: Prof. Dr. Burcin DEDA ALTAN

Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Assoc. Prof. Dr. Abdülkadir KOÇER

Assoc. Prof. Dr. Gülay YAKAR

Asst. Prof. Dr. Öner ATALAY

ÖNSÖZ

Bu doktora tezi, Afganistan'ın Herat Şehrini sürdürülebilir enerji potansiyelini yapay zeka metodolojileri kullanarak incelemeyi amaçlamaktadır. Herat şehri, özellikle elektrik arzındaki sıkıntılar ve artan enerji tüketimi nedeniyle kritik bir noktada bulunmaktadır. Bu çalışma, bu sorunlara yenilikçi ve veri odaklı çözümler üretmeyi amaçlamaktadır. Bu araştırmanın temelinde, Herat şehrinin enerji tüketimini doğru bir şekilde tahmin edebilecek YZ modelleri geliştirmek ve bu modellerin etkinliğini değerlendirmek yatmaktadır. Bu süreçte, veri toplama, ön işleme, model geliştirme ve analiz aşamalarında titizlikle çalışılmıştır. Herat şehrinin enerji verilerine ulaşmak çok kolay olmadığı için, özellikle veri toplama sürecindeki yaşanan lojistik sıkıntılar ve veri kalitesindeki sınırlamalar araştırmanın ilerleyişini etkilemiştir. Ancak bu süreçte elde ettiğim deneyimler, bana araştırma metodolojileri ve veri analizi konusunda değerli bilgiler kazandırmıştır.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında, birçok kişi ve kurumun katkısı olmuştur. Öncelikle, akademik danışmanım Sayın Prof. Dr. Burçin DEDA ALTAN'na, süreç boyunca bana sağladığı değerli rehberlik ve destekleri için en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin bilgi birikimi ve deneyimi, bu çalışmanın şekillenmesinde büyük rol oynamıştır. Ayrıca, Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR ve Sayın Doç. Dr. Abdülkadir KOÇER'e değerli rehberlikleri için teşekkür ederim. Bu araştırmanın veri kaynaklarını sağlayan Afganistan Ulusal Elektrik Kurumu (DABS) ve Visual Crossing'e teşekkür ederim. Verilerin sağlanmasında yardımlarını esirgemeyen DABS Herat Mühendislik Ekibi'ne de ayrıca minnettarım. Verilerin toplanması ve analizinde bana yardımcı olan tüm meslektaşlarıma ve arkadaşlarıma da minnettarım.

Bu tez çalışması Herat şehrinin ve benzer konumdaki diğer şehirlerin sürdürülebilir enerji geleceğine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Elde edilen YZ modelleri, enerji tüketimini doğru bir şekilde tahmin ederek, enerji planlaması ve politika geliştirme süreçlerine değerli katkılar sağlayabilir. Gelecekteki araştırmalar, daha geniş kapsamlı veri setleri ve farklı yapay zeka algoritmaları kullanarak bu çalışmanın bulgularını derinleştirebilir. Ayrıca, bu modelin benzer enerji sorunları yaşayan diğer bölgelerde uygulanabilirliği de araştırılabilir.

Beni büyüten, yetiştiren, hayatıma yön veren, varlığını her zaman ve her yerde aradığım rahmetli canım anneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bana her zaman inanan ve destekleyen babama, aileme ve sevdiklerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların varlığı, bu zorlu süreçte bana güç vermiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	5
2.1. Kentsel Alanlarda Sürdürülebilir Enerji.....	5
2.2. Sürdürülebilir enerjinin nedenselliği ve yararları.....	7
2.3. Sürdürülebilir enerjinin engelleri ve kısıtlamaları.....	8
2.4. Yapay Zekanın Enerji Analizindeki Rolü	10
2.5. Sürdürülebilir enerjide yapay zekaya genel bakış.....	11
2.6. Enerji tahmininde yapay zeka uygulamaları	12
2.7. Şehirlerde Sürdürülebilir Enerji Üzerine Yapılmış Çalışmalar.....	13
2.8. Herat Şehri'nin Enerji Alanı	15
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1. Herat Şehri.....	17
3.2. Yapay Zeka.....	20
3.2.1. Veri işleme.....	24
3.2.2. Özellik ölçeklendirme.....	26
3.2.3. Makine öğrenmesi	28
3.2.4. Derin öğrenme	33
3.2.5. Model değerlendirme kriterleri.....	40
3.3. Yapay Zeka Çalışmasının Metodolojisi	41
3.3.1. Veri toplama	43
3.3.2. Veri ön işleme.....	45
3.3.3. Yapay zeka modeli	49
3.3.4. Performans testi	51
3.3.5. Enerji tüketimi tahmini.....	52

3.4 Sürdürülebilir Enerji Potansiyeli	61
3.4.1. Herat'ta enerji durumu ve talep-arz dengesi	61
3.4.2. Yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli.....	63
3.4.3. Enerji verimliliği stratejileri	68
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	72
4.1. Model Eğitimi ve Hiper Parametre Ayarlaması	72
4.2. Model Çıktıları ve Doğruluk Değerlendirmesi	73
4.3. Model Performanslarının Karşılaştırılması	105
4.4 Sürdürülebilir Enerji Potansiyeli Analizi	107
4.4.1. Tüketim tahminleri ve mevcut kapasiteyle karşılaştırma	107
4.4.2. Enerji tüketim tahmin sonuçlarının sürdürülebilirlik planlamasına katkısı	108
4.4.3. Nüfus artışı, enerjiye erişim ve talep projeksiyonlarının senaryo tabanlı değerlendirilmesi.....	110
4.4.4. Sürdürülebilir enerjisi ile elektrik tüketiminin karşılanabilirliği	112
5. SONUÇLAR.....	120
6. KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yapay Zeka ile Bir Şehrin Sürdürülebilir Enerji Potansiyeli Analizi: Afganistan Herat Şehri Örneği” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

23/06/2025

Edris NASERI



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Btu : İngiliz ısı birimi

°C : Santigrat

ε : Epsilon

γ : Gama

GW : Gigawatt

hPa : Hektopaskal

m : Metre

m² : Metrekare

MW : Megawatt

MWh : Megawatt-saat

TWh : Terawatt-saat

W : Watt

% : Yüzde işareti

Kısaltmalar

AEEC : Afghanistan Energy Efficiency Code (Afganistan Enerji Verimliliği Kodu)

ANN : Artificial neural network (Yapay sinir ağıları)

BAU : Business-as-Usual (Mevcut Durumun Devamı)

DABS : Da Afghanistan, Breshna Sherkat (Afganistan Ulusal Elektrik Kurumu)

DL : Deep learning (Derin öğrenme)

FNN : Feedforward neural network (İleri Beslemeli Sinir Ağı)

IEC : International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)

IoT : Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)

LSTM : Long Short-Term Memory (Uzun Kısa Süreli Bellek)

MAE : Mean absolute error (Ortalama mutlak hata)

MEW : Ministry of water and energy (Enerji ve su bakanlığı)

ML : Machine learning (Makine öğrenimi)

MSE : Mean squared error (Ortalama kare hata)

NN : Neural network (Sinir ağları)

PV : Photovoltaic (Fotovoltaik)

R^2 : Belirleme katsayısı

RF : Random Forest (Rastgele orman regresyonu)

STK : Sivil Toplum Kuruluşu

SVR : Support Vector Regression (Destek vektör regresyonu)

SS No : Saat sayısı numarası

YZ : Yapay zeka

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dünyada yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi (data 2025).....	2
Şekil 1.2. Dünya enerji tüketimi ve emisyonlar (Canton 2021)	3
Şekil 2.1. Akıllı enerji yönetimi için enerji tahmini uygulamalarına genel bakış	6
Şekil 2.2. Enerji tahmininde yapay zekanın rolü	10
Şekil 3.1. Afganistan'ın Herat şehrinin coğrafi konumu (Palka 2001)	17
Şekil 3.2. Herat şehrinin güneş ve rüzgar potansiyeli (Group 2024a, 2024b)	20
Şekil 3.3. Yapay zeka ve temel alt alanları	22
Şekil 3.4. Orijinal koordinat sisteminde noktaların dağılımı (Gori, Betti ve Melacci 2023)	29
Şekil 3.5. Yeni koordinat sistemine geçiş; a) Ham veriler; b) Koordinat değişimi; c) Daha iyi temsil (Gori, Betti ve Melacci 2023)	29
Şekil 3.6. Destek Vektör Regresyonu modeli; a) SVR modelinin temel grafiği; b) Bir SVR algoritmasının tipik mimarisi (Gori, Betti ve Melacci 2023)	31
Şekil 3.7. Rastgele Orman regresyon modelinin şematik yapısı	32
Şekil 3.8. Bir derin sinir ağının bir rakam görüntüsünü tanımak için katmanlar boyunca dönüşümü (Zhang vd. 2023; Prince 2023)	33
Şekil 3.9. FNN modelinde katmanlı veri işleme akışı (Zhang vd. 2023)	34
Şekil 3.10. İleri beslemeli sinir ağı temel mimarisi	35
Şekil 3.11. Bir LSTM hücresinin genel yapısı	36
Şekil 3.12. LSTM tabanlı tahmin modelinin temel yapısı	39
Şekil 3.13. Enerji tahmin sistemi için LSTM modeli şeması	39
Şekil 3.14. Kayıp fonksiyonu; ağı tahminleri ile gerçek hedef arasındaki mesafeyi ölçme	41
Şekil 3.15. YZ tabanlı enerji tüketimi tahmin modelinin akış şeması	42
Şekil 3.16. Değişkenler arasındaki korelasyonların belirlenmesi	46
Şekil 3.17. Enerji tüketimi, güneş radyasyonu ve bağıl ıy noktası eğilimleri	47
Şekil 3.18. Ölçeklenmiş özelliklerin karşılaştırılması	48
Şekil 3.19. Herat Şehri enerji tahmini için model performans karşılaştırma ve seçim süreci	51
Şekil 3.20. SVR model optimizasyon süreci	54
Şekil 3.21. RF modeli hiperparametre optimizasyon şeması	56
Şekil 3.22. Sinir ağı modeli tabanlı enerji tahmini akış şeması	57
Şekil 3.23. LSTM tabanlı enerji tüketimi tahmin süreci	59
Şekil 3.24. 2023 yılı için Herat şehri Günlük güneş radyasyonu (W/m^2)	64
Şekil 3.25. Enerji tüketim ile mevsimsel güneş radyasyonu değerlerinin karşılaştırması; a) Ocak enerji tüketimi ile güneş radyasyonu; b) Mart enerji tüketimi ile güneş radyasyonu; c) Temmuz enerji tüketimi ile güneş radyasyonu; d) Eylül enerji tüketimi ile güneş radyasyonu	65
Şekil 3.26. Herat şehri için en rüzgarlı alanlara göre ortalama güç yoğunluğu (W/m^2) ..	67
Şekil 4.1. Herat Şehri saatlik enerji tüketim desenleri	74

Şekil 4.2. Herat Şehri günlük enerji tüketim desenleri	74
Şekil 4.3. Herat Şehri enerji tüketim aylık mevsimsel değişimler.....	75
Şekil 4.4. Herat Şehri günlük güneş radyasyonu dağılımı.....	76
Şekil 4.5. Herat Şehri günlük çiy noktası dağılımı	76
Şekil 4.6. Herat Şehri ortalama günlük rüzgar hızı dağılımı	77
Şekil 4.7. SVR modelinin MSE değerlerinin eğitim ve test verilerindeki performansı ..	79
Şekil 4.8. SVR modelinin R^2 skorlarının eğitim ve test verilerindeki performansı.....	79
Şekil 4.9. SVR tahmin modelinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu.....	80
Şekil 4.10. SVR modeli ile Herat şehri için saatlik enerji tüketim tahminleri.....	80
Şekil 4.11. SVR modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri.....	81
Şekil 4.12. SVR modeli ile Herat şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri.....	82
Şekil 4.13. SVR modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri.....	82
Şekil 4.14. SVR modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması.....	83
Şekil 4.15. SVR modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi	83
Şekil 4.16. RF modelinin MSE değerlerinin eğitim ve test verilerindeki performansı ..	85
Şekil 4.17. RF modelinin R^2 skorlarının eğitim ve test verilerindeki performansı.....	85
Şekil 4.18. Optimize edilmiş RF modelinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu ..	86
Şekil 4.19. Optimize edilmiş RF modeli ile Herat şehri için saatlik enerji tüketim tahminleri	86
Şekil 4.20. RF modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri.....	87
Şekil 4.21. RF modeli ile Herat şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri.....	87
Şekil 4.22. RF modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri.....	88
Şekil 4.23. RF modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması	89
Şekil 4.24. RF modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi	89
Şekil 4.25. Farklı batch boyutlarına göre sinir ağı modellerinin R^2 skoru ve MSE değerleri.....	91
Şekil 4.26. Sinir ağı modelinin hiperparametre denemeleri: ilk sonuçların değerlendirilmesi; a) epoch 100, batch boyutu 64, öğrenme oranı 0,1, dropout 0,2; b) epoch 300, batch boyutu 128, öğrenme oranı 0,01, dropout 0,3; c) epoch 100, batch boyutu 16, öğrenme oranı 0,05, dropout 0,1; d) epoch 50, batch boyutu 32, öğrenme oranı 0,001, dropout 0,4	92
Şekil 4.27. Sinir ağı modeli için eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri	93
Şekil 4.28. Sinir ağı modeli tahminlerinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu.....	93
Şekil 4.29. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için enerji tüketim tahminleri.....	94
Şekil 4.30. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri.....	94
Şekil 4.31. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri.....	95
Şekil 4.32. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri	95
Şekil 4.33. Sinir ağı modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması.....	96
Şekil 4.34. Sinir ağı modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi	96
Şekil 4.35. LSTM model performansının epoch sayısı ve batch boyutuna bağlı değişimi; a) epoch sayısına göre MSE değişimi; b) batch boyutuna göre MSE değişimi; c) epoch sayısına göre R^2 skoru değişimi; d) batch boyutuna göre R^2 skoru değişimi.....	98

Şekil 4.36. LSTM model hiperparametre denemeleri: ilk sonuçların değerlendirilmesi; a) epoch 100, batch boyutu 64, rastgele durum 1; b) epoch 300, batch boyutu 128, rastgele durum 42; c) epoch 100, batch boyutu 16, rastgele durum 1; d) epoch 50, batch boyutu 32, rastgele durum 42.....	99
Şekil 4.37. LSTM modeli, dönemler boyunca eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri	100
Şekil 4.38. LSTM model tahminlerinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu.....	101
Şekil 4.39. LSTM modeli ile Herat şehri için saatlik enerji tüketim tahminleri.....	101
Şekil 4.40. LSTM modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri	102
Şekil 4.41. LSTM modeli ile Herat Şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri	103
Şekil 4.42. LSTM modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri	103
Şekil 4.43. LSTM modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması.....	104
Şekil 4.44. LSTM modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi	104
Şekil 4.45. Herat Şehri saatlik enerji tüketimi ve LSTM tahminleri	105
Şekil 4.46. Farklı model yapılarının test MSE'si değerlerinin karşılaştırılması	106
Şekil 4.47. Farklı model yapılarının test R^2 skoru değerlerinin karşılaştırılması	106
Şekil 4.48. Herat Şehri için 2025–2030 yılları arasındaki enerji tüketim projeksiyonları	112
Şekil 4.49. Herat Şehri için 200 MWp güneş enerjisi sisteminin mayıs ayına ait saatlik elektrik üretimi	115
Şekil 4.50. Herat Şehri'nin en rüzgarlı alanının yüzdesi olarak ortalama rüzgar hızı grafığı	116
Şekil 4.51. Senaryo A (mevcut durum) için yıllık enerji tüketimi ve güneş-rüzgar enerjisi ile karşılanma potansiyeli.....	118
Şekil 4.52. Senaryo B (Enerjiye Erişimde İyileşme) için yıllık enerji tüketimi ve güneş- rüzgar enerjisi ile karşılanma potansiyeli.....	118
Şekil 4.53. Senaryo C (Kentsel Gelişim ve Elektrifikasyon) için yıllık enerji tüketimi ve güneş-rüzgar enerjisi ile karşılama potansiyeli	119
Şekil 4.54. Senaryo D (Sürdürülebilir Kalkınma ve Yeşil Dönüşüm) için yıllık enerji tüketimi ve güneş-rüzgar enerjisi ile karşılama potansiyeli.....	119

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Veri setindeki temel sayısal değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri.....	25
Çizelge 3.2. Üç yıllık saatlik enerji tüketimi (maksimum) (DABS 2024).....	43
Çizelge 3.3. Üç yıllık saatlik hava durumu verileri (Visual Crossing 2024).....	44
Çizelge 3.4. Herat Şehri'nin yıllara göre nüfus değişimi (2000–2030) (Review 2025).....	62
Çizelge 3.5. Yüz metre yükseklikteki rüzgarlı alanların verileri (Group 2024b).....	66
Çizelge 3.6. Konutlarda enerji verimliliği uygulamaları ve tasarruf potansiyeli.....	69
Çizelge 3.7. Ulaşım sektöründe sorunlar ve beklenen etkiler.....	71
Çizelge 4.1. Farklı modeller için hiper parametre ayarlama konfigürasyonları	72
Çizelge 4.2. SVR için çeşitli ölçekleme yöntemleri ve hiper parametre ayarlaması dahil olmak üzere model değerlendirme sonuçları	78
Çizelge 4.3. Farklı maksimum derinlik değerlerine sahip RF model değerlendirme sonuçları; eğitim ve test setlerindeki performansları	84
Çizelge 4.4. Sinir ağı modeli değerlendirmesi, dönem sayısına, parti büyüklüğüne ve öğrenme oranına dayanmaktadır.	90
Çizelge 4.5. LSTM modeli değerlendirme sonuçları; (dönem sayısı ve parti büyüklüğü)	97
Çizelge 4.6. LSTM modeli ile Nisan ayı için gerçek ve tahmin edilen elektrik tüketim değerlerinin karşılaştırması	107
Çizelge 4.7. Nüfus artışı, yıllık enerji tüketimi ve kişi başına tüketim değerleri (2021–2025)	110
Çizelge 4.8. Herat Şehri için 2025–2030 arası enerji talep projeksiyonları (senaryo bazlı).....	111
Çizelge 4.9. Herat Şehri İçin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Karşılaştırmalı Değerlendirmesi	113
Çizelge 4.10. Herat Şehri için 200 MWp PV sistemine ait aylık ve saatlik elektrik üretimi (MWh)	114
Çizelge 4.11. Farklı kurulu güç değerlerine göre Herat Şehri için yıllık güneş enerjisi üretimi ve tüketim karşılama oranı (senaryo D'ye göre)	115
Çizelge 4.12. Herat Şehri için rüzgar türbini sayısına göre toplam kapasite ve yıllık elektrik üretimi	117

1. GİRİŞ

Küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık üçte ikisini enerji sektörünün oluşturması nedeniyle, küresel enerji sistemlerinin karbonsuzlaştırılması kritik bir 21. yüzyıl mücadelesidir (Gielen vd. 2021). Küresel ısınmanın çözülmesi gereken acil bir sorun haline gelmesi sebebiyle, karbon emisyonlarının azaltılması küresel çevre politikalarının merkezinde yer almaktadır. Ekonomik kalkınma ile enerji tüketimi arasındaki bağlantıyı kabul etmek, sürdürülebilir kalkınma için enerji verimliliğini artırma ihtiyacını vurgulamaktadır (Sharma vd. 2021). Elektrik ve birincil enerji kaynakları, küresel ekonomik refahı yönlendirmektedir (Melnyk vd. 2021). Artan gelirler, elektrik kullanımı ve ısınma uygulamalarıyla teşvik edilen artan enerji tüketimi, sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için optimal düşük karbonlu ve yeşil enerji kaynaklarının tercih edilmesinin zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

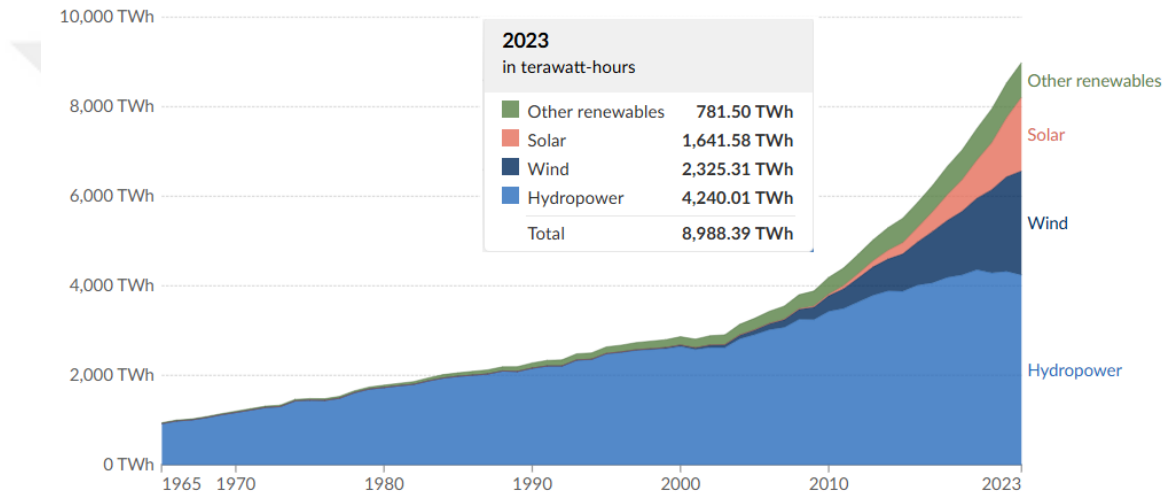
Artan küresel enerji tüketimi ile birlikte, çevresel sürdürülebilirlik hakkındaki artan endişeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve kullanılmasına yönelik önemli bir neden olmuştur. İnsan faaliyetlerinin merkezi olan şehirler, bu dönüşümde önemli bir rol oynamakta ve sürdürülebilir enerji potansiyellerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını zorunlu kılmaktadır.

Sürdürülebilir kalkınmaya ulaşmada enerjinin önemi, Birleşmiş Milletler'in dönüm noktası raporu "Ortak Geleceğimiz" ile birlikte kavramın ortaya çıkışıyla ön plana çıkmıştır (Busco ve Sofra 2021). Ancak, sürdürülebilir enerji gelişimi kavramı, Birleşmiş Milletler'in 2000 yılında yayımlanan Dünya Enerji Değerlendirme raporuna kadar resmen tanıtılmamıştır (Gunnarsdóttir vd. 2021). Bu paradigma, yalnızca ekonomik yönleri değil, aynı zamanda enerji gelişiminin sosyal ve çevresel etkilerini de hesaba katarak bütünsel bir yaklaşımı vurgulamıştır. Dünyanın azalan fosil yakıt rezervleri, artan enerji tüketimleri ve yaklaşan iklim değişikliği tehdidi gibi zorluklarla mücadele ederken, sürdürülebilir enerji gelişimi kritik bir uluslararası politika hedefi haline gelmiştir. BM'nin Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ne entegrasyonu, özellikle yedinci hedef olan "Herkes için erişilebilir, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerji sağlanması" aracılığıyla önemini daha da pekiştirmiştir (Mustafa, Ghazali ve Yuniza 2022). Bu kabul, sürdürülebilir enerji gelişiminin çok yönlü yapısını ve kapsayıcı ve dirençli toplumları teşvik ederken çevresel riskleri azaltmadaki önemli rolünü vurgulamaktadır.

Enerji üretimi, dağıtımı, tüketimi ve sera gazı emisyonları arasındaki karmaşık ilişki, enerji santralleri, ulaşım ağları ve kentsel gelişmeyi kapsayan büyük ölçekli altyapı sistemlerinde derinlemesine iç içe geçmiştir (Lamb vd. 2021). Bu sistemler, kaynakların değişimi için kanallar görevi görür ve fosil yakıt yanması ve sanayi süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar yoluyla iklim değişikliğine önemli ölçüde katkıda bulunur. Dahası, kaynak tahsisini ve tüketim modellerini etkileyerek toplumların doğa ile metabolik ilişkisini şekillendirmede kritik bir rol oynarlar (Lamb vd. 2021; Gielen vd. 2021). Büyüme odaklı bir ekonomide bu etkileşim, artan enerji tüketimini körükler, çevresel bozulmayı ve sosyo-ekonomik eşitsizlikleri derinleştirir. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli tarafından vurgulandığı gibi, acil karbon emisyonu azaltma ihtiyacını karşılamak, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerine doğru enerji üretim yöntemlerinin radikal bir şekilde yeniden yapılandırılmasını gerektirir (Ghorbani vd. 2023). Aynı zamanda, enerji verimliliği ve yeşil altyapıyı öncelikli hale

getiren kentsel gelişim stratejilerini yeniden tasarlamak, dirençli ve eşitlikçi toplulukların oluşması için gereklidir.

Hızla artan iklim değişikliği endişeleri ve sera gazı emisyonlarını azaltma zorunluluğu göz önüne alındığında, sürdürülebilir enerji kaynaklarının peşinde koşmak, en önemli küresel öncelik haline gelmiştir. Güneş, rüzgar, hidrolik ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklara dayanan sürdürülebilir enerji, enerji sistemlerini karbonsuzlaştırmaya yönelik bir yol sunarken aynı zamanda uzun vadeli çevresel dayanıklılık ve enerji güvenliği sağlar (Arent vd. 2022). Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, dünyanın dört bir yanındaki ülkeler, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak, ekonomik kalkınmayı teşvik etmek ve şu anki ve gelecek nesillerin refahını korumak için fosil yakıtlardan sürdürülebilir alternatiflere geçişin kritik önemini giderek daha fazla kabul etmektedir (Kalair vd. 2021; Arent vd. 2022).



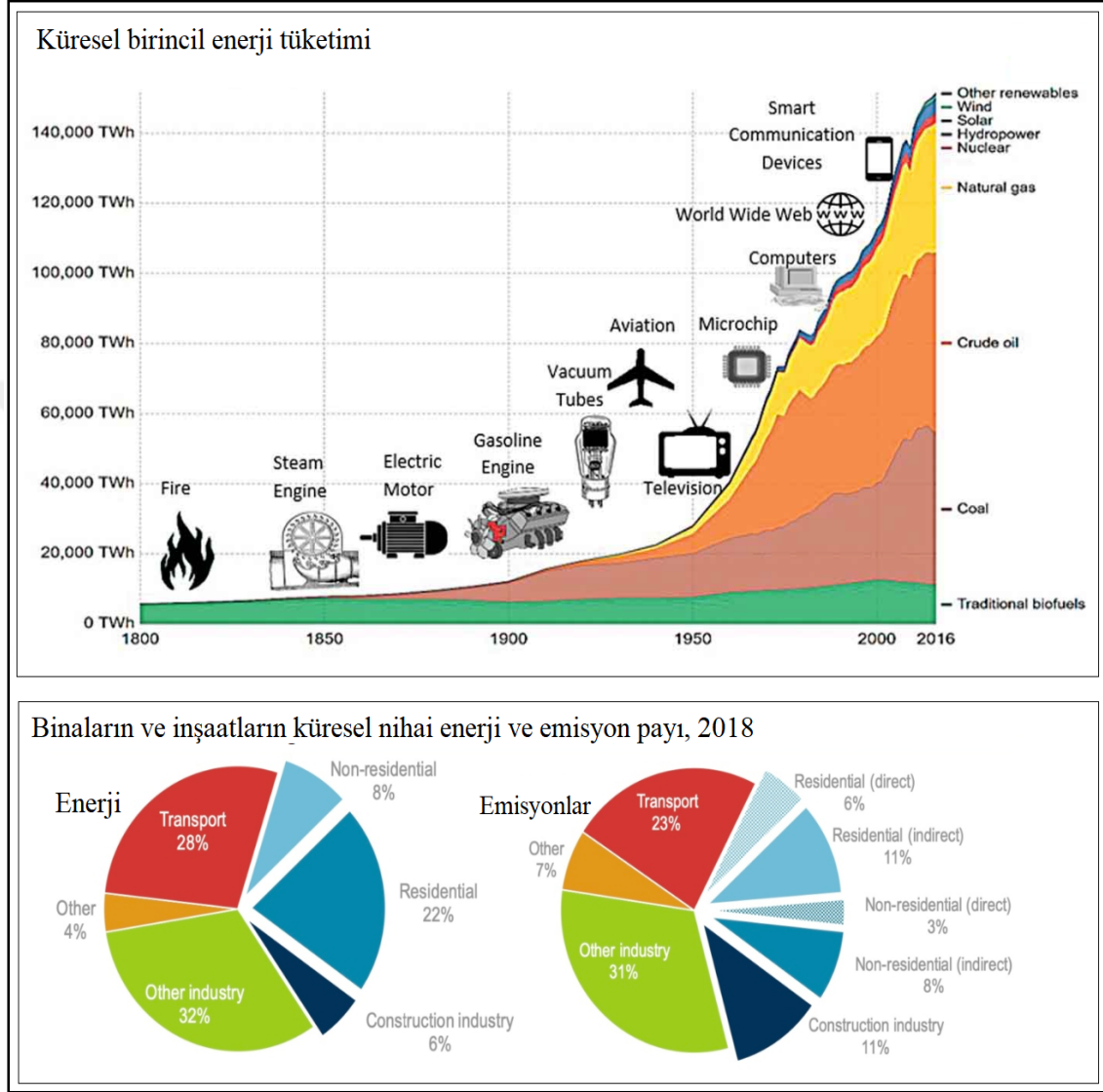
Şekil 1.1. Dünyada yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi (data 2025)

Güncel yapılan çalışmalarda son demografik eğilimler hızlı kentleşme, kırdan kente göç ve doğal nüfus artışı gibi faktörlerle yönlendirilen şaşırtıcı bir şehirleşme hızına işaret etmektedir. Tahminler, 2050 yılına kadar her hafta bir milyondan fazla insanın kentsel alanlara göç edeceğini ve bu durumun benzeri görülmemiş bir demografik dönüşüme yol açacağını öngörmektedir (Condon 2020; Vollset vd. 2020). Bu eğilimler devam ederse kentleşme, yüzyılın ortalarına kadar küresel nüfusun %80'inden fazlasını kapsayarak, sosyo-ekonomik ve çevresel yapıyı kökten yeniden şekillendirebilir.

Bu dramatik şehir nüfusu artışı, yalnızca mevcut altyapı ve hizmetleri zorlamakla kalmaz, aynı zamanda iklim değişikliğinin acil bir endişe olarak öne çıktığı sürdürülebilirlik zorluklarını da vurgular. Kentsel alanlarda var olan yoğun insan faaliyetleri ve kaynak tüketim modelleri, sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmaya ve onun ilişkili etkilerine önemli ölçüde katkıda bulunur (Perera vd. 2023; Busco ve Sofra 2021).

İklim değişikliğini azaltmadaki kritik rolü sebebiyle, yüksek enerji tüketimi ve emisyon yoğunluğuna sahip sektörleri hedefleme ihtiyacı giderek artmaktadır. Şekil

1.2'de gösterildiği gibi, küresel enerji tüketimi, büyük ölçüde fosil yakıtlar tarafından yönlendirilerek artmaya devam etmektedir. Yenilenemeyen kaynaklara olan bu bağımlılık, iklim değişikliğine ve hava kirliliğine katkıda bulunan önemli sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır.



Şekil 1.2. Dünya enerji tüketimi ve emisyonlar (Canton 2021)

Bunlar arasında, yaklaşık %40'lık küresel son enerji kullanımından sorumlu olan bina sektörü öne çıkmaktadır. İster konut, ister ticari veya endüstriyel olsun binalar, ısıtma, soğutma, aydınlatma ve cihazları çalıştırmak için çok miktarda enerji tüketerek önemli miktarda sera gazı yayarlar (González-Torres vd. 2022; Churkina vd. 2020).

Bu tez kapsamında ele alınan Herat şehrinin bulunduğu Afganistan'ın enerji dönüşümünde kentsel alanlar ön planda yer almakta olup, enerji tüketiminin ve karbon emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır (Korkovelos vd. 2020). Kentleşme hızının nüfus artışı ve ekonomik kalkınma ile birlikte ele alınması, Herat şehrindeki enerji tüketimini artırarak mevcut altyapıyı zorlamakta ve çevre kirliliğini arttırmaktadır.

Herat'ın kentsel bağlamındaki enerji sorunları, fosil yakıtlara aşırı bağımlılık, verimsiz enerji sistemleri, modern enerji hizmetlerine yetersiz erişim ve enerji dağıtımında ve uygunlukta eşitsizlikler gibi çeşitli şekillerde kendini göstermektedir (Oral, Kakar ve Saygin 2021; Korkovelos vd. 2020). Bu zorlukların ele alınması, sürdürülebilir enerji çözümleri için Herat'ın şehir planlaması, altyapı gelişimi ve politika çerçevelerine entegre eden bütüncül yaklaşımlar gerektirmektedir.

Afganistan bağlamında Herat Şehri, gelişmekte olan ülkelerdeki kentsel alanların karşı karşıya olduğu daha geniş enerji sorunlarının bir mikro kozmosu olarak ortaya çıkmaktadır. Afganistan'ın en büyük şehirlerinden biri ve ekonomik faaliyet merkezi olan Herat Şehri, hızlı kentleşme, sınırlı altyapı ve ithal fosil yakıtlarına bağımlılıktan kaynaklanan çok yönlü enerji sorunlarıyla karşı karşıyadır (Hanif vd. 2022). Herat Şehri, bol miktarda yenilenebilir enerji potansiyeline sahip olmasına rağmen, geleneksel enerji kaynaklarının neden olduğu enerji sorunları, yüksek enerji maliyetleri ve çevre kirliliği ile mücadele etmeye devam etmektedir (Oral, Kakar ve Saygin 2021).

Bu zorluklar ışığında, Herat Şehri'nin sürdürülebilir enerji potansiyelini anlamak ve değerlendirmek, yalnızca şehrin sosyo-ekonomik gelişimi için değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği ve dayanıklılığı için de en önemli hale gelmektedir.

Bu tez çalışması, yapay zeka (YZ) tekniklerinden yararlanarak, Herat Şehri'nin sürdürülebilir enerji alanını analiz etmeyi, daha sürdürülebilir ve dayanıklı bir kentsel enerji altyapısına geçişi hızlandırmak için öngörüler ve öneriler sunmayı amaçlamaktadır. Bunun için YZ yeteneklerinden yararlanarak Afganistan'ın Herat Şehri'nin kentsel alanına ait sürdürülebilir enerji potansiyelinin derinlemesine analizi için belirli bir dizi hedefler ortaya koyularak bu hedefler, özellikle tahmini enerji tüketimi modellemesine göre değerlendirilmiştir. Böylelikle enerji tüketimlerini incelemek ve tahmin etmek için ileri YZ yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca, bu tez çalışmasında Herat Şehri'nin sürdürülebilir enerji potansiyeli ve artan talebin güneş ve rüzgar enerjisi entegrasyonu ile karşılanabileceği analiz edilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu bölümde kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji, sürdürülebilir enerjinin nedenselliği ve yararları, sürdürülebilir enerjinin engelleri ve kısıtlamaları, YZ'nin enerji analizindeki rolü, sürdürülebilir enerjide YZ'ya genel bakış, enerji tahmininde YZ uygulamaları, şehirlerde sürdürülebilir enerji üzerine yapılmış çalışmalar ve Herat şehri'nin enerji alanı ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. Kentsel Alanlarda Sürdürülebilir Enerji

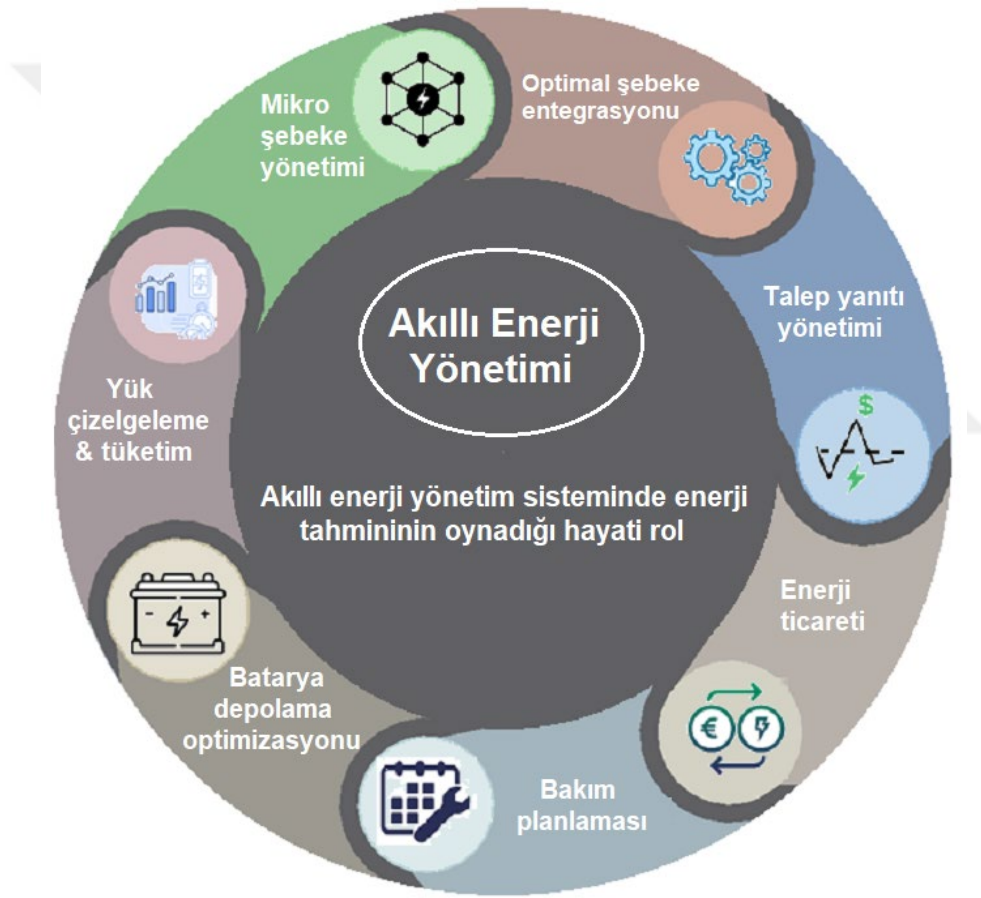
Enerji, günümüz dünyasında sürdürülebilirliğe doğru ilerlemeyi sağlayan kritik bir rol oynayarak, sosyal ve ekonomik kalkınmanın temel taşı olarak hizmet etmektedir (Igeland vd. 2024; Guo, Zhang ve Iqbal 2024). Fosil yakıtlara olan mevcut ağır bağımlılık, önemli çevresel tehditler oluşturmaktadır. Fernández (2023), küresel fosil yakıt bağımlılığının 2045 yılına kadar günde 359 milyon varil petrol eşdeğerine ulaşarak endişe verici bir seviyeye yükselmesi tahmininde bulunmaktadır (Statista). Bu durum, daha temiz enerji alternatiflerine doğru kritik bir geçişi zorunlu kılmaktadır (Huihui vd. 2024).

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji çözümlerine olan tüketim giderek artmaktadır. Bu durum, enerji arzının stratejik entegrasyonunu, toplu ulaşımın modernizasyonunu ve enerji tüketiminin azaltılmasını zorunlu kılmaktadır (Hoang ve Nguyen 2021). Kumar ve Tewary (2023) tarafından yürütülen kapsamlı araştırma, teknolojik ilerlemeleri ve enerji sistemlerinin işlevselliğini incelemiş olsa da, bu ilerlemelerin gerçek dünya kentsel ortamlarına uygulanabilirliğinde kritik bir boşluk bulunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu ele almak amacıyla kentsel bir çevrede hibrit enerji sistemlerinin fizibilite analizini önermektedir. Araştırma, iyi tanımlanmış bir araştırma amacı ve kapsamlı veri toplama ile birlikte teknoloji-ekonomik bir analiz kullanarak son teknoloji, bilimsel ve endüstriyel gelişmelerin derinlemesine araştırılmasına olanak tanımaktadır.

Kentleşme eğilimleri sonucunda artan endüstri, bina ve ulaşım sektörlerindeki enerji tüketimi iklim değişikliğini hızlandırmış ve çevresel bozulmaya yol açmıştır (Fuso Nerini vd. 2018). Şehirleşmiş alanlarda sürdürülebilir enerji çözümleri; sera gazı emisyonlarını düşürmek, enerji güvenliğini artırmak ve ekonomik büyümeyi teşvik etmek için bir araç sağlar (Todeschini vd. 2022).

Şehirlerde yenilenebilir enerji kaynakları olarak biyokütle, güneş ve rüzgar gibi kaynaklar sürdürülebilir güç üretimi için muazzam bir potansiyel sağlamaktadır. Özellikle, yapılan çalışmalar kentsel ortamlarda çatı üstü güneş fotovoltaik (Photovoltaic (PV)) sistemlerinin uygulanabilirliğini kanıtlamış olup, yerel enerji üretimini desteklemekte ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaktadır. Güneş enerjisi, potansiyeli ve ölçeklendirilebilirliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Joshi ve Yenneti 2020; Mishra ve Singh 2023). Byrne vd. (2021)'e göre, binaların yapıları ve şehir çevreleri gibi kentsel alanlara entegre edilen rüzgar enerjisi projeleri, şebeke elektrikliğini güçlendirmek ve hava kirliliğini azaltmak için umut vadeden bir yaklaşımdır. Dahası, biyokütle ve biyogaz teknolojileri sayesinde atık-enerji dönüşümü mümkün hale gelmekte, bu da kentsel sanitasyonu ve enerji arzını iyileştirmektedir (Mahmood, Alkhateeb ve Furqan 2020).

Zhang, Zhang ve Xie (2024) sürdürülebilir kentsel enerji yönetiminin temel unsuru olarak geleneksel elektrik şebekelerinden akıllı şebekelere geçişi araştırmıştır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi akıllı şebekeler, yenilenebilir güneş panellerinin akıllı kentsel evlerin çatılarında önemli bir rol oynadığı yenilenebilir enerji kaynaklarının kentsel enerji sistemlerine entegrasyonu için sofistike bir çerçeve sağlamaktadır. Akıllı şebeke teknolojilerinden yararlanmak, kullanıcıların tüketim cevabı stratejilerini kullanmalarına, enerji tüketim modellerini optimize etmelerine ve yenilenebilir enerji kullanımını maksimize etmelerine olanak tanımaktadır. Ayrıca çalışmada, akıllı kentsel evlerdeki enerji yönetimi karmaşıklıklarını ele almak için Kutup Ayısı Optimizasyon Algoritması tanıtılmakta olup, enerji maliyetlerini en aza indirmeyi ve Tepe-Ortalama Oranını düşürmeyi hedeflemektedir. Diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmalı analizler, Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmasının etkinliğini değerlendirmek için yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Akıllı enerji yönetimi için enerji tahmini uygulamalarına genel bakış

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerjinin kritik önemi göz ardı edilemez. Şehirler, insan faaliyeti ve ekonomik kalkınmanın merkezleri oldukları için muazzam enerji tüketicileri ve çevresel bozulmaya önemli katkıda bulunan unsurlardır.

2.2. Sürdürülebilir enerjinin nedenselliği ve yararları

Ekonomik büyümeye ve inovasyona öncülük eden şehirler, enerji kullanımı ve çevresel etkileri açısından önemli sorunlarla karşı karşıyadır. Küresel kentleşme oranı arttıkça, sürdürülebilir enerji çözümleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, kentsel alanlarda sürdürülebilir enerjinin önemi ve faydaları, halk sağlığını, ekonomik büyümeyi ve çevre korumayı nasıl teşvik ettiği vurgulanarak ele alınacaktır.

Çevresel Faydalar

Sera gazı emisyonları, iklim değişikliğinin ana nedenlerinden biridir ve güneş, rüzgar ve jeotermal gibi sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla önemli ölçüde azaltılabilir (Letcher 2022). Bu yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtların aksine çok az emisyonla sahiptir veya hiç emisyonu yoktur, bu da iklim değişikliğinin etkilerini azaltır. Sürdürülebilir enerji kullanımı ayrıca kömür gibi geleneksel enerji kaynaklarından kaynaklanan kirleticileri azaltarak, şehirlerdeki hava kalitesini artırır (Shen vd. 2020). Hava kirliliğindeki bu azalma, solunum yolu hastalıklarını ve diğer sağlık sorunlarını hafifleterek şehir sakinleri için daha sağlıklı yaşam ortamları yaratılmasına katkıda bulunur. Ayrıca, yoğun nüfuslu yerlerde sıklıkla hissedilen kentsel ısı adası etkisi, akıllı şebekeler ve yeşil çatılar gibi sürdürülebilir enerji çözümleri kullanılarak azaltılmaktadır (Tyagi vd. 2021). Bu çözümler, sıcaklık kontrolü sayesinde daha sürdürülebilir ve konforlu kentsel ortamlar yaratılmasına yardımcı olur.

Algarni vd. (2023) yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel faydalarını vurgulayarak emisyonları azaltma ve küresel ısınmayla mücadeledeki rolünü öne çıkarmış, ayrıca sürdürülebilirlik hedeflerini kentsel alanlarda ilerletmek için optimal kullanım stratejilerini ele almıştır. Shi ve Wang (2023) ise entegre enerji sistemlerinin çevresel faydalarını artırmaya odaklanmıştır. Bu çalışma, enerji verimliliğini ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmek için, söz konusu sistemlerin çevresel etkilerini ekonomik ve toplumsal faktörlerle birlikte değerlendirmektedir. Kapsamlı bir değerlendirme modeli, geçmiş veriler kullanılarak oluşturulmakta, ilk ağırlıklar hiyerarşik analiz yoluyla belirlenmekte ve entropi ağırlıklandırmasıyla iyileştirilmektedir. Ardından, anahtar çevresel göstergeleri değerlendirmek ve optimizasyon önerileri sunmak için bulanık değerlendirme teknikleri uygulanmaktadır. Karşılaştırmalı deneyimler, bu yöntemin, kentsel bağlamlarda entegre enerji sistemlerinin gelişimini çevresel sürdürülebilirlik yönünde yönlendirmedeki etkinliğini doğrulamaktadır.

Ekonomik Faydalar

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerjinin çeşitli ekonomik avantajları bulunmaktadır. Öncelikle, sürdürülebilir enerji projeleri, enerji kaynaklarını çeşitlendirerek ve fiyat oynaklığı ile arz kesintilerinin risklerini azaltarak enerji güvenliğini ve bağımsızlığı artırır (Gitelman, Kozhevnikov ve Visotskaya 2023). Buna ek olarak, sürdürülebilir enerjiye geçiş, özellikle enerji verimliliği teknolojisi, akıllı şebeke yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimi gibi alanlarda istihdam yaratılmasını teşvik eder (Rehman vd. 2021). Bu durum, ekonomik büyümeyi ve gelişmeyi destekler. Ayrıca, enerji verimli binalar ve akıllı şebekeler, hem konut sahipleri hem de şirketler için enerji israfını azaltmaya ve önemli ölçüde tasarruf sağlamaya yardımcı olan sürdürülebilir uygulamalara örnektir (Schappert ve von Hauff 2020).

Halk Sağlığı Faydaları

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji, halk sağlığı için önemli avantajlar sunmaktadır. Öncelikle, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, hava kalitesini iyileştirerek solunum yolu hastalıklarını azaltmakta ve kentsel nüfusun genel sağlık durumunu yükseltmektedir (Tran vd. 2023). Buna ek olarak, sürdürülebilir enerji projeleri, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yardımcı olup, böylece aşırı hava olayları (ısı dalgaları ve seller gibi) ile ilişkili riskleri azaltarak nihayetinde kentsel halk sağlığını korumaktadır (Campbell-Lendrum vd. 2023). Ayrıca, azaltılmış gürültü kirliliği, yeşil alanlara daha fazla erişim ve daha temiz hava ile karakterize edilen sürdürülebilir kentsel ortamların geliştirilmesini sağlayarak, kent sakinlerinin yaşam kalitesini iyileştirerek halk sağlığı sonuçlarını desteklemektedir (Wu ve Chen 2023; Campbell-Lendrum vd. 2023).

Günümüz şehirlerinde sürdürülebilir enerji, bir lüks olmaktan ziyade bir ihtiyaç haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş ve enerji verimliliği uygulamalarının benimsenmesi, ekonomi, halk sağlığı ve çevre için çeşitli avantajlar sunmaktadır.

2.3. Sürdürülebilir enerjinin engelleri ve kısıtlamaları

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerjinin bariz avantajlarına rağmen, temiz bir enerji geleceğine doğru ilerleme engellerle doludur. Bu nedenle bu literatür çalışmaları, şehirlerde sürdürülebilir enerji çözümlerinin yaygın olarak benimsenmesini engelleyen temel sorunları incelemektedir.

Teknik Kısıtlamalar

Kentsel alanlardaki sürdürülebilir enerjinin teknolojik zorluklarına bakıldığında, birkaç önemli engel ortaya çıkmaktadır. Öncelikle, yoğun nüfuslu alanlarda güneş veya rüzgar santralleri gibi büyük ölçekli yenilenebilir enerji altyapısı için genellikle sınırlı miktarda arazi bulunmaktadır. Bu kısıtlamayı aşmak için enerji üretimini maksimize etmeye yönelik yaratıcı çözümler, dikey eksenli rüzgar türbinleri, çatı üstü güneş panelleri ve binaya entegre PV sistemler gibi çözümler gereklidir (Poggi, Firmino ve Amado 2018). Güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının aralıklı doğası nedeniyle, istikrarlı bir enerji arzı sağlamak için verimli enerji depolama sistemleri de gereklidir. Bu nedenle, pil teknolojilerini geliştirmek ve pompalama hidroelektrik depolama gibi alternatif depolama seçeneklerini araştırmak kritik öneme sahiptir (Datta, Kalam ve Shi 2021; Rekioua 2023). Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarını mevcut enerji sistemleriyle birleştirmede teknolojik zorluklar yaşanmaktadır. Başarılı şebeke entegrasyonu, değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının getirdiği zorluklarla başa çıkabilen, güç akışını optimize eden ve dalgalanmaları düzenleyen akıllı şebeke teknolojilerine büyük ölçüde bağlıdır (Sinsel, Riemke ve Hoffmann 2020).

Ekonomik Kısıtlamalar

Kentsel alanlardaki sürdürülebilir enerjiyle ilişkili ekonomik zorluklara bakıldığında, dikkat çekici birkaç engel ortaya çıkmaktadır. Öncelikle, yenilenebilir enerji çözümleri geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla genellikle yüksek ön maliyetlere sahiptir ve önemli bir ilk yatırım gerektirir. Bu engeli aşmak için devlet fon kaynakları ve teşvikleri kritik öneme sahiptir; çünkü yatırımı ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin

benimsenmesini teşvik eder (Majid 2020). Ayrıca, yerleşik fosil yakıt sektörlerinin baskınlığının yarattığı piyasa rekabetçiliği açığı, gelişmekte olan yenilenebilir enerji teknolojileri için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Adil rekabeti teşvik eden ve karbon fiyatlandırma mekanizmalarının uygulanmasını sağlayan politikalar, sürdürülebilir enerjiye geçişi kolaylaştırmak ve eşit bir oyun alanı yaratmak için gereklidir (Al-Shetwi 2022). Benimseme ayrıca, halkın yenilenebilir enerjinin avantajları konusundaki bilgi eksikliğinden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Sürdürülebilir enerji çözümlerinin faydalarını tanıtmak ve gündemdeki soruna ilişkin farkındalığı artırmak için eğitim kampanyaları ve topluluk katılım projeleri gereklidir (Asante vd. 2022).

Politika ve Regülasyon Engelleri

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji projeleri, yasal ve düzenleyici ortamda ilerlemeye çalışırken önemli engellerle karşılaşmaktadır. Eski yasalar ve karmaşık izin prosedürleri, sürdürülebilir enerji projelerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını sıklıkla engellemektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden ve düzenlemeleri akıcı hale getiren net bir düzenleyici çerçeve sağlamak zorunludur (Gajdzik vd. 2023). Ayrıca, hükümetlerin yenilenebilir enerji politikalarındaki istikrarsızlık, sürdürülebilir enerji projelerinin uzun vadeli planlama çabalarını engelleyebilir ve yatırımı caydırabilir (Boute 2020). Bu, politikadaki düzenli değişiklikler veya belirsizliklerle örneklendirilir. Farklı yetki alanlarından çeşitli paydaşları içeren karmaşık yönetim düzenlemeleri, koordinasyon ve iş birliğini daha da zorlaştırmaktadır. Sürdürülebilir enerji projelerinin başarılı bir şekilde uygulanmasına ve düzenleyici engellerin aşılmasına izin vermek için yerel, bölgesel ve federal hükümetler arasında etkin bir yetki alanı arası koordinasyon kritik öneme sahiptir (van de Meene, Bettini ve Head 2020).

Toplumsal Kabul ve Topluluk Katılım Engelleri

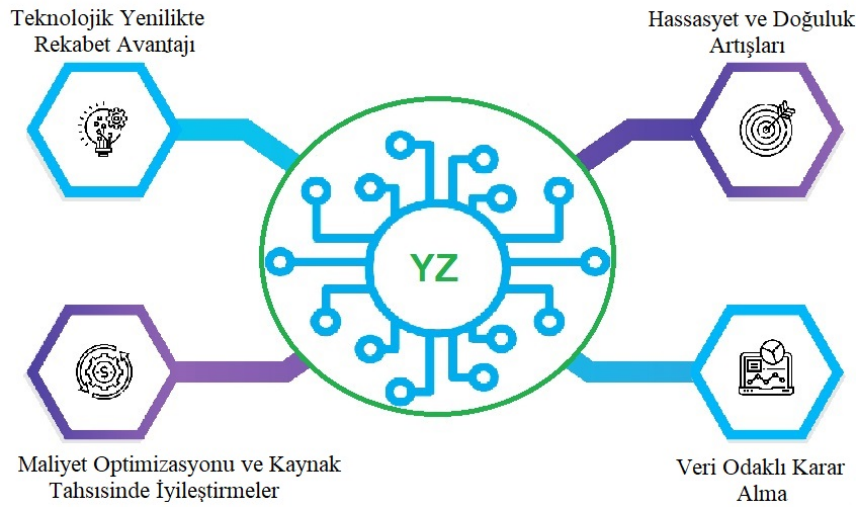
Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerji girişimlerinin başarılı bir şekilde uygulanması için toplumsal ve topluluk zorluklarının ele alınması son derece önemlidir. Rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji kurulumlarına yönelik olumsuz halk algıları ve estetik kaygılar, topluluklar içinde direnişe yol açabilir. Bu engelin üstesinden gelmek için, etkili halk katılımı stratejileri ve bu kaygıları gidermeye yönelik çabalar zorunludur (Segreto vd. 2020). Ayrıca, temiz hava, düşük enerji maliyetleri ve yeni iş fırsatları gibi faydalara tüm vatandaşların erişimini sağlamak için, sürdürülebilir enerjiye geçişte adalet ve eşitliğin sağlanması esastır (Carley ve Konisky 2020). Bunun yanında, sürdürülebilir enerji altyapısını yönetme ve bakımını üstlenme konusunda yerel kapasite ve uzmanlık oluşturulması, uzun vadeli başarı için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, topluluklar içinde kapasite geliştirmeyi hedefleyen girişimler, yenilenebilir enerji çözümlerinin sürdürülebilir entegrasyonu için gereklidir (Zebra vd. 2021).

Kentsel alanlarda sürdürülebilir enerjiye geçişte çok sayıda engel bulunmakla birlikte, yaratıcı düşünce ve çok yönlü bir strateji ile bunların üstesinden gelinmesi mümkündür. Şehirler, teknik engelleri ele alarak, avantajlı ekonomik koşullar oluşturarak, düzenlemeleri optimize ederek ve topluluk katılımını teşvik ederek, sürdürülebilir enerjinin muazzam potansiyelinden daha sağlıklı, daha temiz ve daha müreffeh bir gelecek için faydalanabilir.

2.4. Yapay Zekanın Enerji Analizindeki Rolü

Yapay zekanın enerji analizine uygulanması, sürdürülebilir enerji kaynaklarının planlanması ve yönetiminde sorunlara yaratıcı çözümler sunduğu için son zamanlarda popüler hale gelmiştir. Mevcut araştırmalar, YZ ile yenilenebilir enerji gelişimi arasındaki karmaşık bağlantıyı incelemektedir. Qin vd. (2024), tam ve alt-örnek metodolojilerini kullanarak YZ ile yenilenebilir enerji arasındaki iki yönlü etkiyi analiz etmiştir. Bulguları, YZ'nin yenilenebilir enerji büyümesini teşvik edebileceğini, ancak bunun yenilenebilir olmayanların maliyet avantajlarının üstesinden gelinmesine bağlı olduğunu düşündürmektedir. Bu, her iki sektörü de teşvik etmek için destekleyici bir ortamın gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu çalışma, YZ geliştirilmesi ve yenilenebilir enerjideki uygulaması için öneriler sunarak, temiz bir enerji geleceği için verimli modeller ve altyapı oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır.

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi YZ teknolojileri, karar verme süreçlerini hızlandırmak, verimliliği artırmak ve enerji sistemlerini optimize etmek için gereklidir. Bu teknolojilere örnek olarak makine öğrenmesi algoritmaları ve veri analitiği verilebilir. Long (2023), erken aşama bina tasarımında simülasyon, makine öğrenmesi (Gradyan Artırma) ve optimizasyon tekniklerini birleştiren bir model oluşturarak enerji açısından verimli bina zarfları bulmuştur. Bu model, Vietnamca bir vaka çalışmasında paydaşlara faydalı seçenekler sunarak ya %7,52 maliyet tasarrufu ve %8,48 enerji tasarrufu veya enerji etkisi olmadan %21,17 maliyet tasarrufu sağlamıştır.



Şekil 2.2. Enerji tahmininde yapay zekanın rolü

YZ teknolojileri, büyük ve karmaşık veri setlerini analiz etmeyi mümkün kılarak optimizasyon alanlarını bulmaya ve stratejik planlama projelerine rehberlik sağlamaya yardımcı olmaktadır. Bu veri setlerine hava durumu tahminleri (Dewitte vd. 2021), şebeke operasyonları (Shi vd. 2020) ve enerji tüketim kalıpları örnek olarak verilebilmektedir (Antonopoulos vd. 2020). Ayrıca, YZ destekli tahmini modeller, enerji tüketimini ve yenilenebilir enerji üretimini hassas bir şekilde tahmin ederek enerji kaynaklarının ve şebeke kararlılığının proaktif yönetimine olanak tanımaktadır (Allal vd. 2024; Talaat vd. 2023). Akıllı şebekeler ve mikro şebekeler gibi enerji sistemlerinin tasarımı ve işletimi, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu maksimize ederken esnekliği ve güvenilirliği sürdürmek için YZ tabanlı optimizasyon

algoritmalarından önemli ölçüde yararlanmaktadır (Talaat vd. 2023). Dahası, YZ destekli enerji yönetimi çözümleri, kullanıcıların enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmalarına, masrafları kısımlarına ve tüketim tarafı kontrol programlarını desteklemelerine olanak tanımaktadır (Tomazzoli, Scannapieco ve Cristani 2023).

Genel olarak, YZ'nın enerji analizlerine dahil edilmesi, kentsel enerji sistemlerinin dayanıklılığını, sürdürülebilirliğini ve verimliliğini artırmak için önemli fırsatlar sunmakta ve böylelikle daha sürdürülebilir bir enerji ortamına geçişe önemli katkı sağlamaktadır.

2.5. Sürdürülebilir enerjide yapay zekaya genel bakış

YZ teknolojisi hızla gelişmekte olup, bu durum sürdürülebilir enerji çözümlerine olan tüketimi artırmaktadır. Bu bölüm, YZ'nın güçlü bir analiz ve optimizasyon araç seti sağlayarak sürdürülebilir enerji alanını nasıl dönüştürdüğünü inceleyecektir.

Yapay Zeka Teknikleri

Makine Öğrenmesi (ML): ML algoritmaları, geçmiş verileri kullanarak eğilimleri bulur ve gelecekteki çıktıları tahmin eder. Bu, özellikle yenilenebilir enerji üretimini (rüzgar ve güneş enerjisi gibi) ve ihtiyaç duyulan enerji miktarını tahmin etmek için faydalıdır (Yao vd. 2023; Ribeiro ve Fanzeres 2024). Brezilya'daki rüzgar ve güneş enerjisinin aralıklı doğasını ele almak için Ribeiro ve Fanzeres (2024), her kaynak için örnek günleri belirlemek amacıyla makine öğrenmesi tekniklerini kullanmıştır. Stratejik konumlardan gelen verileri inceleyerek temel kalıpları birkaç gün içinde başarıyla yakalar ve zaman geçtikçe daha karmaşık varyasyonları ortaya çıkarır. Böylece yenilenebilir enerji kaynaklarının, Brezilya şebekesine nasıl entegre edileceği hakkında faydalı bilgiler sağlamıştır.

Derin Öğrenme (DL): Yapay sinir ağlarını (Artificial neural network (ANN)) kullanarak karmaşık, çok katmanlı verileri işleyen bir makine öğrenmesi dalıdır. Derin öğrenme, akıllı binalar ve şebekelerdeki enerji yönetim sistemlerini optimize etmek için kullanılabilir (Kim ve Kim 2023; Li vd. 2023). Wazirali vd. (2023) çalışmalarında, yenilenebilir enerji yönetiminde hassas tahminin önemini, özellikle derin öğrenme (DL), makine öğrenmesi (ML) ve ANN algoritması üzerine vurgu yaparak vurgulamıştır. Bu tekniklerin çeşitli periyodlar boyunca nasıl yük tüketimini ve mikro şebekelerdeki yenilenebilir enerjiyi tahmin etmek için kullanılabileceğini analiz etmişlerdir. Web of Science veri tabanından ilgili çalışmaları metodolojik olarak değerlendirerek ve tablolar kullanarak karşılaştırarak, sağlam ve sürdürülebilir mikro şebeke ekosistemlerinin oluşturulması için bilinçli karar vermeyi kolaylaştırmıştır.

Yapay Zeka'nın Faydaları

YZ'nın sunduğu çok sayıda fayda, enerji sektöründe devrim yaratmaktadır. Öncelikle, büyük veri setlerini işleme yeteneği, geleneksel yöntemlere kıyasla karmaşık enerji sistemlerinden faydalı bilgiler çıkarılmasını mümkün kılarak sistemlerin davranışlarının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar (Ahmad, Madonski, vd. 2022). İkinci olarak, YZ'nın kalıp tanıma yetenekleri, enerji verileri içindeki gizli eğilimlerin ve ilişkilerin tespit edilmesine olanak tanır. Bu sayede, enerji tüketimi ve üretimi daha doğru bir şekilde tahmin edilebilir ve bu da optimal enerji yönetimi planlarının oluşturulmasına yol açar (Qiao, Yunusa-Kaltungo ve Edwards 2021). Son

olarak, YZ destekli sistemler enerji kullanımının takibi ve anormalliklerin tespiti gibi sıkıcı işleri otomatikleştirerek, uzman personelin enerji yönetiminin diğer önemli alanlarına odaklanmasını sağlayarak önemli kaynakları serbest bırakır (Ahmad, Zhu, vd. 2022; Antonopoulos vd. 2020).

Yapay Zeka'nın Karşılaştığı Zorluklar

YZ alanında, yaygın kullanımına önemli engeller oluşturan çeşitli zorluklar devam etmektedir. Öncelikle, YZ modellerinin eğitiminde kullanılan verilerin niteliği ve niceliği, bunların etkinliğini derinden etkiler. Tutarsız veya eksik veri setleri, önyargılı veya hatalı sonuçlara yol açarak YZ tahminlerinin güvenilirliğini azaltabilir (Ahmad vd. 2021). Dahası, YZ algoritmalarındaki açıklanabilirlik eksikliği, genellikle "kara kutu" sorunu olarak adlandırılır, kararların nasıl verildiğinin anlaşılmasını engeller. Bu şeffaflık eksikliği, özellikle enerji altyapısı yönetimi gibi kritik sektörlerde YZ'ya olan güveni ve benimsenmeyi azaltır (Von Eschenbach 2021; Ahmad vd. 2021). Ek olarak, karmaşık YZ modellerinin eğitimi için gereken hesaplama kaynakları önemli bir engel teşkil etmektedir, çünkü tüm uygulamalar gerekli hesaplama gücüne erişememektedir (Surianarayanan vd. 2023). Bu zorluklar birlikte, karmaşık gerçek dünya problemlerini ele almada YZ'nın potansiyelinden faydalanmak için gereken çok yönlü unsurları vurgulamaktadır.

Marler (2024) çalışmasında, büyük veri ve bulut bilişim gibi teknolojik gelişmelerden faydalanarak YZ'nın (YZ) şirketlerdeki ücret yönetimini dönüştürme potansiyelini incelemiştir. Böylece YZ'yı ücret yönetimine entegre ederken aşılması gereken önemli engeller belirlenmiştir. Bu zorluklar, otomasyon ve insan kararları arasında uygun bir denge kurmayı, algoritmalarındaki adalet kaygılarını gidermeyi, önerilerin şeffaflığını garanti altına almayı ve YZ'yı stratejik olarak ücret çerçevelerine dahil etmeyi içermektedir.

2.6. Enerji tahmininde yapay zeka uygulamaları

Yenilenebilir enerji entegrasyonu ve sistem karmaşıklığının artmasıyla birlikte, YZ uygulamaları enerji yönetimi ve optimizasyonunda kritik bir rol oynamaktadır. Makine öğrenimi (Machine Learning (ML)), ANN algoritması ve derin öğrenme (DL) teknikleri, çeşitli zaman dilimleri boyunca enerji üretimi, tüketimi ve tüketimini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tahminlerde, hassasiyet sağlamak için geçmiş veriler ve ilgili faktörlerden yararlanılır (Runge ve Saloux 2023; Ghimire vd. 2023). Bu modeller, güç şebekesi işletimi, yenilenebilir enerji entegrasyonu, tüketim tarafı yönetimi ve enerji ticaretinde uygulama alanı bulur ve gelişmiş sistem planlaması ve maliyet optimizasyonuna yol açar (Nutakki ve Mandava 2023). Bununla birlikte, veri kalitesi ve model yorumlanabilirliği gibi zorluklar devam etmekte olup, bu da sürekli araştırma çalışmalarını gerekli kılmaktadır. Bu bölüm, YZ'nın enerji tahminine ilişkin özel uygulamalarını inceleyecek olup, bu uygulamalar yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji yönetimi optimizasyonu için kritik öneme sahiptir.

Yenilenebilir Enerji Tahmini

Güneş ve rüzgar enerjisi üretimi doğası gereği değişkenlik gösterdiğinden, doğru tahmin yapmak, şebeke kararlılığı ve entegrasyonu için kritik öneme sahiptir. YZ modelleri, meteoroloji verilerini, geçmiş üretim kalıplarını ve diğer değişkenleri inceleyerek yenilenebilir enerji çıktısının daha hassas bir şekilde tahmin edilmesini

sağlayabilir (Zheng vd. 2023). Lee, Im ve Lee (2023) tarafından, aylık barındırma kapasitesi tahmini için basit ve etkili bir model olarak çoklu doğrusal regresyon kullanılmıştır. Hafta sonu verilerini içermeleri ve toplam üretim ile güç kaynağı oranları gibi değişkenleri hesaba katmaları sayesinde daha doğru tahminlerde bulunabilmışlerdir. Bu çalışma, yenilenebilir enerjinin daha iyi entegre edilmesini teşvik etmenin yanı sıra zamansal değişikliklerin barındırma kapasitesi üzerindeki potansiyel etkilerine de dikkat çekmektedir.

Enerji Tüketimi Tahmini:

Enerji tüketim modellerinin tahmini, elektrik şebeke şirketlerinin kaynak tahsisini optimize etmelerine ve elektrik kesintilerini önlemelerine olanak tanır. YZ, tüketimi daha doğru bir şekilde tahmin etmek için geçmiş kullanım verilerini, meteorolojik eğilimleri ve toplumsal faktörleri inceleyebilir (Runge ve Saloux 2023; Sankarananth vd. 2023). Aldarraji vd. (2024) çalışmasında, enerji tüketimi ve arzı tahmini konusundaki kritik zorluğa değinmiştir. Bu araştırmada, kısa vadeli tahmin (24-168 saat) için çeşitli ileri modeller (Doğrusal Regresyon, XGBoost vb.) kullanılmaktadır. Araştırmanın temel bulguları, tüketim tahmini için Doğrusal Regresyonun, arz tahmini için ise XGBoost modelinin önemini vurgulamaktadır. Çalışma, enerji güvenliği ve karar verme süreçleri için doğru tahminin önemini vurgular ve sürdürülebilir kalkınma ile yaşam kalitesinin iyileştirilmesi için yol açar.

Ekipman Arıza Tahmini:

Enerji altyapısı proaktif bir şekilde bakıma ihtiyaç duymaktadır. YZ, ekipmanlardan sensör verilerini analiz ederek anormalleri tespit ederek ve olası sorunları önceden tahmin ederek bakım maliyetlerinden ve kesintilerden tasarruf sağlayabilir (Rojek vd. 2023).

YZ, ağır iş makineleri arıza analizinde daha popüler hale gelmiştir. YZ karar verme süreci, derinlemesine analiz için insan benzeri muhakeme sunar ancak mevcut sistemler çeşitli senaryolarda zorluklarla karşılaşmaktadır. Kumar (2022)'ın çalışması, arıza analizinin etkinliğini artırmak ve en iyi bakım planlarını oluşturmak için YZ'yı (YZ) gelişmiş tahmin modelleriyle birleştirmeyi önererek engellerin aşılmasını sağlamaktadır.

2.7. Şehirlerde Sürdürülebilir Enerji Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Şehirlerde sürdürülebilir enerji konusu, mevzuat çerçeveleri, yeni teknolojiler ve uygulama teknikleri dahil olmak üzere çeşitli konuları aydınlatan sayısız araştırmanın odağı olmuştur. Bu kısım Afganistan'ın Herat Şehri'nin sürdürülebilir enerji potansiyelinin analizi için hazırlık yapmak amacıyla, bu alandaki önceki çalışmalardan elde edilen temel sonuçları ve katkıları özetlemektedir.

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Entegrasyonu: Kentsel enerji sistemlerine biyokütle (Karaca, Dincer ve Nitefor 2023), jeotermal (Moret vd. 2016), güneş (Ghadami vd. 2021) ve rüzgar (Kwok ve Hu 2023) gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun olanakları ve zorlukları üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda kapsamlı değerlendirmeler yoluyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kentsel alanlara entegrasyonunun etkinliği ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Araştırmacılar özellikle bina yönü, güneşlenme süresi ve yapısal stabilite gibi unsurları göz önünde bulundurarak çatıların güneş enerjisi santralleri için uygun olup olmadığını

incelemişlerdir (Ren vd. 2023). Ayrıca, araştırmacılar kentsel sınırlar içindeki rüzgar çiftlikleri için en uygun yerleri belirlerken arazi kullanım biçimleri, çevresel faktörler ve rüzgar kaynağı mevcudiyetini hesaba katmıştır (Tasneem vd. 2020). Araştırmacılar ayrıca atık yönetimi ve enerji üretimi hedeflerini desteklemek için organik atık akışlarından biyogaz üretme olasılığını incelemişlerdir (Srivastava vd. 2020). Bu çalışmalar, ampirik araştırma ve modelleme kullanarak, kentsel alanlarda yenilenebilir enerji entegrasyonunun teknik, ekonomik ve çevresel yönleri hakkında kritik bilgiler sunmakta; paydaşları ve planıcıları sürdürülebilir enerji dönüşümlerine yönlendirmektedir.

Akıllı Şehir Teknolojileri ile Sürdürülebilir Enerji: Bu alandaki literatürler, özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) sensörleri ve veri analitiğinin binalar ve altyapı genelinde enerji verimliliğini artırmadaki rolüne odaklanarak, ileri kentsel teknolojilerin dönüştürücü potansiyelini araştırmaktadır (Yaici vd. 2021). Araştırma, akıllı şebekeler (Lamb vd. 2021), tüketim tarafı yönetim teknikleri (Saleem vd. 2023) ve gerçek zamanlı enerji izleme sistemleri (Rath, Khang ve Roy 2024) gibi çok sayıda yönü incelemektedir. Şehirler, IoT yeteneklerini kullanarak pik tüketim sorunlarını etkili bir şekilde yönetebilir, kaynakları daha verimli bir şekilde tahsis edebilir ve enerji kullanımını izleyebilir (Yaici vd. 2021; Lamb vd. 2021). Buna ek olarak, araştırmalar bina enerji kullanım eğilimlerini incelemek ve verimliliği artırmak için optimize edilebilecek alanları bulmak için derin öğrenme ve makine öğrenme yöntemlerini kullanmaktadır (Sapnken vd. 2023; Morteza vd. 2023). İlgili araştırma değerlendirmelerinin sunduğu ön görüşlerden yararlanarak, sürdürülebilir enerji dönüşümleri için akıllı şehir teknolojilerinden faydalanmak, enerji paydaşları için büyük fayda sağlayabilir. Bu durum, nihayetinde daha dayanıklı ve kaynak açısından verimli kentsel ortamların yaratılmasına yol açacaktır.

Politika Çerçeveleri ve Kentsel Planlama: Şehirlerde sürdürülebilir enerji uygulamalarını teşvik etmenin, güçlü mevzuat çerçeveleri ve özenli kentsel planlama yöntemlerine büyük ölçüde bağımlı olduğu kabul edilmektedir (Son vd. 2023). Kentsel alanlar, yenilenebilir enerji hedefleri gibi destekleyici politikalar sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarını çok daha yüksek bir oranda benimsemiştir (Lu vd. 2020). Karbon fiyatlandırma mekanizmalarının ve binalarda enerji verimliliği iyileştirmeleri için finansal teşviklerin etkinliğini ortaya koyan yakın tarihli çalışmalar, bunu daha da vurgulamaktadır (Gugler, Haxhimusa ve Liebensteiner 2021). Belirli politikaların ötesinde, enerji hususlarının tüm kentsel planlama sürecine dahil edilmesi de eşit derecede önemlidir. Bu durum, rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna izin vermek için akıllı şebeke altyapısı oluşturulmasını ve doğal havalandırma ile güneş erişimini artırmak için bina yoğunluğu ve yerleşim düzeninin optimize edilmesini gerektirir (Hoang ve Nguyen 2021; Allouhi 2021). Şehirler, bu koordineli politikaları uygulayarak daha sürdürülebilir bir enerji geleceği için zemin hazırlayabilir.

Şehirlerde sürdürülebilir enerji üzerine yürütülen mevcut araştırmalar, politika, teknoloji, sosyal adalet ve uygulama engelleri konusunda değerli dersler sunmaktadır. Bu inceleme, bu bilgi birikimini temel alarak Herat Şehri'nin sürdürülebilir enerji potansiyelinin analizi için daha sağlam bir zemin oluşturmayı amaçlamaktadır.

2.8. Herat Şehri'nin Enerji Alanı

Herat Şehri (34.3529°N, 62.2040°D), Batı Afganistan'ın tarihi açıdan önemli bir merkezidir. Coğrafyası ve iklimi, sosyoekonomik dinamikler, kentsel büyüme ve çevresel sürdürülebilirlik dahil olmak üzere çeşitli konuları anlamak için önemlidir. Herat vilayeti merkezinde yer alan kent, dağlarla çevrili olup bereketli Herat Vadisi içerisinde bulunmaktadır. Herat Şehri, İran ve Türkmenistan ile sınır komşusudur. Lee (2022) tarafından belirtildiği gibi şehrin iş ve kültür merkezi olarak tarihsel önemi, eski ticaret yollarının kesişme noktasındaki konumundan kaynaklanmaktadır. Orta Asya çöllerine yakınlığı nedeniyle şehir, kurak ila yarı kurak bir iklime sahiptir. Gesim ve Okazaki (2018) göre yazları sıcak ve kurak, ortalamalar 40°C civarında seyrederken kışlar ise az miktarda kar yağışı ve don olaylarıyla birlikte nispeten sıcaktır. Düşük ve kış aylarına yoğunlaşan yağış miktarı, su yönetimi ve tarımı olumsuz etkilemektedir. Khan, Yang ve Wi (2020) tarafından yapılan araştırmaya göre, yağış düzenlerindeki değişiklikler ve artan sıcaklıklar nedeniyle su kıtlığı ve çölleşme artmaktadır. Safi vd. (2024)'e göre bu çevresel stres faktörleri, çevreye ek olarak halk sağlığı, gıda güvenliği ve geçim kaynaklarını da etkilemektedir. Bu durum, Herat Şehri ve sakinlerinin iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak için sürdürülebilir kalkınma stratejileri benimseme ihtiyacını vurgulamaktadır.

Herat Şehri'nin nüfus dinamiklerinin, büyüme modellerinin ve kalkınma sorunlarının anlaşılması, demografik yapısı ve sosyoekonomik durumunun bilincinde olmaya bağlıdır. Alavi ve Tanaka (2023)'e göre göç, tarih ve kültür nüfusun demografik bileşimini etkilemiştir. SHAH (2017)'e göre kentsel nüfusa hem doğal artış hem de kırsaldan şehire göç sonucu oluşan nüfus artışı eşliğinde Peştunlar, Tacikler, Hazaralar ve diğer etnik grupların bir arada yaşaması teşvik edilmektedir. Bakos ve Fishstein (2018)'a göre yoksulluk, işsizlik, eğitim ve sağlık hizmetlerine erişim gibi konuları içeren sosyoekonomik karmaşıklık önemlidir. Leao, Ahmed ve Kar (2018)'e göre ekonomiyi çeşitlendirme çabalarına rağmen, özellikle gençlerin ve kadınların işsizliği ile ilgili sorunlar devam etmektedir. Bu sosyoekonomik ve demografik değişkenler, kentsel planlama ve kalkınmaya önemli ölçüde etki ederek kapsayıcı stratejileri desteklemektedir (Akseer vd. 2018). Sosyal kaynaşmayı ve ekonomik dayanıklılığı teşvik etmek, sürdürülebilir kentsel kalkınma stratejilerinin barınma, toplu taşıma ve hizmetlere eşit erişimi önceliklendirmesini gerektirir.

Afganistan'ın enerji sektörünün denetimi, stratejik planlama ve politika geliştirmeye odaklanan Enerji ve Su Bakanlığı (MEW) tarafından yürütülmektedir. MEW, Elektrik Sektörü Master Planı ve Ulusal Enerji Stratejisi ve Politikası gibi programlardan sorumludur. Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS), Afganistan İslam Cumhuriyeti Şirketler ve Limited Şirketler Kanunu uyarınca kurulan bağımsız bir kuruluştur. Devlete tamamen ait limited bir şirket olarak faaliyet göstermektedir. Aynı zamanda, ülke çapında elektrik üretimi, ithalatı, iletimi ve dağıtımından sorumlu entegre elektrik şirketi Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS) bulunmaktadır.

Afganistan'ın elektrik şebekesi ağırlıklı olarak ülke şehirlerine hizmet vermektedir; kentsel hanelerin %89'u şebekeye erişime sahipken, kırsal alanlardaki oran yalnızca %11'dir. Şebeke erişiminde illere göre önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Herat gibi büyükşehirlerde, komşu ülkelerden yapılan ithalat nedeniyle bağlantı oranları yüksektir (Noorzad 2018; Rostami vd. 2017). Konutlar, elektrik kullanımının yaklaşık

%93'ünü oluşturmakta olup, büyük bir kısmı Özbekistan, Türkmenistan, İran ve Tacikistan'dan yapılan ithalattan sağlanmaktadır (2015-2016 yıllarında %80). Afganistan, elektriğinin %20'sini kendisi üretmektedir; üretimin büyük bölümü hidroelektrik kaynaklarından gelmektedir. Tüketimi karşılamak için komşu ülkelere ithal edilen elektrik eklenmektedir (Ahmadzai ve McKinna 2018; Rostami vd. 2017). Afganistan, verimli elektrik üretimine öncelik vermekte olup, enerjiyi komşu ülkelere ithal etmeyi ve hidroelektrik kaynaklarını kullanmayı tercih etmektedir. Ancak, ülkenin senkron olmayan izole şebekelerden oluşan parçalı şebeke sistemi, ağ büyümesini ve arz güvenliğini engellemektedir (ESCAP ve Cooperation 2018; Ahmadzai ve McKinna 2018).

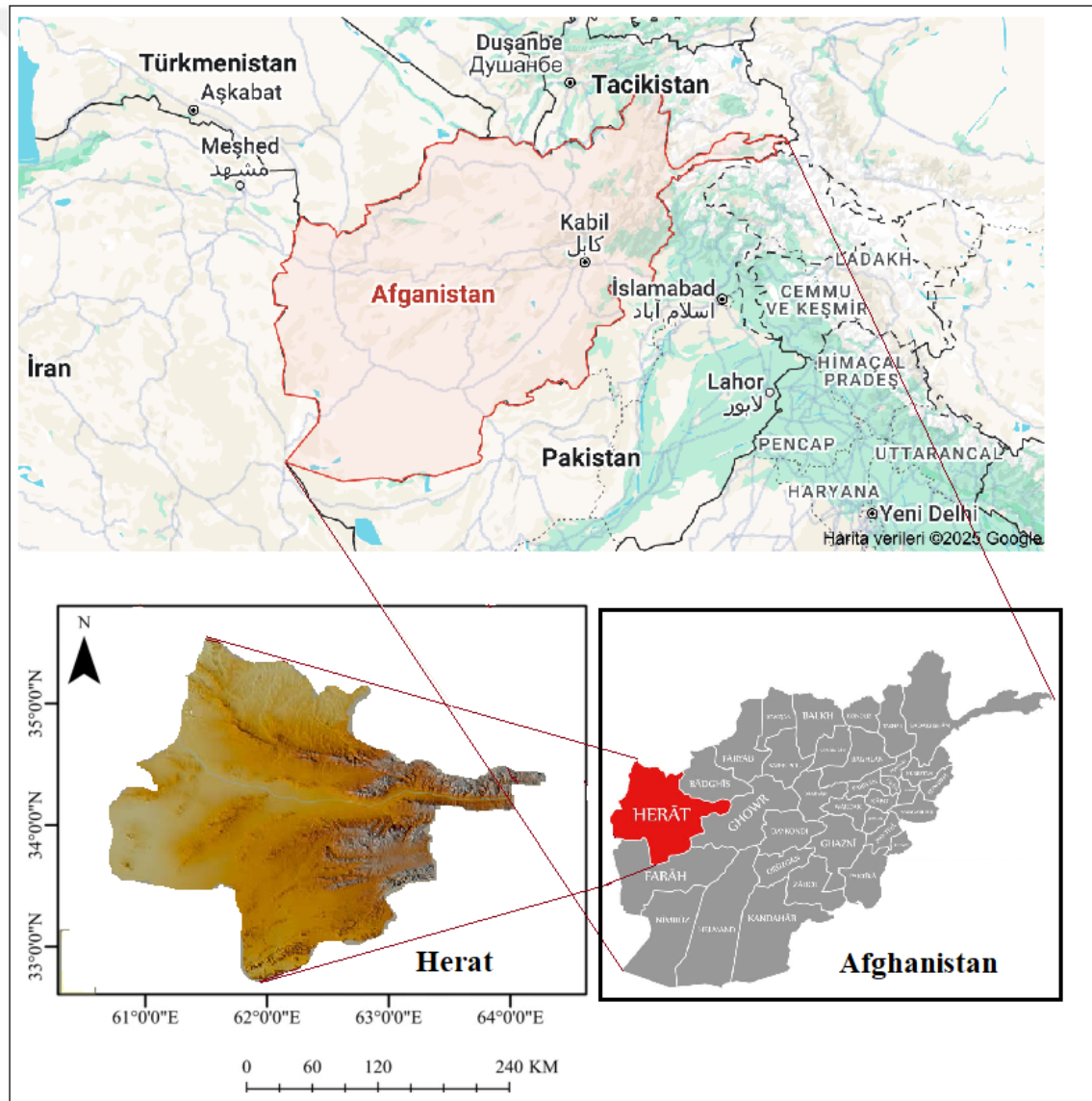
Kentleşme, ekonomik büyüme ve nüfus artışı, Herat Şehri'nin enerji tüketimini etkileyen faktörlerdir. Bu durum, şehrin konut, ticari ve sanayi sektörlerinde yakıt ve enerji ihtiyacının artmasına neden olmuştur (Clark 2016). Nasery, Matci ve Avdan (2021) göre şehrin eski enerji altyapısı, iletim kayıpları ve sınırlı kapasite nedeniyle yenileme ve geliştirme için hem fırsatlar hem de zorluklar sunmaktadır. (Clark 2016)'ya göre enerji kıtlığı, verimsizlikler ve çevresel etkileri çözmek için yaratıcı çözümlere ihtiyaç vardır. Bu seçenekler, sürdürülebilir altyapı geliştirmeyi, yenilenebilir enerji entegrasyonunu ve enerji verimliliğini artırmayı içermektedir. Herat Şehri'nin karmaşık enerji alanında yol almak amacıyla etkili enerji yönetimi için bu entegre planlama, uygun fiyatlılık, dayanıklılık ve kamu ve özel sektör paydaşlarının katılımıyla karar alma vurgusu gibi unsurları kapsamaktadır (Ahmadzai ve McKinna 2018; Nasery, Matci ve Avdan 2021).

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde YZ ile bir şehrin sürdürülebilir enerji potansiyeli analizi için Afganistan'ın Herat şehrinin enerji alanı ve enerji tüketim tahminleme modeli için kullanılan YZ'nın tanıtılması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca YZ kapsamında kullanılan makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları hakkında detaylı olarak bilgi verilmiştir.

3.1. Herat Şehri

Batı Afganistan'da bulunan Herat şehri, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bölgede önemli tarihi, kültürel ve stratejik öneme sahiptir. Binlerce yıllık zengin bir geçmişe sahip olan Herat, İpek Yolu boyunca önemli bir ticaret, kültür ve eğitim merkezi olarak hizmet vermiştir. Ticaret ve ticaretten tarım ve sanayiye kadar uzanan faaliyet alanlarıyla Herat şehri, bölgesel bir ekonomik merkez olarak işlev görmektedir.



Şekil 3.1. Afganistan'ın Herat şehrinin coğrafi konumu (Palka 2001)

Batı Afganistan'da önemli bir tarihi ve ticari merkez olan Herat Şehri, belirgin enerji ile ilgili sorunlara sahiptir. Sıcak ve kurak yazlar ile ılıman kışlara sahip kurak ve yarı kurak bir ortamda yerleşmesi nedeniyle, şehrin enerji tüketimi yıl boyunca önemli ölçüde değişmektedir.

İklimsel Etkiler

Sıcak yazlar ve soğuk kışlarla karakterize edilen şehrin iklimi, enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir. Yaz aylarında yüksek sıcaklıklar, soğutma yüklerinde artışa yol açarken, soğuk kışlar yüksek ısıtma tüketimlerine neden olmaktadır. Bununla birlikte, şehirdeki binaların çoğu uygun izolasyona sahip olmadığı için ısıtma ve soğutmada önemli ölçüde enerji kayıplarına ve verimsizliklere yol açmaktadır.

Enerji Arzı ve Bağımlılık

Herat Şehri'nin enerji arzı büyük ölçüde İran ve Türkmenistan'dan ithal edilen elektriğe bağlıdır (Fahimi 2024).

- **Fiyat Dalgalanmaları:** Bölgedeki sakinler ve işletmeler, daha önce de belirtildiği gibi uluslararası enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar ve bölgedeki jeopolitik istikrarsızlık nedeniyle enerji faturalarında ani ve öngörülemeyen artışlarla karşılaşabilirler.
- **Arz Kesintileri:** Komşu ülkelerden elektriğin taşınması, özellikle şiddetli hava koşullarında (örneğin yoğun kar yağışı) çeşitli engellerle karşılaşmaktadır. Bu, iletim hatlarına zarar verebilir ve sık sık elektrik kesintilerine ve elektrik dağıtımında aksaklıklara neden olabilir.
- **İthalata Bağımlılık:** Şehrin ithal edilen elektriğe bağımlılığı, enerji bağımsızlığını kısıtlamaktadır ve komşu ülkelerde yaşanan siyasi veya ekonomik karışıklıklardan kaynaklanan arz kesintilerine karşı savunmasızdır.

Enerji Erişimi ve Tüketimi

Güvenilir elektriğe erişim, hem kentsel hem de kırsal bölgelerde yaşayan insanlar için yaşam standartlarını yükseltmek ve ekonomik büyümeyi teşvik etmek için hayati önem taşır. Kırsal topluluklar yetersiz altyapıdan büyük ölçüde etkilenirken, kentsel haneler de düzensiz tedarik ve yüksek enerji faturaları gibi engellerle karşı karşıyadır, bu da sürdürülebilir çözümlere olan acil ihtiyacı vurgular (Sirotkin ; Fahimi 2024).

- Kırsal hanelerin yalnızca %11'i şebekeye bağlıyken, bu oran kentsel hanelerde %89'dur (French vd., 2020; Rostami vd., 2017).
- Tüm enerji tüketiminin %80'inden fazlasını haneler oluşturduğundan, enerjinin ana kullanıcılarıdır (ESCAP 2017).
- Nüfusun önemli bir kısmı, güvenilir şebeke elektriğine sınırlı erişimi ve yüksek enerji maliyetleri nedeniyle ısıtma ve pişirme için odun ve diğer biyokütle yakıtları gibi alternatif enerji kaynaklarına bağımlıdır. Bu da çevre bozulmasına ve olası sağlık risklerine katkıda bulunmaktadır.

Enerji Tüketim Kalıpları

Etkin enerji yönetimi ve planlaması, enerji tüketiminin zamansal dinamiklerinin anlaşılmasını gerektirir. Günlük faaliyetler, hava durumu ve mevsimsel dalgalanmalar,

enerji tüketim kalıplarını etkileyen faktörlerden bazılarıdır. Bu faktörler topluca genel yük profilini ve tepe noktası tüketim dönemlerini belirler.

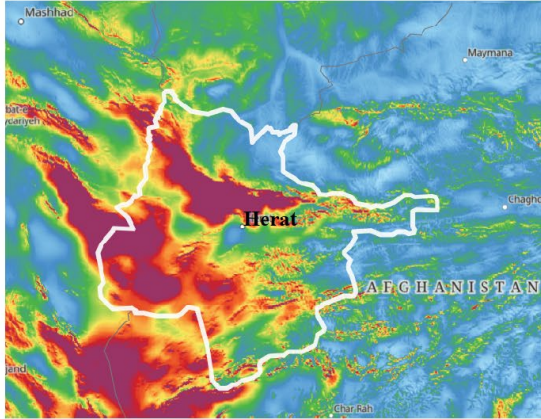
- **Günlük Kalıplar:** Gündüz yük profili belirgindir, ticari, sanayi ve evsel faaliyetlerin artması nedeniyle tepe noktası tüketimi genellikle öğleden sonra ve akşam saatlerinde gerçekleşir. Öte yandan, erken saatlerde enerji kullanımı önemli ölçüde düşer.
- **Mevsimsel Değişimler:** Enerji tüketiminde belirgin mevsimsel farklılıklar vardır. Artan ısıtma ihtiyacı nedeniyle, enerji tüketimi genellikle kış aylarında (Kasım-Mart) daha yüksektir. Öte yandan, Haziran-Ağustos ayları arasında yaz aylarında tüketim genellikle normaldir, ancak sıcak havalarda daha yüksek soğutma yükleri daha yüksek enerji kullanımına neden olabilir.
- **Sosyo-ekonomik Faktörler:** Şehrin sosyo-ekonomik özellikleri de enerji tüketim kalıplarını etkiler. Nüfus artışı, ekonomik gelişme ve kentleşme gibi faktörler zaman içinde enerji tüketiminde artışa yol açabilir.

Yenilenebilir Enerji Potansiyeli

Afganistan hem fosil bazlı hem de yenilenebilir olmak üzere bol miktarda enerji kaynağına sahiptir. Tahminler, Afganistan'ın hidroelektrik potansiyelinin yaklaşık 23000 MW olduğunu, güneş enerjisi potansiyelinin 220 GW'ı aştığını ve rüzgar enerjisi potansiyelinin yaklaşık 67 GW olarak tahmin edildiğini göstermektedir (Amin 2017; Fahimi 2024). Herat'ta yüksek bir yenilenebilir enerji potansiyeli bulunmasına rağmen, bu kaynakların gerçek kullanımı hala çok düşüktür. Bölgenin iklim ve coğrafyası güneş ve rüzgar enerji sistemlerinin kurulumu için uygun olmasına rağmen, şehir konvansiyonel enerji kaynaklarını yoğun bir şekilde kullanırken bu yenilenebilir enerji kaynaklarının çok azını benimsemiştir. Bu az kullanım, yalnızca sürdürülebilir enerjinin avantajlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel etkileri azaltma ve artan enerji ihtiyaçlarını karşılama çabalarını da engeller. Yılda 300'den fazla güneşli gün ve ortalama 4,5-5,4 kWh/m² güneş radyasyonu ile şehir, hem şebekeden bağımsız hem de şebekeye bağlı uygulamalarda güneş PV sistemleri için mükemmel bir potansiyel sunmaktadır (Naseri, Altan ve Güngör 2024; Anwarzai ve Nagasaka 2017). Ayrıca, dağlık arazi, rüzgar enerjisi için uygun koşullar sağlamakta olup, kaynak değerlendirmeleri rüzgar türbini kurulumları için güçlü beklentiler göstermektedir.

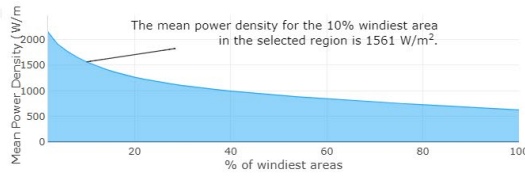
Herat Şehri'nin yenilenebilir enerji potansiyeli, PV güç üretimi ve rüzgar ortalama güç yoğunluğu Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Önemli güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeline sahip bölgeler vurgulanarak şehrin yenilenebilir enerji projeleri için uygunluğunu göstermektedir. Hem rüzgar gücü yoğunluğu haritası hem de yüksek PV güç çıkışı, sırasıyla güneş enerjisi üretimi ve rüzgar enerjisi gelişimi için önemli bir potansiyel olduğunu göstermektedir. Bu bilgiler, Herat Şehri'nin sürdürülebilir enerji çözümleri bulma çabalarını desteklemektedir. Bu yenilenebilir kaynaklardan yararlanarak, Herat Şehri ithal edilen enerjiye ve çevreye zararlı fosil yakıtlara olan bağımlılığını önemli ölçüde azaltabilir.

Herat, Afganistan rüzgar ortalama güç yoğunluğu

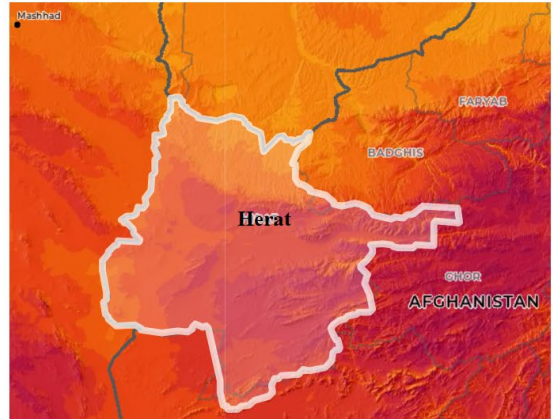


Mean Power Density @Height 100m

1561 W/m² 11.49 m/s Height: 100m



Herat, Afganistan fotovoltaik güç çıkışı



Specific photovoltaic power output

Average	5.05 kWh/kWp
Maximum	5.39 kWh/kWp
Percentile 90	5.28 kWh/kWp
Percentile 75	5.20 kWh/kWp
Percentile 50 (Median)	5.10 kWh/kWp
Percentile 25	4.91 kWh/kWp
Percentile 10	4.69 kWh/kWp
Minimum	4.57 kWh/kWp

Şekil 3.2. Herat şehrinin güneş ve rüzgar potansiyeli (Group 2024a, 2024b)

Enerji Tüketimi ve Arzı

Afganistan'ın kişi başına düşen elektrik tüketimi, 2022 yılında kişi başına yaklaşık 2,69 milyon Btu (kişi başına saatte 0,09 kWh'ye eşdeğer) olarak tahmin edilmekte olup küresel ölçekte en düşük seviyelerde kalmaktadır (Malik 2011; Wani, Khan ve Naderi 2024). Nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve kentleşme Afganistan'ın önemli kent merkezlerinden biri olan Herat Şehri'nde de yansıyan eğilimler tarafından yönlendirilen ulusal enerji tüketimi artmaya devam etmektedir.

Yukarıda bahsedildiği gibi enerji alanındaki zorluklar ve fırsatlar, enerji yönetiminde yenilikçi yaklaşımlar için kritik bir ihtiyacı vurgulamaktadır. Son bölümde, Herat Şehri'nde enerji tüketimini tahmin etmek ve optimize etmek için yapay zekânın (YZ) nasıl kullanılabileceği ve daha verimli ve sürdürülebilir enerji çözümlerine bir yol sağlayabileceği araştırılmıştır.

3.2. Yapay Zeka

Yapay zeka, tipik olarak insan zekasına atfedilen bilişsel süreçlerin hesaplamalı simülasyonunu temsil eder. Bu süreçler, karmaşık görevleri yerine getirmek üzere programlanmış makineler tarafından kolaylaştırılan öğrenme, akıl yürütme ve karar vermeyi kapsar (Jaboob, Durrah ve Chakir 2024). Tarihsel olarak, zeka ile donatılmış yapay varlıkların kavramsallaştırılması antik anlatılara dayanmaktadır. Bununla birlikte,

YZ'nin bilimsel bir disiplin olarak resmi kuruluşu, dijital hesaplamanın yaygınlaşmasıyla birlikte 20. yüzyılın ortalarında ortaya çıkmıştır (Veniaminovich 2023). Önemli katkılar arasında, etkili Turing Testi'ni tanıtan Alan Turing'in "Hesaplama Makineleri ve Zeka" (1950) adlı çığır açan çalışması ve YZ'nin ayrı bir çalışma alanı olarak temel etkinliği olarak kabul edilen 1956 Dartmouth Konferansı yer almaktadır (Grzybowski, Pawlikowska-Łagód ve Lambert 2024).

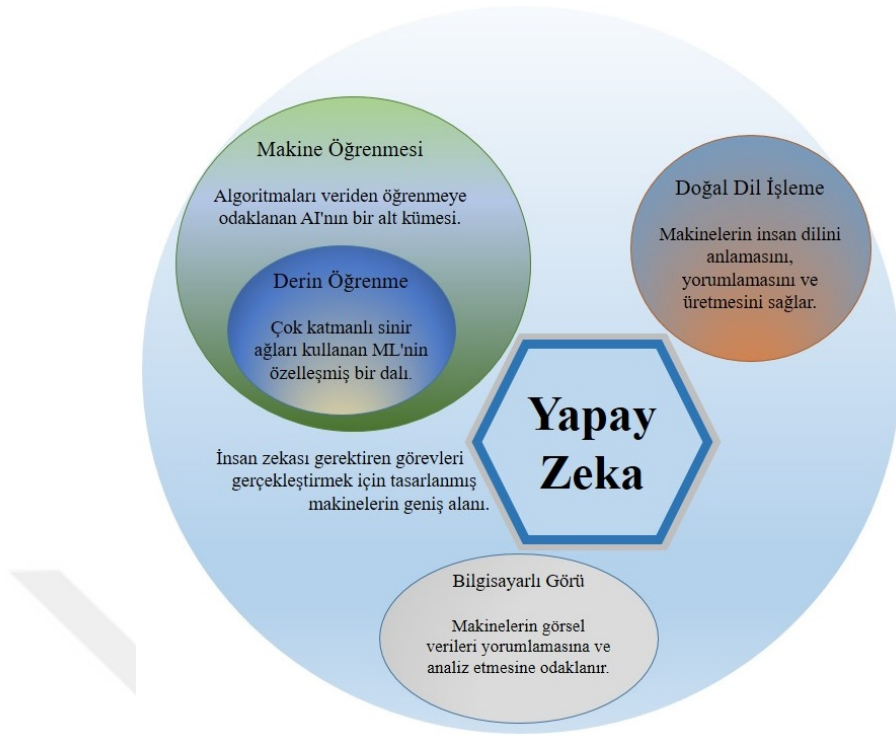
YZ'nin temelinde, problem çözme için prosedürel direktifler olarak hizmet eden algoritmalar ve YZ sistemlerinin içgörü elde etmesi ve bilinçli kararlar vermesi için temel girdi olan veriler yer almaktadır. YZ'nin bir alt kümesi olan Makine Öğrenimi (Machine learning) (ML) veri odaklı öğrenme ve tahmine dayalı modelleme yeteneğine sahip algoritmaların geliştirilmesine odaklanarak sistemlerin açık, göreve özgü programlama olmadan verilerden öğrenmesini sağlar. İnsan beyninin mimarisinden ilham alan hesaplama modelleri olan sinir ağları, karmaşık veri yapılarını analiz etmeyi kolaylaştıran ML'nin daha gelişmiş bir yinelemesi olan derin öğrenmenin temelini oluşturur.

Yapay zeka, işlevsel yeteneklere göre geniş çapta iki kategoriye ayrılır:

- Dar YZ (Zayıf YZ): Sınırlı alanlarda belirli görevleri yerine getirmek için tasarlanmış sistemler. Örnekler arasında sanal kişisel asistanlar, öneri motorları ve özel görüntü tanıma yazılımları bulunur. Bu sistemler genel zeka ve öz farkındalıktan yoksundur.
- Yapay Genel Zeka (AGI) (Güçlü YZ): Çeşitli alanlarda akıl yürütme, problem çözme ve bilgi transferi yeteneğine sahip insan düzeyinde bilişsel yetenekler sergileyen sistemlerdir. AGI teorik bir yapı olarak kalır.

Yapay zeka içindeki diğer alt alanlar şunlardır (Şekil 3.3):

- Makine Öğrenimi: Sistemlerin verilerden öğrenmesini ve açık programlama olmadan performansı iyileştirmesini sağlayan bir YZ paradigmasıdır. Bu, denetimli, denetimsiz ve takviyeli öğrenmeyi içerir.
- Derin Öğrenme: Büyük veri kümelerinde karmaşık desen analizi için çok katmanlı sinir ağlarını kullanan, özellikle görüntü ve konuşma tanımada etkili olan özel bir ML dalıdır.
- Doğal Dil İşleme: Sohbet robotları, çeviri ve duygu analizi gibi uygulamalarla makinelerin insan dilini anlamasını ve üretmesini sağlamaya odaklanan bir alandır.
- Bilgisayarlı Görü: Makinelerin görüntü ve videolar gibi görsel verileri yorumlamasını ve analiz etmesini sağlamaya adanmış bir alt alandır.



Şekil 3.3. Yapay zeka ve temel alt alanları

Yapay zekanın dönüştürücü potansiyeli, inovasyonu ve verimliliği artırması açısından makine mühendisliği ve özellikle enerji alanı sektöründe oldukça önemlidir. Bu uygulamalar ile ilgili bazı yetenekleri şu şekilde sıralanabilir:

- **Tahmine Dayalı Bakım:** YZ destekli sistemler, üretim ve enerji üretiminde arıza sürelerini ve bakım maliyetlerini en aza indirerek ekipman arızalarını tahmin etmek için sensör verilerini analiz eder.
- **Tasarım Optimizasyonu:** YZ algoritmaları, çok sayıda tasarım varyasyonunun simülasyonu ve değerlendirmesi yoluyla mekanik tasarımları optimize ederek gelişmiş performans ve maliyet etkinliği için kullanılır.
- **Enerji Yönetimi:** YZ, binalarda, endüstriyel tesislerde ve enerji şebekelerinde enerji tüketimini optimize eder. Akıllı şebekeler, arz ve tüketimi dengelemek, yenilenebilir enerjiyi entegre etmek ve şebeke güvenilirliğini artırmak için YZ'yi kullanır.
- **Robotik ve Otomasyon:** YZ destekli robotlar, hassasiyeti ve üretkenliği artırarak montaj, kaynak ve malzeme taşıma gibi görevleri yerine getirir.
- **Yenilenebilir Enerji Tahmini:** YZ modelleri, enerji şebekesine daha iyi entegrasyonu sağlayarak yenilenebilir enerji üretimini tahmin eder.
- **Süreç Optimizasyonu:** YZ, çıkarma ve rafine etme gibi enerji sektöründeki süreçleri optimize ederek verimliliği artırır ve çevresel etkiyi azaltır.
- **Hata Tespiti ve Teşhisi:** YZ, mekanik ve enerji sistemlerindeki anormallikleri tespit ederek zamanında müdahaleleri kolaylaştırır.

Bu yapay zeka yetenekleri, özellikle bu tez çalışmasının odak noktası olan enerji tüketim tahmini bağlamında, sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesi için çok

önemlidir. Bu tez çalışmasında, sürdürülebilir enerji potansiyelini analiz etmek ve tahminlemek amacıyla farklı yapay zeka modelleri kullanılmıştır. Bu modellerin temelinde yatan öğrenme şekilleri şunlardır: Denetimli Öğrenme (Supervised Learning): Bu tez çalışmasında kullanılan Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression (SVR)), Rastgele Orman (Random Forest (RF)), İleri Beslemeli Sinir Ağı (Feedforward neural network(FNN)) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory (LSTM)) modelleri ağırlıklı olarak denetimli öğrenme prensibiyle çalışmaktadır. Bu öğrenme şeklinde, öncelikle modellere girdi verileri (elektrik tüketimi, meteorolojik veriler gibi) ve karşılık gelen çıktı verileri (gelecekteki elektrik tüketimi) sunulmuştur. Modeller, bu etiketlenmiş veri seti üzerinden girdi ve çıktı arasındaki ilişkiyi öğrenerek gelecekteki değerleri tahmin etme yeteneği kazanmışlardır. Örneğin, geçmişteki saatlik elektrik tüketimi ve o saatteki sıcaklık, nem gibi meteorolojik veriler girdi olarak verilirken, bir sonraki saatteki elektrik tüketimi çıktı olarak kullanılmıştır. Diğer bir öğrenme şekli ise, Transfer Öğrenimi (Potansiyel Uygulama): Şu anki çalışmanın odağında doğrudan transfer öğrenimi olmasa da, gelecekteki araştırmalar için bu yöntemin potansiyeli bulunmaktadır. Eğer benzer şehirlerin enerji tüketimi verileri mevcutsa, bu veriler üzerinde eğitilmiş bir modelin Herat şehrinin verileri üzerinde ince ayar (fine-tuning) yapılarak daha hızlı ve etkili sonuçlar elde edilebilir. Bu, özellikle veri azlığı durumlarında faydalı bir yaklaşım olabilir.

Tez çalışmasının geliştirilmesi ve uygulanmasında Python programlama dili ve çeşitli güçlü kütüphanelerden yararlanılmıştır:

- Python: Temel programlama dili olarak Python kullanılmıştır. Python'ın basit sözdizimi, geniş kütüphane ekosistemi ve topluluk desteği, yapay zeka projeleri için ideal bir ortam sunmaktadır. Veri manipülasyonu, model geliştirme, eğitim ve değerlendirme süreçlerinin tamamı Python ile gerçekleştirilmiştir.
- PyCharm Community Edition 2023.2: Geliştirme ortamı olarak PyCharm kullanılmıştır. Bu IDE, kod yazma, düzenleme, hata ayıklama ve proje yönetimi gibi süreçleri kolaylaştırarak geliştirme verimliliğini artırmıştır.
- Temel Veri İşleme ve Analiz Kütüphaneleri:
 - Pandas: Veri setinin okunması, temizlenmesi, düzenlenmesi ve ön işlenmesi gibi temel veri manipülasyonu görevleri için kullanılmıştır. Özellikle veri çerçeveleri (DataFrames) ile çalışmak, veriyi anlamak ve hazırlamak açısından büyük kolaylık sağlamıştır.
 - NumPy: Sayısal hesaplamalar, dizi ve matris işlemleri için temel kütüphane olarak kullanılmıştır. Yapay zeka modellerinin matematiksel işlemleri ve veri manipülasyonu için kritik öneme sahiptir.
- Görselleştirme Kütüphaneleri:
 - Matplotlib: Veri görselleştirme ve model sonuçlarının grafiksel olarak sunulması için kullanılmıştır. Çeşitli grafik türleri (çizgi grafikleri, dağılım grafikleri vb.) ile veriyi anlamak ve sonuçları etkili bir şekilde iletmek mümkün olmuştur.
 - Seaborn: Matplotlib üzerine inşa edilmiş, daha gelişmiş ve istatistiksel grafikler oluşturmak için kullanılmıştır. Veri arasındaki ilişkileri ve dağılımları daha görsel ve anlaşılır hale getirmeye yardımcı olmuştur.
- Makine Öğrenimi Kütüphaneleri:

- Scikit-learn (sklearn): Destek Vektör Regresyonu (SVR) ve Rastgele Orman (RF) modellerinin uygulanması için kullanılmıştır. Ayrıca veri ölçeklendirme (örneğin, normalleştirme), veri bölme (eğitim ve test setlerine ayırma) ve model performansını değerlendirme (örneğin, R-kare, ortalama kare hata) gibi işlemler için de kullanılmıştır.
- Derin Öğrenme Kütüphaneleri:
 - TensorFlow ve Keras: İleri Beslemeli Sinir Ağı (FNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modellerinin oluşturulması, eğitilmesi ve değerlendirilmesi için kullanılmıştır. TensorFlow, Google tarafından geliştirilen güçlü bir derin öğrenme platformudur ve Keras, TensorFlow üzerinde çalışan yüksek seviyeli bir AGI sağlayarak sinir ağı geliştirmeyi kolaylaştırmıştır.
 - EarlyStopping, ReduceLROnPlateau, LearningRateScheduler: Derin öğrenme modellerinin eğitim sürecini optimize etmek için kullanılan geri çağırma (callback) fonksiyonlarıdır. Aşırı öğrenmeyi engellemek ve öğrenme oranını dinamik olarak ayarlamak için kullanılmıştır.
 - BatchNormalization: Sinir ağlarının eğitimini hızlandırmak ve kararlılığını artırmak için kullanılan bir katmandır.
 - L2 Regularization: Derin öğrenme modellerinde aşırı öğrenmeyi azaltmak için kullanılan bir düzenleme tekniğidir.
- Diğer Kütüphaneler:
 - Datetime: Zaman serisi verilerini işlemek ve zaman tabanlı özellikleri (saat, gün, ay gibi) oluşturmak için kullanılmıştır.
 - Openpyxl: Excel dosyalarıyla çalışmak için kullanılmıştır, veri okuma veya model sonuçlarını kaydetme aşamalarında kullanılmıştır.
 - Scipy: İstatistiksel analizler ve bazı optimizasyon işlemleri için kullanılmıştır.

Bu kütüphaneler ile tez çalışmasının hedeflerine ulaşmak için gerekli olan veri işleme, model geliştirme ve değerlendirme adımları etkili bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir kütüphane, belirli bir amaca hizmet ederek tez çalışmasının bütünlüğüne katkıda bulunmuştur.

3.2.1. Veri işleme

Yapay zeka modellerinin başarısı, kullanılan verinin kalitesine ve uygunluğuna büyük ölçüde bağlıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan temel veri seti, Afganistan'ın Herat şehrine ait saatlik elektrik tüketimi ve saatlik meteorolojik verilerinden oluşmaktadır. Veriler, Mart 2021'den Mart 2024'e kadar olan 3 yıllık bir dönemi kapsamaktadır.

Veri Kaynakları:

- Elektrik Tüketim Verileri: Afganistan Ulusal Elektrik İdaresi (DABS), Herat Şehir Şubesi. Bu kaynak, şehrin enerji tüketimi hakkında güvenilir ve kapsamlı bilgi sağlamaktadır.
- Meteorolojik Veriler: Visual Crossing. Bu ticari veri sağlayıcısı, güvenilir ve doğru saatlik meteorolojik veriler sunmaktadır.

Veri Setinin İçeriği:

- Elektrik Tüketimi (MW): Analizin temel bağımlı değişkenidir, her saat tüketilen elektrik miktarını temsil eder.
- Meteorolojik Değişkenler:
 - Güneş Radyasyonu (W/m^2)
 - Sıcaklık ($^{\circ}C$)
 - Nem (%)
 - Çiy Noktası ($^{\circ}C$)
 - Rüzgar Hızı (km/saat)

Veri Setinin Boyutu:

Yaklaşık olarak 3 yıl * 365 gün * 24 saat = 26280 veri noktası içermektedir.

Veri toplama sürecinde, güvenilir kaynaklardan (Afganistan Ulusal Elektrik İdaresi ve Visual Crossing) elde edilen bu veriler, model eğitimine uygun hale getirilmek için çeşitli veri ön işleme adımlarından geçirilmiştir. Bu adımlar, eksik ve aykırı değerlerin temizlenmesini, verinin farklı ölçeklerinin modele etkisini azaltmak için normalleştirilmesini ve modelin öğrenme yeteneğini artırmak için ilgili özelliklerin (örneğin, zaman tabanlı özellikler) oluşturulmasını içermektedir.

Veri Setinin Temel İstatistiksel Özellikleri:

Çizelge 3.1’de, veri setindeki temel sayısal değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri özetlenmektedir:

Çizelge 3.1. Veri setindeki temel sayısal değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri

Değişken	Ortalama Değer	Standart Sapma
Elektrik Tüketimi (MW)	56,28	12,84
Güneş Radyasyonu (W/m^2)	239,12	320,98
Sıcaklık ($^{\circ}C$)	18,79	10,22
Nem (%)	32,23	20,43
Çiy Noktası ($^{\circ}C$)	-1,17	5,28
Rüzgar Hızı (km/saat)	14,54	11,75

- Korelasyon: Pearson korelasyon analizi, bağıl çiy noktası ile enerji tüketimi arasında güçlü bir pozitif korelasyon (r değeri belirtilebilir) ve güneş radyasyonu ile enerji tüketimi arasında negatif bir korelasyon (r değeri belirtilebilir) olduğunu göstermiştir.

Matematiksel Yaklaşımlar (Veri Seti Bağlamında Temel Seviye):

- Ortalama (Mean): Bir veri setindeki değerlerin toplamının, değer sayısına bölünmesiyle elde edilir (3.1). Verinin merkezi eğilimini gösterir.

$$Ortalama = \frac{(\Sigma \text{ Veri Değeri})}{\text{Veri Sayısı}} \quad (3.1)$$

- Standart Sapma (Standard Deviation): Veri noktalarının ortalamadan ne kadar uzaklaştığının bir ölçüsüdür (3.2). Verinin yayılımını gösterir.

$$\text{Standart Sapma} = \sqrt{\frac{\Sigma (\text{Veri Değeri} - \text{Ortalama})^2}{(\text{Veri Sayısı} - 1)}} \quad (3.2)$$

- Pearson Korelasyon Katsayısı (Pearson Correlation Coefficient): İki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü ve yönünü ölçer. -1 ile +1 arasında değer alır (3.3).

$$r = \frac{\Sigma (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\Sigma (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.3)$$

Burada, x ve y ilgili değişkenlerin değerlerini, $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ ise ortalamalarını temsil eder.

3.2.2. Özellik ölçeklendirme

Model performansını ve kararlılığını artırmak için, giriş verilerine özellik ölçeklendirme uygulanmıştır.

StandardScaler

StandardScaler, ortalamayı çıkararak ve birim varyansa ölçeklendirerek özellikleri standartlaştırır.

- StandardScaler, makine öğrenimi ve veri ön işleme süreçlerinde kullanılan bir veri standardizasyon tekniğidir.
- Verileri, ortalaması 0 ve standart sapması 1 olacak şekilde dönüştürür.
- Bu, farklı ölçeklerdeki özellikleri aynı ölçeğe getirerek makine öğrenimi algoritmalarının daha iyi performans göstermesini sağlar.

StandardScaler kullanarak bir özellik x'i ölçeklendirmek için denklem (3.4) kullanılır.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.4)$$

Burada:

- x: Orijinal özellik değeri.
- μ : Özelliğin ortalaması.

- σ : Özelliğin standart sapması.
- z : Standartlaştırılmış özellik değeridir.
- Ortalamayı Çıkarma ($x - \mu$): Öncelikle, her veri noktasından özelliğin ortalaması çıkarılır. Bu, verilerin ortalama etrafında ortalanmasını sağlar.
- Standart Sapmaya Bölme ($1/\sigma$): Daha sonra, elde edilen fark, özelliğin standart sapmasına bölünür. Bu, verilerin birim varyansa ölçeklenmesini sağlar.

MinMaxScaler

MinMaxScaler, her bir özelliği, genellikle $[0, 1]$ aralığına ölçeklendirir ve dönüştürür.

- MinMaxScaler, makine öğrenimi ve veri ön işleme süreçlerinde kullanılan bir veri normalizasyon tekniğidir.
- Verileri, belirli bir aralığa (genellikle $[0, 1]$ aralığına) ölçeklendirir.
- Bu, farklı ölçeklerdeki özellikleri aynı aralığa getirerek makine öğrenimi algoritmalarının daha iyi performans göstermesini sağlar.

MinMaxScaler kullanarak bir özellik x 'i ölçeklendirmek için denklem (3.5) kullanılır.

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3.5)$$

Burada:

- x : Orijinal özellik değeri.
- $x_{\min}$: Veri setindeki özelliğin minimum değeri.
- $x_{\max}$: Veri setindeki özelliğin maksimum değeri.
- x' : Ölçeklenmiş özellik değeridir.
- Minimum Değeri Çıkarma ($x - x_{\min}$): Öncelikle, her veri noktasından özelliğin minimum değeri çıkarılır. Bu, verilerin minimum değer etrafında ortalanmasını sağlar.
- Aralığa Bölme ($1/(x_{\max} - x_{\min})$): Daha sonra, elde edilen fark, özelliğin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farka bölünür. Bu, verilerin istenen aralığa (genellikle $[0, 1]$) ölçeklenmesini sağlar.

RobustScaler

RobustScaler, medyanı çıkararak ve çeyrekler arası aralık (IQR) ile ölçeklendirerek aykırı değerlere karşı sağlam istatistikler kullanarak özellikleri ölçeklendirir. RobustScaler kullanarak bir özellik x 'i ölçeklendirmek için denklem (3.6) kullanılır.

$$x' = \frac{x - \text{median}}{IQR} \quad (3.6)$$

Burada:

- x : Orijinal özellik değeri.

- median: Veri setindeki özelliğin medyanı.
- IQR: Özelliğin çeyrekler arası aralığı (75. ve 25. yüzdelik değerler arasındaki fark).
- x' : Ölçeklenmiş özellik değeridir.

Bu ölçeklendirme, özellikle aşırı değerlerin medyan ve IQR'yi etkilemediği için, önemli aykırı değerlere sahip veri setleri için etkilidir.

3.2.3. Makine öğrenmesi

Makine öğrenmesi (ML), bilgisayarların doğrudan kodlanmaya ihtiyaç duymadan, mevcut veriler üzerinden örüntüler keşfederek öğrenme yeteneği kazanmasını ve bu öğrenme sonucunda geleceğe yönelik çıkarımlar veya tahminler yapabilmesini sağlayan bir yapay zeka alt dalıdır (Cohen 2025). Özellikle enerji ihtiyacı öngörüsü gibi zamana bağlı verilerin analizini içeren problemlerin çözümünde sıklıkla başvurulanan bir yöntemdir. ML algoritmalarının temel amacı, girdi olarak sağlanan değişkenler (nitelikler) ile tahmin edilmek istenen hedef değişken (sonuç) arasındaki karmaşık ilişkileri modellemektir (Hai vd. 2023).

Temel Kavramsal Yapı: Denetimli öğrenmede amaç, bir fonksiyon $f : X \rightarrow Y$ bulmaktır; burada:

- $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ giriş verileri (ör. sıcaklık, rüzgar hızı),
- $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ hedef değerlerdir (ör. elektrik tüketimi).

Makine öğrenmesi kullanarak bir özellik Y 'i ölçeklendirmek için denklem (3.7) kullanılmaktadır (Gori, Betti ve Melacci 2023).

$$Y = F(x) = W^T f(x) + b \quad (3.7)$$

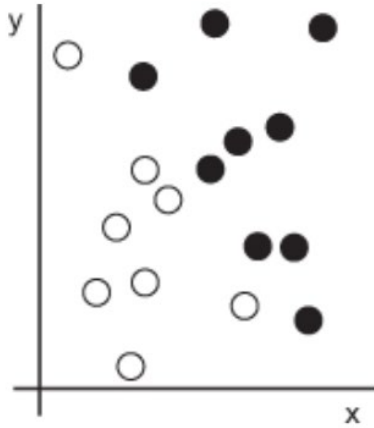
Burada:

- Y : Tahmin edilen çıktı
- $F(x)$: Girdi verilerine (x) karşılık gelen tahmin fonksiyonu.
- x : Girdi vektörü
- $f(x)$: Girdi x üzerinde uygulanan dönüşüm
- W : Ağırlık vektörü.
- W^T : Ağırlık vektörünün transpozesi.
- b : Sapma terimi (bias)

Bu denklem doğrusal regresyon için geçerlidir; diğer algoritmalar, bu temel yapıyı daha karmaşık modellerle genelleştirir.

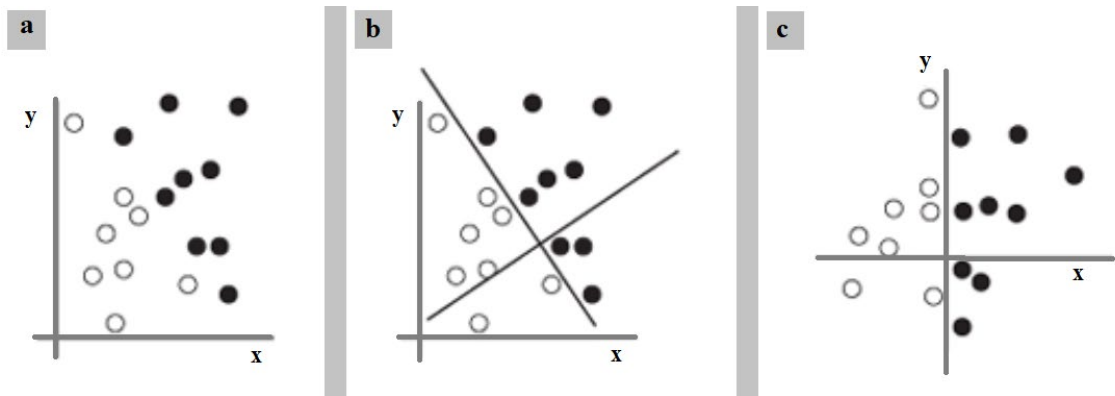
Enerji tahmini için makine öğrenimi bağlamında, temel prensip, sistem parametreleri veya çevresel koşullar gibi girdi verilerini, enerji tüketimi veya üretimi gibi enerjiyle ilgili çıktıların tahminini kolaylaştıran anlamlı gösterimlere dönüştürmeyi içerir. Şekil 3.4'teki açıklayıcı örnekte; burada veri noktaları (belirli özelliklere sahip sistem durumlarına benzer şekilde) farklı kategorilere (örneğin, yüksek veya düşük enerji tüketimi) sınıflandırılır. Amaç, yeni bir sistem durumunun kategorisini girdi özelliklerine

dayanarak doğru bir şekilde tahmin edebilen bir model geliştirmektir.



Şekil 3.4. Orijinal koordinat sisteminde noktaların dağılımı (Gori, Betti ve Melacci 2023)

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, makine öğreniminin önemli bir yönü, etkili veri gösterimlerinin aranmasıdır. Enerji tahmini bağlamında bu, ham verileri veya hava durumu bilgilerini enerji örüntüleriyle altta yatan ilişkileri daha iyi yakalayan özelliklere dönüştürmeyi içerebilir. Belirli bir dönüşüm manuel olarak tasarlanabilirken, makine öğrenimi algoritmaları bu arama sürecini önceden tanımlanmış olası dönüşümler uzayında otomatikleştirir. Enerji tahmini doğruluğu gibi bir geri bildirim sinyaline dayanarak farklı gösterimleri yinelemeli olarak değerlendirerek, bu algoritmalar enerji tahmini görevini daha yönetilebilir hale getiren gösterimleri keşfetmeyi amaçlar. Özellik ölçeklendirme, zaman serisi ayrıştırması veya yeni ilgili özelliklerin oluşturulması gibi işlemleri kapsayan, faydalı veri gösterimlerini otomatik olarak bulma ve kullanma temel kavramı, enerji tahmini alanında makine öğrenimi tekniklerini uygulamak için merkezi öneme sahiptir.



Şekil 3.5. Yeni koordinat sistemine geçiş; a) Ham veriler; b) Koordinat değişimi; c) Daha iyi temsil (Gori, Betti ve Melacci 2023)

Yaygın Kullanılan ML Modelleri:

- Destek Vektör Regresyonu (SVR): Giriş uzayındaki verileri doğrusal veya doğrusal olmayan bir hiper düzlemle ayırır.
- Rastgele Orman (Random Forest): Karar ağaçlarından oluşan topluluk yöntemidir.

Destek Vektör Regresyonu (SVR)

Destek Vektör Regresyonu (SVR), regresyon görevleri için tasarlanmış bir ML algoritmasıdır. Doğrusal olmayan ve karmaşık veri setlerinde başarılı sonuçlar ürettiği için zaman serisi tahminlerinde yaygın olarak kullanılır (Dash vd. 2023). Bu çalışmada, Herat şehrinin saatlik elektrik tüketimini öngörmek için SVR metodu uygulanmıştır. SVR, veriyi yüksek boyutlu bir alana taşıyarak burada doğrusal bir regresyon modeli kurar. Amaç, tahminlerin gerçek değerlerden maksimum ε (epsilon) kadar farklılaşmasına müsaade ederek olabildiğince yalın bir regresyon fonksiyonu bulmaktır.

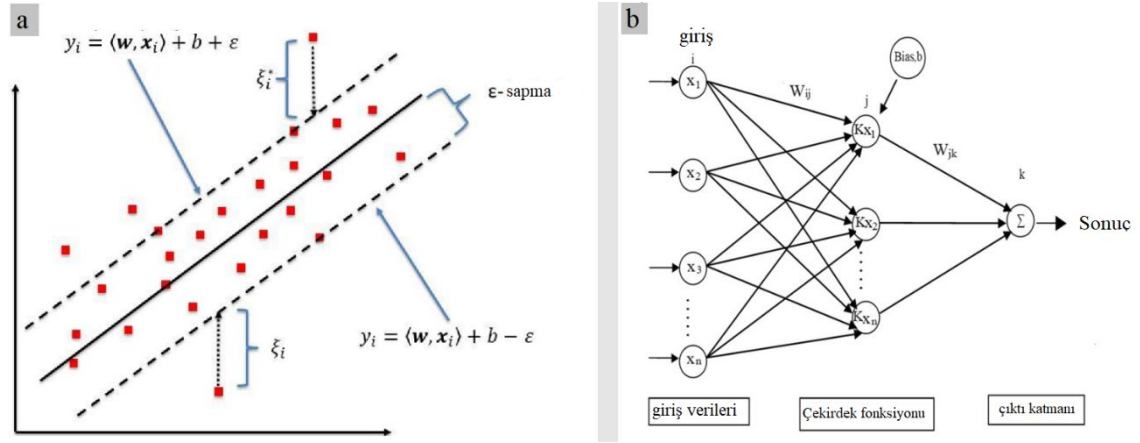
SVR kullanarak bir özellik f_x ölçeklendirmek için denklem (3.8) kullanılmaktadır (Gori, Betti ve Melacci 2023).

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x_i, x) + b \quad (3.8)$$

Burada:

- $f(x)$: verilen x girişi için tahmin edilen değeri temsil eder,
- α_i : optimizasyon sürecinden elde edilen Lagrange çarpanlarıdır,
- $K(x_i, x)$: çekirdek fonksiyonudur ve giriş verileri x_i ile yeni nokta x arasındaki benzerliği hesaplar,
- b : bias (önyargı) terimidir,
- n : destek vektörlerinin sayısını ifade eder.

SVR algoritmasının temel üstünlüklerinden biri, "çekirdek hilesi" sayesinde non-lineer ilişkileri doğrudan işlemeye gerek kalmadan modelleyebilmesidir. Bu çalışmada, enerji tüketimi ile hava durumu faktörleri (sıcaklık, nem, güneşlenme vb.) arasındaki doğrusal olmayan etkileşimleri yakalamak için Radyal Tabanlı Fonksiyon çekirdeği kullanılmıştır. Enerji mühendisliğinde, özellikle kısa dönemli yük tahmini gibi uygulamalarda SVR, güçlü genelleme yeteneği ve aşırı öğrenmeye direnci ile dikkat çekmektedir. SVR metodu, modelin karmaşıklığı ile tahmin doğruluğu arasında dengeli bir yaklaşım sunarak, Herat şehrinin enerji tüketimi tahmininde geleneksel makine öğrenmesi tekniklerinin derin öğrenmeye karşı başarısını değerlendirmek amacıyla bu araştırmaya dahil edilmiştir. Şekil 3.6'nın (a) SVR modelinin ana şemasını, (b) bölümü ise bir SVR modelinin girdi, çekirdek fonksiyonları ve çıktı katmanlarından oluşan yapısını görselleştirmektedir.



Şekil 3.6. Destek Vektör Regresyonu modeli; a) SVR modelinin temel grafiği; b) Bir SVR algoritmasının tipik mimarisi (Gori, Betti ve Melacci 2023)

Rastgele Orman (RF)

Rastgele Orman, hem sınıflandırma hem de regresyon görevlerinde sıklıkla kullanılan güçlü bir gözetimli öğrenme algoritmasıdır. Bu metot, çok sayıda karar ağacının bir araya gelmesiyle oluşan bir bütünleşik (ensemble) model teşkil eder (Zhou, Qiu ve Zhang 2023). Her bir karar ağacı, eğitim veri kümesinin rastgele seçilmiş bir bölümü üzerinde eğitilir ve bu bağımsız ağaçların oluşturduğu yapı (orman) aracılığıyla nihai öngörü gerçekleştirilir. Rastgele Orman, tek bir karar ağacına kıyasla daha üstün bir genelleme yeteneği sergiler ve aşırı öğrenme problemini hafifletir (Gori, Betti ve Melacci 2023).

RF algoritması, her bir karar ağacını eğitim veri kümesinin rastgele bir alt kümesi üzerinde eğitmek için Çizelgeleme (Bagging) tekniğini kullanır. Bu süreç, modelin çeşitliliğini artırarak tahminlerdeki hataların azalmasına yardımcı olur. Her bir ağacın veri kümesinin farklı bir bölümüyle eğitilmesi sayesinde, modelin yeni verilere uyum sağlama kapasitesi yükselir ve aşırı öğrenme riski bertaraf edilir. RF'de her bir karar ağacı, veri kümesinden rastgele belirlenen özelliklerin bir alt kümesi kullanılarak inşa edilir. Bu durum, her bir ağacın farklı bir özellik seti temelinde eğitilmesini mümkün kılar. Bu sayede modelin farklılaşması desteklenir ve her bir ağacın öğrenme süreci birbirinden bağımsız hale gelir. Bu da modelin daha dayanıklı ve yüksek genelleme becerisine sahip olmasına katkıda bulunur. Sonuç olarak, her bir ağacın yaptığı tahminler bir araya getirilerek daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilir.

RF algoritmasının en belirgin avantajlarından biri, aşırı öğrenme olgusunun kayda değer ölçüde azaltılmasıdır. Çok sayıda karar ağacının birlikte çalışması, her bir ağacın tahminindeki hataların birbirini dengeleyecek şekilde telafi etmesini sağlar ve genel modelin hata oranını düşürür. Bu durum, modelin hem kesinliğini artırır hem de daha istikrarlı tahminler yapılmasına olanak tanır. Ek olarak, RF, isabetli tahminler üretme konusunda yüksek bir performans gösterebilir zira her bir karar ağacı, farklı veri alt kümeleri ve özellik setleri üzerinde eğitildiği için sağlam ve esnek bir model ortaya çıkar. Bir diğer önemli üstünlüğü ise, modelin her bir özelliğin önem düzeyini değerlendirebilmesi ve gereksiz görünen özelliklerin modelden çıkarılmasına imkan vermesidir. Bu sayede, yalnızca en etkili özellikler modelde tutularak modelin etkinliği artırılır. Özellikle geniş ve karmaşık veri kümelerinde, RF algoritması yüksek doğrulukla

çalışabilir ve eksik veya gürültülü veriler içeren veri setleriyle başarılı bir şekilde başa çıkabilir. Bu özellikler, modelin geniş bir uygulama alanına sahip olmasını ve güvenilirliğini artırır (Langsetmo vd. 2023; Gori, Betti ve Melacci 2023).

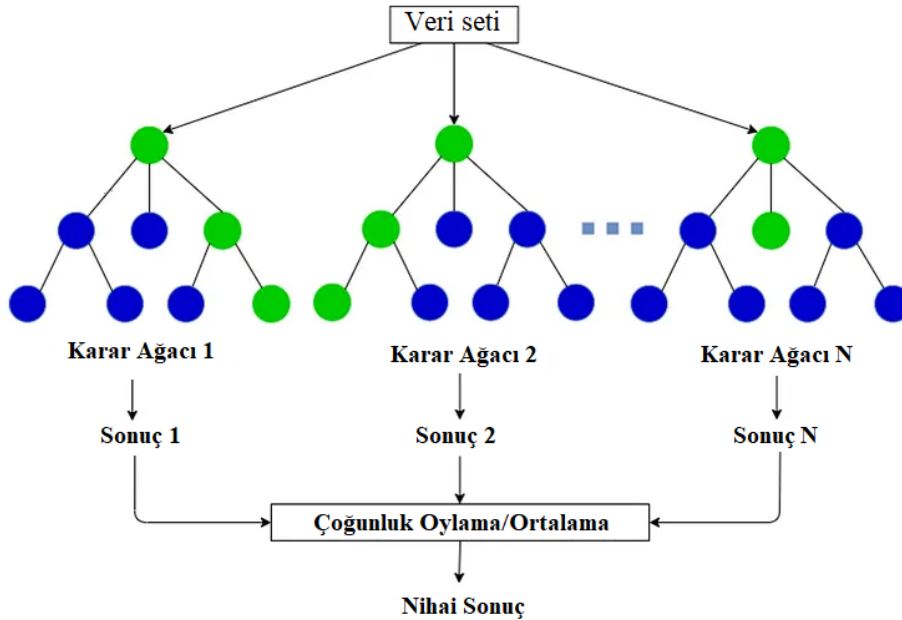
RF algoritması kullanarak $\hat{y}$ özelliğini ölçeklendirmek için denklem (3.9) kullanılmaktadır (Gori, Betti ve Melacci 2023).

$$\hat{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(x) \quad (3.9)$$

Burada:

- $\hat{y}$: Nihai tahmin değeri,
- $f_i(x)$: i-inci karar ağacının tahmini,
- N: Ağaç sayısı.

RF algoritması, enerji tüketimi öngörüsü gibi regresyon problemlerinde oldukça verimli bir tekniktir. Bu model, hem kısıtlı hem de geniş kapsamlı veri kümelerinde süratle işlem yapabilir ve girift bağlantıları çözümler. Özellikle veri içerisinde tutarsızlıklar veya kayıp değerler mevcut olduğunda dahi RF algoritması, tutarlı tahminler üretme noktasında yüksek bir başarı gösterir. Şekil 3.7, RF regresyon modelinin kavramsal düzenini sunmaktadır (Prince 2023). Model, çok sayıda karar ağacından meydana gelir ve bu ağaçların her biri eğitim verilerinin farklı bir bölümü üzerinde öğrenim görür. Tahmin sürecinde ise, tüm ağaçlardan elde edilen sonuçların ortalaması alınarak son çıktı belirlenir.



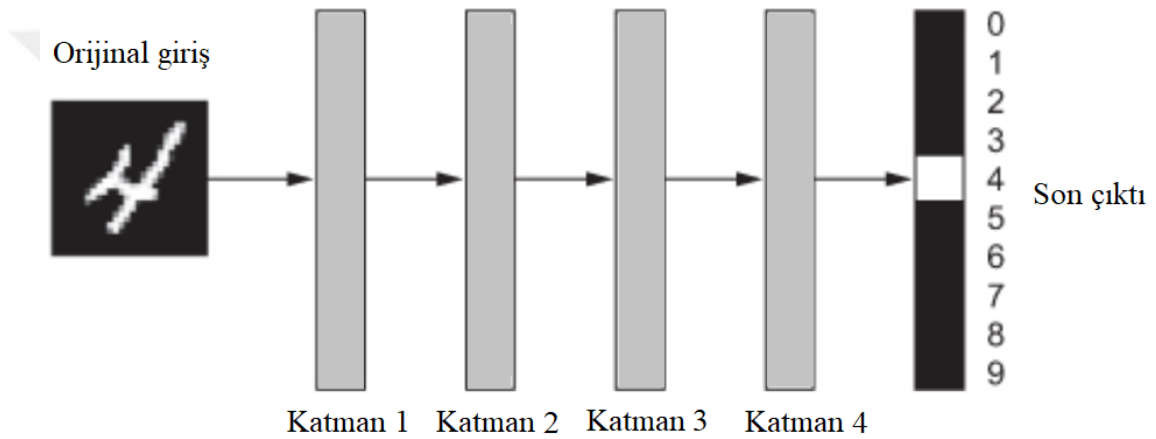
Şekil 3.7. Rastgele Orman regresyon modelinin şematik yapısı

Bu yaklaşım, enerji ihtiyacı öngörülerinin haricinde de pek çok farklı sektörde başarıyla uygulanmaktadır. Gerek yüksek doğruluk oranı gerekse uyarlanabilir yapısı

sayesinde, çeşitli endüstri kollarındaki tahminleme sorunlarına çözüm üretmektedir.

3.2.4. Derin öğrenme

Derin öğrenme, makine öğreniminin bir alt alanı olarak, verilerin gösterimlerini ardışık katmanlar aracılığıyla öğrenerek, daha derin bir anlayıştan ziyade modelin derinliğine vurgu yaparak kendini ayırır (Zhang vd. 2023). Şekil 3.8'te bir dönüşüm yığını olarak sıklıkla görselleştirilen bu katmanlı gösterimler, tipik olarak sinir ağları kullanılarak öğrenilir. Biyolojik olarak ilham alınmış isimlerine rağmen, sinir ağları temelde verilerden hiyerarşik özellikleri otomatik olarak çıkarmak için kullanılan matematiksel çerçevelerdir. Bir veya iki katmana odaklanan sığ öğrenme yaklaşımlarının aksine, modern derin öğrenme genellikle onlarca hatta yüzlerce katman kullanır ve bu da eğitim verilerinden giderek daha anlamlı gösterimlerin otomatik olarak keşfedilmesini sağlar (Prince 2023).



Şekil 3.8. Bir derin sinir ağının bir rakam görüntüsünü tanımak için katmanlar boyunca dönüşümü (Zhang vd. 2023; Prince 2023)

Derin öğrenme, yapay sinir ağlarının çok katmanlı mimariler kullanarak büyük veri setlerinden karmaşık örüntüleri otomatik olarak öğrenmesini sağlayan bir makine öğrenmesi alt dalıdır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, verilerdeki doğrusal olmayan ilişkileri yüksek doğrulukla modelleyebilir. Bu çalışmada, Herat şehrinin enerji tüketimini tahmini için İleri Beslemeli Sinir Ağları (FNN) ve Uzun Kısa Vadeli Bellek (LSTM) modelleri kullanılmıştır.

Enerji tüketimi tahmini, derin öğrenmenin en başarılı uygulama alanlarından biridir. Bunun temel nedenleri:

- Zaman serisi verilerindeki karmaşık desenleri yakalayabilme (günlük/mevsimsel dalgalanmalar)
- Çok sayıda değişken arasındaki etkileşimleri modelleyebilme (sıcaklık, nem, güneş radyasyonu vb.)
- Büyük ölçekli verilerle çalışabilme yeteneği

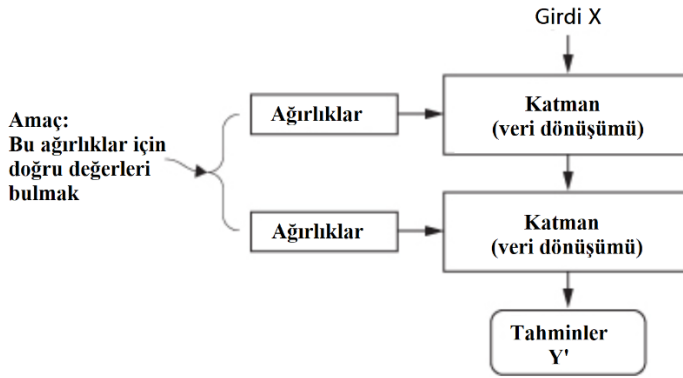
Bu çalışmada, 3 yıllık saatlik enerji tüketim ve meteorolojik veriler üzerinde eğitilen modeller, hem kısa vadeli (saatlik) hem de uzun vadeli (günlük/aylık) tahminler

yapabilmektedir.

İleri Beslemeli Sinir Ağları (Feedforward Neural Networks - FNN)

FNN, verinin katmanlar arasında tek yönlü (girdiden çıktıya) ilerlediği temel bir derin öğrenme modelidir. Bir FNN, girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıktı katmanından oluşur. Her bir katmandaki nöronlar, bir önceki katmandaki nöronlarla ağırlıklı bağlantılara sahiptir (Prince 2023).

İleri Beslemeli Sinir Ağları (FNN) bağlamında, bir katmanın girdi verisine ne yaptığı, özünde bir sayı kümesi olan katmanın ağırlıklarında saklanır (Mehrish vd. 2023). Teknik olarak, bir katmanın uyguladığı dönüşümün ağırlıkları tarafından parametrelendirildiği söylenir (Şekil 3.9). Bu bağlamda öğrenme, bir ağdaki tüm katmanların ağırlıkları için, ağın örnek girdileri ilişkili hedeflerine doğru bir şekilde eşleştireceği bir değerler kümesi bulmak anlamına gelir. Ancak şu bir gerçektir ki, derin bir sinir ağı on milyonlarca parametre içerebilir. Bunların hepsinin doğru değerini bulmak, özellikle bir parametrenin değerini değiştirmenin diğer tüm parametrelerin davranışını etkileyeceği göz önüne alındığında, göz korkutucu bir görev gibi görünebilir.



Şekil 3.9. FNN modelinde katmanlı veri işleme akışı (Zhang vd. 2023)

Bu çalışmada FNN, enerji tüketimi ile meteorolojik değişkenler (sıcaklık, nem, güneş radyasyonu vb.) arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için kullanılmıştır. FNN algoritması kullanarak çıktısı ölçeklendirmek için aşağıdaki denklem (3.10), (3.11) ve (3.12) kullanılmaktadır (Zhang vd. 2023; Prince 2023).

$$h_i = \sigma \left(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + b_i \right) \quad (3.10)$$

$$h_k^{(l)} = \sigma \left(\sum_j w_{jk}^{(l)} h_i^{(l-1)} + b_k^{(l)} \right) \quad (3.11)$$

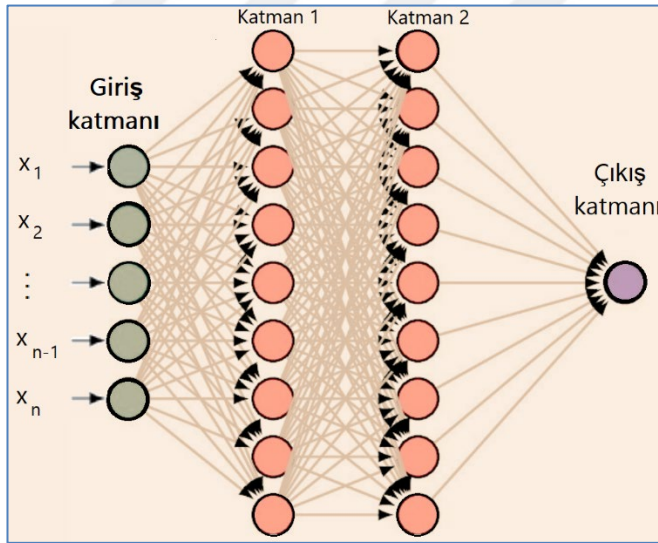
$$\hat{y} = \sigma_{out} \left(\sum_k w_k h_k + b_{out} \right) \quad (3.12)$$

Burada:

- x_i : Girdi özellikleri,
- w_{ij} : Girdi ile gizli katman arasındaki ağırlıklar,
- b_j : Bias terimi,
- σ : Aktivasyon fonksiyonu.
- σ_{out} : Çıktı katmanını aktivasyon fonksiyonu
- h_i : Girdi katmanından gizli katmana geçişi
- $h_k^{(l)}$: Gizli katmanlar arası geçişi
- $\hat{y}$: Çıktı katmanı

İleri beslemeli sinir ağı, verilerin girdi katmanından çıktı katmanına doğru tek yönlü ilerlediği temel bir yapay sinir ağı modelidir (Prince 2023). Şekil 3.10'da gösterilen mimaride, model n adet girdi değişkenini ($X_1, X_2, \dots, X_n$) alarak iki temel işlem katmanından geçirir:

- Girdi katmanı ile veriyi alır,
- Bir veya daha fazla gizli katman ile doğrusal olmayan dönüşümler uygular,
- Çıktı katmanını ile nihai tahmini üretir.



Şekil 3.10. İleri beslemeli sinir ağı temel mimarisi

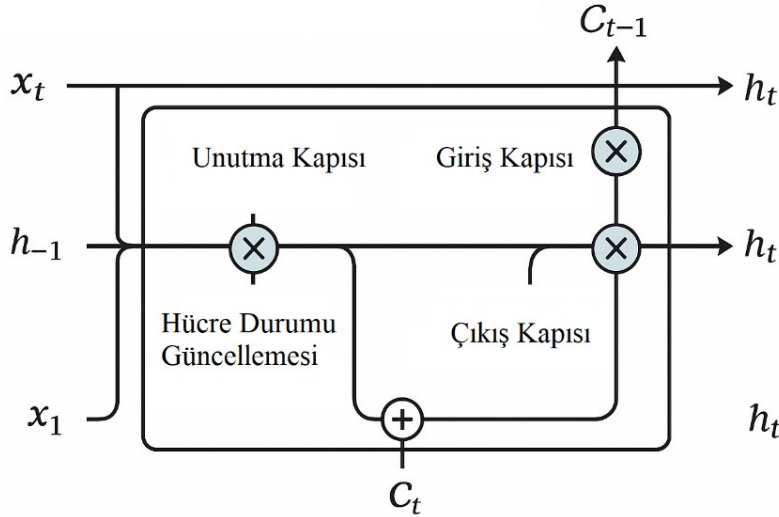
Şekil 3.10'daki iki katmanlı basitleştirilmiş gösterim, ağırlık optimizasyonu ve veri akışının temel mantığını anlatmak amacıyla sunulmuştur. Pratik uygulamalarda, problem karmaşıklığına göre katman sayısı ve nöron sayıları esnek şekilde artırılabilir. Bu mimari, özellikle regresyon problemlerinde girdi-çıkı ilişkilerini modellemek için etkili bir çerçeve sunmaktadır.

Uzun Kısa Vadeli Bellek (Long Short-Term Memory – LSTM)

Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), sıralı verilerdeki uzun mesafeli bağımlılıkları modellemek ve öğrenmek için tasarlanmış özel bir Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN) mimarisidir (Shiri vd. 2023). Zaman içinde kaybolan veya patlayan gradyanlardan muzdarip olan geleneksel RNN'lerin aksine, LSTM'ler bilgiyi seçici olarak saklamak ve unutmak için bir bellek hücresi ve kapı mekanizmaları kullanır. Bu durum, onları özellikle zaman serisi tahmini, doğal dil işleme ve zaman içindeki bağlamın çok önemli olduğu diğer sıralı modelleme görevlerinde etkili kılar.

Bir LSTM ağının kalbi, LSTM'ye geçmişini hatırlayabilmesi için biraz bellek sağlayan hücresi veya hücre durumudur. Şekil 3.11 LSTM hücresinin iç yapısını göstermektedir (Zhang vd. 2023). Hücre dört ana bileşenden oluşur:

- Unutma Kapısı (Forget Gate): Önceki hücre durumu C_{t-1} 'nin hangi kısmının unutulacağını, mevcut giriş x_t ve önceki gizli durum h_{t-1} üzerinden belirler.
- Giriş Kapısı (Input Gate): Hücre durumuna hangi yeni bilgilerin ekleneceğini düzenler. Bu adımda sigmoid aktivasyon ile giriş kontrolü yapılırken, tanh aktivasyonu ile aday hücre değeri $\tilde{C}_t$ üretilir.
- Hücre Durumu Güncellemesi: Unutma ve giriş kapılarının çıktıları birleştirilerek yeni hücre durumu C_t elde edilir.
- Çıkış Kapısı (Output Gate): Güncellenen hücre durumundan yeni gizli durum h_t 'yi üretir. Tanh aktivasyonu uygulanarak hücre durumu filtrelenir ve çıkış kapısının çıktısı ile çarpılır.



Şekil 3.11. Bir LSTM hücresinin genel yapısı

LSTM Hücresinde Kullanılan Sembolleri:

- x_1 : Zaman serisinin birinci zaman adımıdaki ($t = 1$) giriş vektörü. Girdi dizisinin ilk öğesini temsil eder.
- x_t : Zaman adımıdaki giriş verisi. Örneğin, bir zaman serisinin o ana ait değeri olabilir.
- h_{t-1} : Bir önceki zaman adımından gelen gizli (hidden) durum.

- h_t : Mevcut zaman adımında LSTM hücresinden çıkan gizli durum. Modelin bu adımdaki çıktısı olarak düşünülebilir.
- C_{t-1} : Önceki zaman adımındaki hücre durumu (cell state). Uzun vadeli belleği temsil eder.
- C_t : Güncellenmiş hücre durumu.
- $\tilde{C}_t$: Giriş kapısının oluşturduğu aday hücre durumu. Tanh aktivasyonu ile oluşturulur ve yeni bilgi olarak hücreye eklenmeye adaydır.

Şekil 3.11’de bileşenler arasındaki veri akışı oklarla gösterilmiştir. Bu yapı, LSTM nin uzun süreli zaman bağımlılıklarını öğrenmesine ve önemli bilgileri korumasına olanak tanır. Bu tez çalışmasında LSTM, enerji tüketimi ile meteorolojik değişkenler (sıcaklık, nem, güneş radyasyonu vb.) arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için kullanılmıştır. LSTM algoritması kullanarak çıktısı ölçeklendirmek için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

Unutma Kapısını (Forget Gate) ölçeklendirmek için aşağıdaki denklem (3.13) kullanılmaktadır (Prince 2023; Zhang vd. 2023).

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (3.13)$$

Burada:

- f_t : Unutma kapısı çıktısı (0-1 arası değerler)
- W_f : Unutma kapısı ağırlık matrisi
- h_{t-1} : Önceki zaman adımının gizli durumu
- x_t : Mevcut zaman adımını girdisi
- b_f : Unutma kapısı bias terimi
- σ : Sigmoid aktivasyon fonksiyonu

Girdi Kapısını (Input Gate) ölçeklendirmek için aşağıdaki denklem (3.14) ve (3.15) kullanılmaktadır (Zhang vd. 2023; Prince 2023).

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (3.14)$$

Burada:

- i_t : Hangi bilginin güncelleneceğini belirleyen kapı
- W_i : Girdi kapısı ağırlık matrisi
- b_i : Girdi kapısı bias terimi

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (3.15)$$

Burada:

- $\tilde{C}_t$: Yeni aday bellek değerleri

- W_c : Hücre durumu ağırlık matrisi
- b_c : Hücre durumu bias terimi
- $\tanh$: Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu

Hücre Durum Güncellemesini ölçeklendirmek için aşağıdaki denklem (3.16) kullanılmaktadır (Prince 2023; Zhang vd. 2023).

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \quad (3.16)$$

Burada:

- C_t : Yeni hücre durumu
- $\odot$: Eleman-bazlı çarpım
- C_{t-1} : Önceki hücre durumu

Çıktı Kapısını (Output Gate) ölçeklendirmek için aşağıdaki denklem (3.17) ve (3.18) kullanılmaktadır (Zhang vd. 2023; Prince 2023).

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (3.17)$$

Burada:

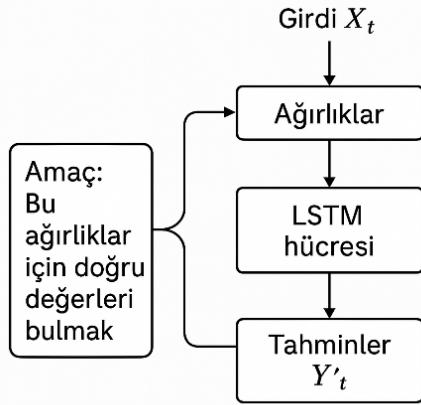
- o_t : Çıktı kapısı değeri
- W_o : Çıktı kapısı ağırlık matrisi
- b_o : Çıktı kapısı bias terimi

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (3.18)$$

Burada:

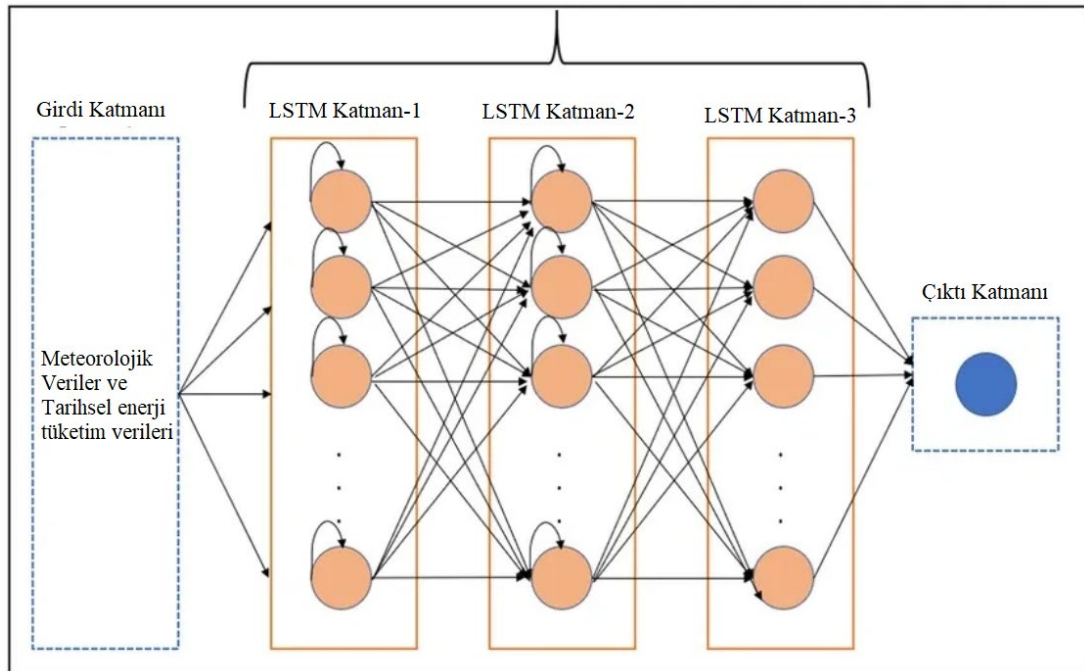
- h_t : Gizli durum çıktısı
- $\tanh(C_t)$: Normalize edilmiş hücre durumu

LSTM modelleri, zaman serisi verilerindeki zamansal bağımlılıkları öğrenmede etkili derin öğrenme yaklaşımlarından biridir. Şekil 3.12’de, bir LSTM hücresine dayalı tahmin modelinin temel işleyişi şematik olarak gösterilmektedir (Zhang vd. 2023). Modelin girişinde, zamanın t anındaki veri girişi X_t , belirli ağırlıklar aracılığıyla LSTM hücresine aktarılır. Bu hücre, geçmiş bilgileri ve mevcut girdi verisini işleyerek tahmin çıktısı Y_t üretir. Modelin ana amacı, tahmin doğruluğunu artırmak için bu ağırlıkların en uygun değerlerini öğrenmektir. Bu yapı, özellikle enerji tüketim tahmini gibi ardışık veri içeren problemler için oldukça etkilidir.



Şekil 3.12. LSTM tabanlı tahmin modelinin temel yapısı

Bu tez çalışmasında kullanılan LSTM tabanlı derin öğrenme modeli, Şekil 3.13'de şematik olarak gösterilen esnek ve ölçeklenebilir bir mimariye sahiptir. Modelin temel yapısı, girdi katmanını takip eden çok sayıda LSTM katmanından (genellikle 2-5 katman) ve bir çıktı katmanından oluşmaktadır. Girdi katmanı, meteorolojik veriler (sıcaklık, nem, güneş radyasyonu vb.), tarihsel enerji tüketim verileri ve zamansal özellikleri (saat, gün, tatil bilgileri) olarak işleme hazır hale getirir. Ardışık LSTM katmanları, verilerdeki karmaşık zaman serisi örüntülerini hiyerarşik olarak öğrenir; ilk katmanlar kısa vadeli, sonraki katmanlar ise uzun vadeli bağımlılıkları yakalar. Katman sayısı ve birim sayıları, problem karmaşıklığına göre optimize edilebilir (örn., 64-32-16 birimli 3 katman veya 128-64-32-16 birimli 4 katman). Çıktı katmanı, tüm bu öğrenilen özellikleri birleştirerek Herat şehrinin saatlik enerji tüketim tahminini üretir. Modelde her LSTM katmanı Adam optimizier ile etkin bir eğitim süreci yürütülmüştür.



Şekil 3.13. Enerji tahmin sistemi için LSTM modeli şeması

3.2.5. Model değerlendirme kriterleri

Sınırlı veriyle modellerin tahmin doğruluğunu ve uyumunu değerlendirmek için; hem genel hatayı hem de enerji tüketimi tahmini için model güvenilirliğini yakaladıklarından ortalama mutlak hata (MAE), ortalama kare hata (MSE) ve R^2 performans metrikleri olarak seçilmiştir.

Ortalama Mutlak Hata (MAE): Tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki ortalama mutlak farkı ölçer (3.19).

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.19)$$

Burada y_i gerçek değer, $\hat{y}_i$ tahmin edilen değer ve n gözlem sayısıdır.

Ortalama Kare Hata (MSE): Daha büyük hataları daha ağır bir şekilde cezalandırarak, model performansının daha hassas bir ölçütünü sağlar (3.20).

$$MSE = 1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.20)$$

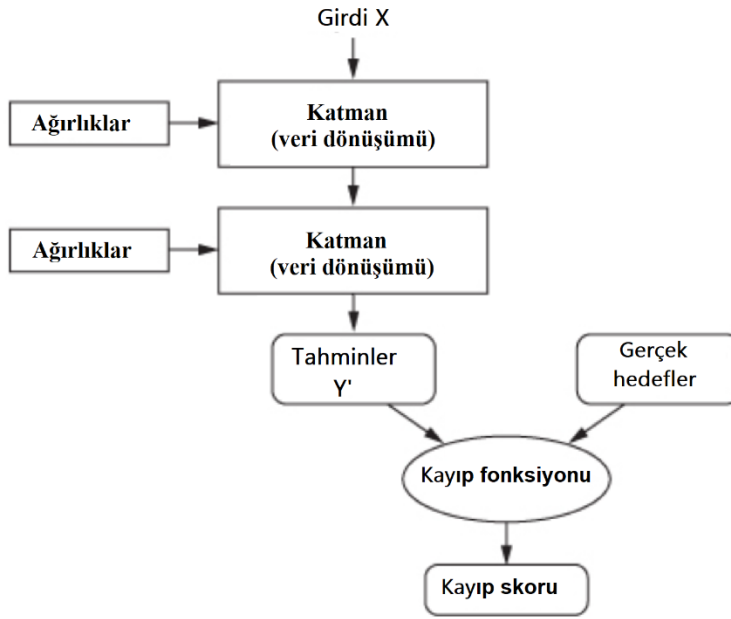
Büyük hataları daha ağır şekilde cezalandıran, özellikle modelin ne kadar iyi genelleştirildiğini değerlendirmek için kullanışlı hale getiren bir yöntemdir.

R^2 Skoru (Determinasyon Katsayısı): Model tarafından açıklanan bağımlı değişken (enerji tüketimi) içindeki varyansın oranını temsil eder (3.21).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.21)$$

Burada $\bar{y}$ gerçek değerlerin ortalamasıdır. Bu ölçüm, bağımlı değişkendeki varyansın model tarafından açıklanan oranını yansıtır ve 1'e yakın değerler daha iyi uyumu gösterir.

Yapay zeka modellerinin kontrolünde, ilk adım çıktının ne kadar beklentiden uzak olduğunu ölçmektir. Bu ölçümü sağlayan yapı, kayıp fonksiyonu (loss function) veya amaç fonksiyonu (objective function) olarak adlandırılır. Şekil 3.14'de gösterildiği gibi, bu fonksiyon ağı tahminlerini ve gerçek hedef değerleri alarak, ağı belirli bir örnek üzerindeki performansını sayısal bir uzaklık skoruyla ifade eder.

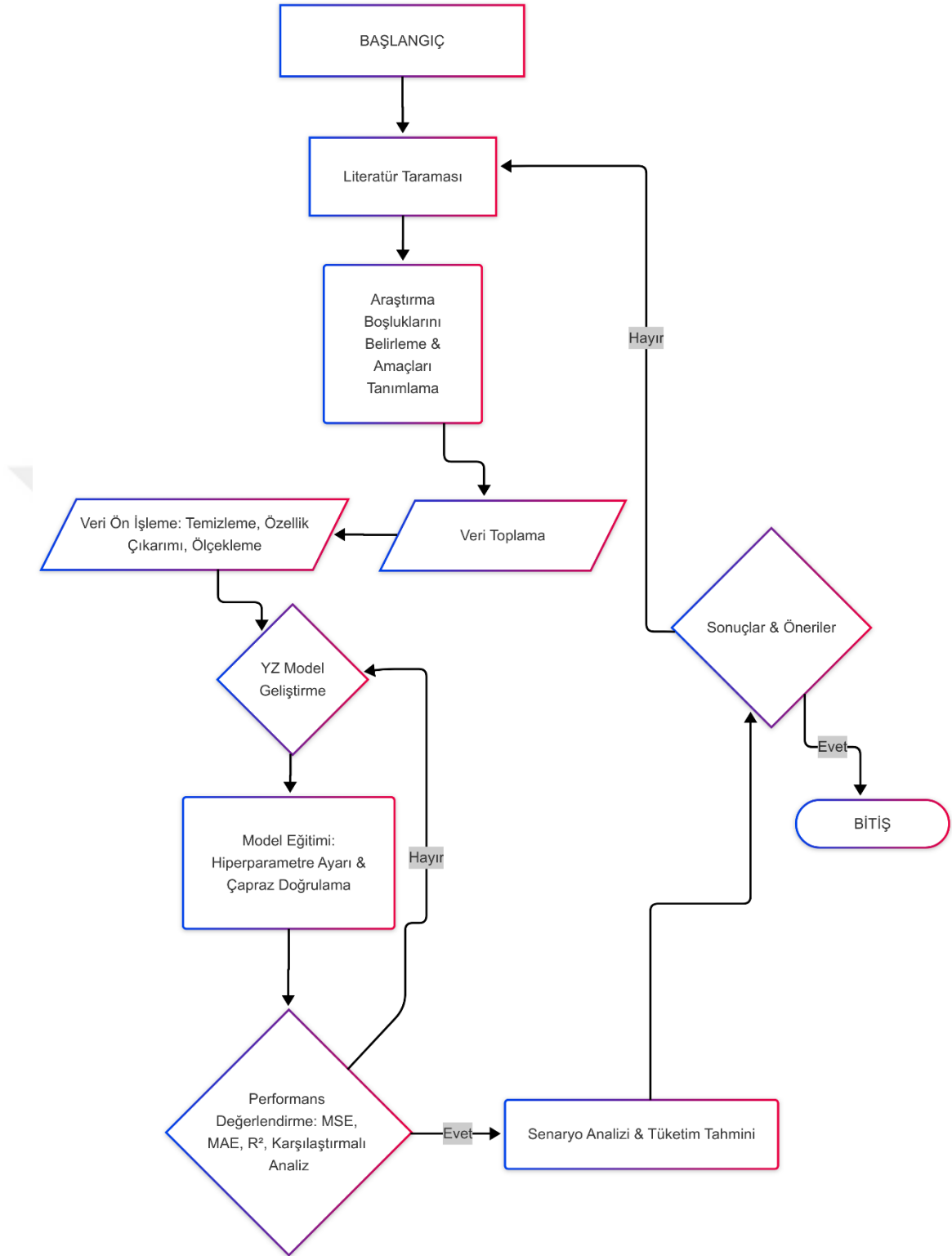


Şekil 3.14. Kayıp fonksiyonu; ağırlık tahminleri ile gerçek hedef arasındaki mesafeyi ölçme

Herat Şehri enerji tüketimi tahmini için optimum değerler elde etmek üzere, bu ölçütleri azaltan modellere öncelik verilmiş ve bu da doğruluk ve güvenilirliği artırmıştır. Kısıtlı veri setinin olması, Herat Şehri için uygun bir enerji tüketimi tahmin modeli geliştirmeye yönelik birçok engelle karşılaşmıştır. Modelin eğitim verilerine aşırı uyum sağlama (overfitting) riski, önemli bir endişe kaynağı olmuştur. Başlangıçtaki model mimarisinin, verilerdeki karmaşık kalıpları yeterince yakalayamayacak kadar basit olması durumunda yetersiz öğrenme (underfitting) meydana gelebilmektedir. Enerji tüketimi verilerindeki zamansal bağımlılıklar, sıralı bilgileri işleyebilen bir model gerektirmektedir.

3.3. Yapay Zeka Çalışmasının Metodolojisi

Bu kısımda Afganistan'ın Herat şehrinin sürdürülebilir enerji potansiyelini araştırmak için bu tez çalışmasında kullanılan araştırma metodolojisi açıklanmaktadır. Tez çalışmasının metodolojisi, Şekil 3.15'de gösterilen çerçevede veri toplama, veri ön işleme, özellik mühendisliği ve gelişmiş makine öğrenmesi tekniklerinin uygulanmasını içeren kapsamlı bir yaklaşımı içermektedir. Böylelikle bu tez çalışması ile geçmiş elektrik tüketimi verileri ve meteorolojik parametreler kullanılarak, enerji tüketimi için doğru tahmin modelleri geliştirilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu için fırsatların belirlenmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 3.15. YZ tabanlı enerji tüketimi tahmin modelinin akış şeması

3.3.1. Veri toplama

Burada, çalışmada kullanılan veri toplama süreci açıklanmaktadır. Birincil odak noktası, Afganistan'ın Herat şehrindeki elektrik tüketimi ve meteorolojik faktörler hakkında doğru ve güvenilir veriler elde etmektir.

Elektrik Tüketim Verileri

Bu tez çalışmasında kullanılan elektrik tüketimi verilerinin birincil kaynağı, Afganistan Ulusal Elektrik İdaresi (DABS), Herat Şehir Şubesi'dir. Bu veri seti, Mart 2021'den Mart 2024'e kadar saatlik elektrik tüketim modellerini içermektedir (Çizelge 3.2). Ulusal elektrik şirketi olarak DABS, Afganistan genelinde elektrik üretimi, dağıtımı ve iletimi konusunda kapsamlı bir kapsama alanı sunarak verilerin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamaktadır. Burada;

Saatlik elektrik tüketimi: Analizde kullanılan birincil değişkendir, her saatte tüketilen elektriği temsil eder.

Çizelge 3.2. Üç yıllık saatlik enerji tüketimi (maksimum) (DABS 2024)

No.	Zaman	Tüketim (MW)
0	2021-03-21 00:00:00	39,9
1	2021-03-21 01:00:00	31,4
2	2021-03-21 02:00:00	28,0
3	2021-03-21 03:00:00	27,1
4	2021-03-21 04:00:00	29,3
...	...	...
...	...	...
26276	2024-03-19 19:00:00	58,6
26277	2024-03-19 20:00:00	61,6
26278	2024-03-19 21:00:00	54,1
26279	2024-03-19 22:00:00	52,4
26280	2024-03-19 23:00:00	45,4
[26280 satır x 2 sütun]		

Hava Durumu Verileri

Elektrik tüketimi verilerini tamamlamak için, hava durumu verileri, uzmanlaşmış bir hava durumu veri sağlayıcısı olan Visual Crossing'den temin edilmiştir. Visual Crossing, önde gelen bir meteoroloji veri sağlayıcısı olarak, bu çalışmada kullanılan verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamaktadır. Elektrik tüketimi verileriyle aynı

döneme ait saatlik meteorolojik verileri içeren bu veri seti, Çizelge 3.3'de gösterildiği gibidir. Bu veriler;

- Güneş Radyasyonu: Bu veriler, bölgedeki güneş enerjisi potansiyelini değerlendirmek için çok önemlidir.
- Sıcaklık: Sıcaklık verileri, iklim koşullarının enerji tüketimi üzerindeki etkisini anlamaya yardımcı olur.
- Nem: Nem verileri, havanın nem içeriği hakkında bilgi sağlayarak enerji tüketim modellerini etkiler.
- Çiy Noktası: Çiy noktası verileri, yoğuşma ve sis potansiyelini anlamaya yardımcı olur, bu da enerji tüketimini ve yenilenebilir enerji üretimine etki edebilir.
- Rüzgar Hızı: Rüzgar hızı verileri, rüzgar enerjisi projelerinin fizibilitesini değerlendirmek için gereklidir.
- Yağış: Yağış verileri, yağışın enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji üretimi üzerindeki etkisine dair bilgiler sağlar.

Çizelge 3.3. Üç yıllık saatlik hava durumu verileri (Visual Crossing 2024)

No.	Zaman	SS No	Çiy (°C)	Nem (%)	Sıcaklık (°C)	Güneş rad. (W/m ²)	Rüzgar yönü (Derece)	Rüzgar hızı (km/saat)	Rüzgar esintisi (km/saat)	Deniz seviyesi basınç (hPa)
1	2021-03-21 00:00:00	1	8,4	81,8	11,4	0	320,8	5,4	11,5	1013
2	2021-03-21 01:00:00	2	7,6	87,3	9,6	0	306,8	4,3	11,2	1014
3	2021-03-21 02:00:00	3	7,3	85,0	9,7	0	308,9	2,5	10,1	1013
4	2021-03-21 03:00:00	4	6,3	86,6	8,4	0	297,7	1,1	9,7	1014
5	2021-03-21 04:00:00	5	5,4	86,0	7,6	0	86,1	0,7	9	1013
6	2021-03-21 05:00:00	6	5,6	84,8	8,0	0	95,8	3,6	9,4	1013
7	2021-03-21 06:00:00	7	2,0	86,8	4,0	0	95,2	5,4	9,7	1015
8	2021-03-21 07:00:00	8	5,0	76,0	9,0	0.1	93,3	3,6	10,1	1016
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Çizelge 3.3'ün devamı

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
26273	2024-03-19 16:00:00	17	0,0	16,6	27,6	596	199	30,2	29,5	1011
26274	2024-03-19 17:00:00	18	1,3	18,6	27,2	410	193,5	29,9	31,7	1010
26275	2024-03-19 18:00:00	19	2,0	21,5	25,6	211	190,6	28,4	42,5	1011
26276	2024-03-19 19:00:00	20	2,1	24,3	23,7	47	181,5	28,8	48,6	1011
26277	2024-03-19 20:00:00	21	2,0	25,6	22,7	0	177,8	30,2	55,8	1011
26278	2024-03-19 21:00:00	22	1,4	24,1	23,0	0	167,3	34,6	60,8	1011
26279	2024-03-19 22:00:00	23	1,1	23,2	23,3	0	167,3	37,8	64,8	1010
26280	2024-03-19 23:00:00	24	0,9	23,2	23,0	0	159,6	35,6	60,8	1010
[26280 satır x 10 sütun]										

Burada;

- Güneş Radyasyonu: W/m^2 cinsinden ölçülen bu değişken, Dünya yüzeyinde alınan güneş enerjisini nicel olarak ifade eder.
- Sıcaklık: $^{\circ}C$ cinsinden ölçülen bu değişken, hava sıcaklığını temsil eder.
- Nem (%): Bu değişken, havanın bağıl nemini temsil eder.
- Çiy Noktası ($^{\circ}C$): Bu değişken, havanın yoğunlaşma noktasını temsil eder.
- Rüzgar Hızı: $km/saat$ cinsinden ölçülen bu değişken, rüzgarın hızını gösterir.
- Yağış: mm cinsinden ölçülen bu değişken, yağış miktarını nicel olarak ifade eder.

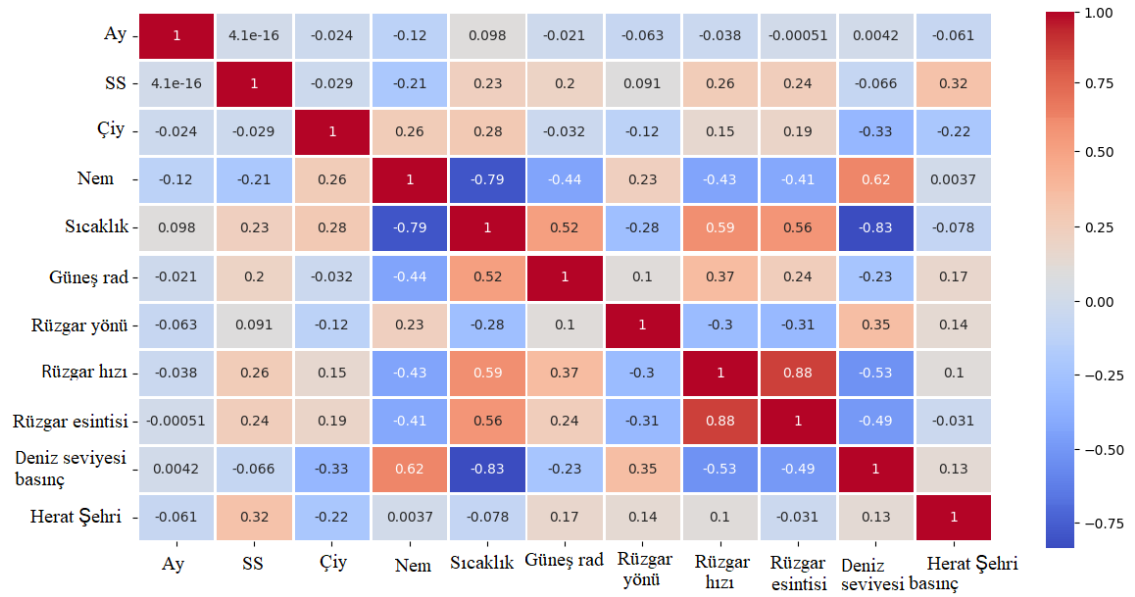
3.3.2. Veri ön işleme

Verilerin kalitesi ve güvenilirliğini sağlamak için, çeşitli ön işleme adımları gerçekleştirilmiştir:

- Veri Temizleme: Aykırı değerler ve eksik değerler, veri doldurma veya kaldırma gibi uygun teknikler kullanılarak tespit edilmiş ve ele alınmıştır.

- Veri Normalizasyonu: Sayısal değişkenler, ortak bir ölçeğe normalize edilerek makine öğrenmesi modellerinin performansı artırılmıştır.
- Özellik Mühendisliği: Ham verilerden, model performansını artırmak için ilgili özellikler çıkarılmıştır. Örneğin, haftanın günü, ay ve tatil göstergeleri gibi zamana dayalı özellikler türetilmiştir.
- Korelasyon Analizi: Değişkenler arasındaki güçlü ve zayıf korelasyonları belirlemek için Pearson korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Bu bilgi, model eğitimi için en uygun özellikleri seçmek için kullanılmıştır.

Değişkenler arasındaki güçlü ve zayıf korelasyonları bulmak için, iki değişken arasındaki doğrusal bir ilişkinin gücünü ölçen Pearson korelasyon katsayısı kullanılmaktadır. Pearson korelasyon katsayısı kullanılarak, değişkenler arasındaki güçlü ve zayıf korelasyonlar belirlenmiştir. Şekil 3.16'daki ısı haritası, bağıl çiy noktası ile enerji tüketimi arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu gösterirken, güneş radyasyonu en çok negatif korele olan özelliiktir. Bu iki değişken ayrıca çoklu doğrusallık sergilemektedir, bu da bunlardan herhangi birinin tüketimi etkili bir şekilde tahmin etmesine izin vermektedir. Bu çalışmada veriler titizlikle ön işlenerek, geliştirilen modellerin doğruluğunun ve güvenilirliğinin artırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, Şekil 3.16'da yer alan ve enerji tüketimiyle en düşük korelasyona sahip olan değişkenleri analiz sürecine dahil edilmemiştir. Bu seçim, tahmin modellerinin hata oranlarını düşürmek ve genel performansı artırmak amacıyla yapılmıştır.

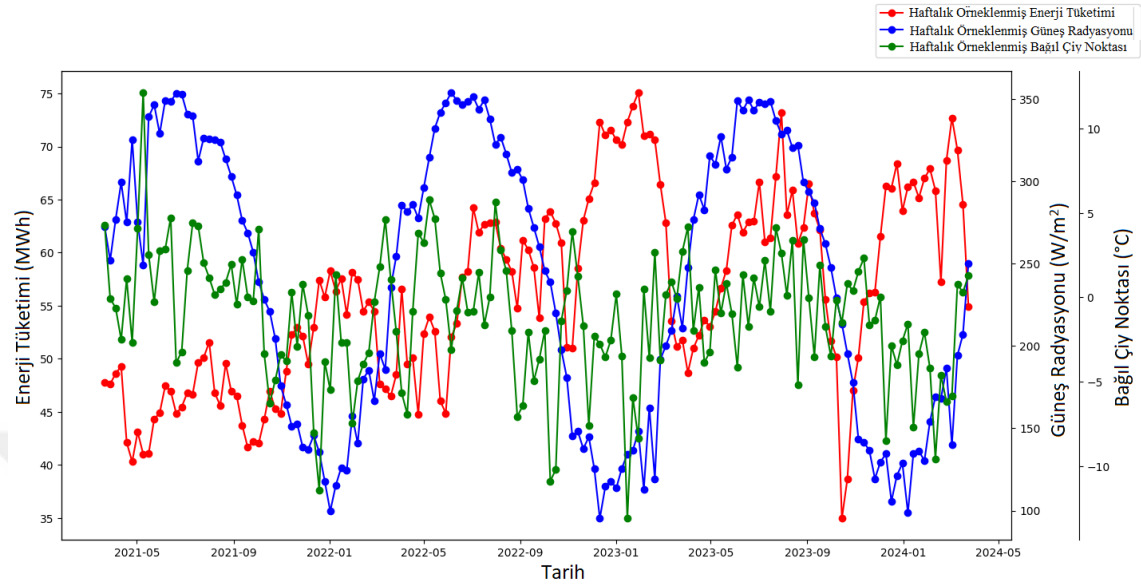


Şekil 3.16. Değişkenler arasındaki korelasyonların belirlenmesi

Değişkenlerin günlük ve mevsimsel eğilimleri

Şekil 3.17'de gösterilen grafik, 2021 yılı başından 2024 yılı ortalarına kadar uzanan bir dönem boyunca üç temel değişken olan enerji tüketimi (MWh), güneş radyasyonu (W/m^2) ve bağıl çiy noktası ($^{\circ}C$) için haftalık yeniden örneklenmiş eğilimleri göstermektedir. Analiz, bu değişkenler arasında enerji dinamiklerini ve çevresel

faktörlerle ilişkilerini anlamak için kritik olan belirgin mevsimsel ve zamansal kalıplar ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, enerji tüketimiyle zayıf korelasyona sahip değişkenler analize dahil edilmemiştir; bu sayede model performansı artırılmıştır.



Şekil 3.17. Enerji tüketimi, güneş radyasyonu ve bağıl çiy noktası eğilimleri

Şekil 3.17’den de görüldüğü üzere burada;

✓ *Enerji Tüketimi (Kırmızı Çizgi):*

Enerji tüketimi, mevsimsel değişimlerle uyumlu belirgin zirve ve çukurlar gösteren periyodik dalgalanmalar sergiler. Soğuk aylarda, muhtemelen artan ısıtma gereksinimlerinden dolayı, enerji tüketimi genellikle daha yüksektir. Tersine, sıcak aylarda tüketim, muhtemelen azalan ısıtma ihtiyaçları ve potansiyel olarak enerji verimliliği önlemleriyle dengelenerek, normal seyretme eğilimindedir. Eğilim, açık yıllık döngüler gösterir ve enerji tüketiminin mevsimsel hava koşullarına bağımlılığını vurgular.

✓ *Güneş Radyasyonu (Mavi Çizgi):*

Güneş radyasyonu, yaz aylarında (örneğin, yıl ortası zirveleri) daha yüksek yoğunluklar ve kış aylarında daha düşük seviyeler gözlemlenen karakteristik bir mevsimsel model sergiler. Güneş radyasyonunun periyodik doğası, güneşin konumu ve gün ışığı saatlerindeki mevsimsel değişikliklerle ilişkilidir. Özellikle, güneş radyasyonundaki zirveler, enerji tüketimiyle ters bir ilişki göstererek, yüksek kullanılabilirlik dönemlerinde güneş enerjisinin geleneksel enerji tüketimini dengelemek için kullanılma potansiyelini düşündürmektedir.

✓ *Bağıl Çiy Noktası (Yeşil Çizgi):*

Bağıl çiy noktası, enerji tüketimi ve güneş radyasyonuna kıyasla daha değişken bir model sergiler. Mevsimsel değişikliklerle bir miktar korelasyon göstermesine rağmen, enerji tüketimi üzerindeki etkisi daha az doğrudan görünmektedir. Daha yüksek çiy noktaları genellikle daha sıcak aylarda gözlenir, artan nem seviyelerini yansıtırken, daha

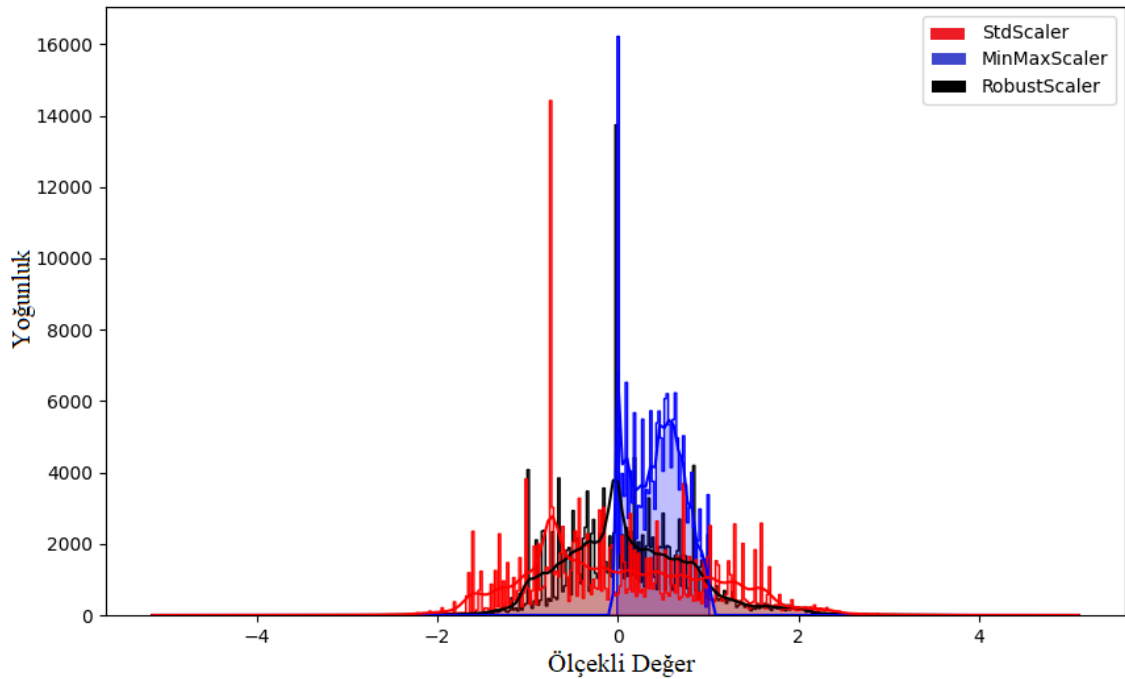
düşük değerler soğuk dönemlere hakimdir. Çiy noktasındaki değişimler, özellikle nemli koşullar altında yüksek soğutma ihtiyacı olan bölgelerde, dolaylı olarak enerji kullanımını etkileyebilir.

Şekil 3.17’de gösterildiği gibi örneğin, yaz aylarında güneş radyasyonu zirveleri, daha düşük enerji tüketimiyle çakışır, bu da güneş enerjisinin geleneksel enerji kaynaklarını tamamlamakta rol oynayabileceğini düşündürmektedir. Benzer şekilde, bağıl çiy noktasının enerji tüketimi üzerindeki etkisi, daha az belirgin olsa da nemin soğutma gereksinimleri üzerindeki etkisini yansıtabilir.

Bu eğilimler, enerji tüketimi tahmin modellerine mevsimsel ve çevresel değişkenlerin dahil edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Güneş radyasyonu, çiy noktası ve enerji tüketimi arasındaki dinamik ilişkilerin anlaşılması, YZ tabanlı tahmin modellerinin doğruluğunu artırabilir ve özellikle benzer iklim koşullarına sahip bölgelerde sürdürülebilir enerji yönetimi stratejilerini bilgilendirebilir.

Ölçeklendirme Tekniklerinin Karşılaştırması

Veri seti üzerinde farklı ölçeklendirme tekniklerinin etkisini değerlendirmek için, yaygın olarak kullanılan üç ölçeklendirme yöntemi olan StandardScaler, MinMaxScaler ve RobustScaler kullanılarak ölçeklenmiş özelliklerin karşılaştırmalı bir analizi gerçekleştirilmiştir. Ölçeklenmiş özelliklerin görsel karşılaştırması, Şekil 3.18’de gösterildiği gibi, dönüştürülen verilerin dağılımlarının çizdirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. Ölçeklenmiş özelliklerin karşılaştırılması

Şekil 3.18’deki grafik, ölçeklendirme davranışlarındaki farklılıkları vurgular; StandardScaler, ortalamayı çıkararak ve standart sapmaya göre ölçeklendirerek verileri sıfırın etrafında merkezler; MinMaxScaler, değerleri sabit bir aralıkta (0 ila 1) normalize

eder; ve RobustScaler, çeyrekler arası aralığa göre ölçeklendirerek aykırı değerlerin etkisini azaltır. Bu karşılaştırma, bu çalışmadaki makine öğrenmesi modelleri için en uygun ölçekleyicinin bilinçli bir şekilde seçilmesini sağlamak üzere, her bir ölçeklendirme yönteminin özelliklerini anlamak için kritik bir anlayış sağlar. Sonuç olarak, ölçekleyici seçimi, belirli veri özelliklerine ve modellerin özellik ölçeklemesi duyarlılığına bağlıdır.

Model Bazlı Ölçeklendirme Seçimi ve Gerekçesi

Bu tez çalışmasında, kullanılan makine öğrenimi modellerinin özelliklerine ve veri setinin yapısına bağlı olarak farklı ölçeklendirme yöntemleri tercih edilmiştir:

- Destek Vektör Makineleri (SVM) ve Rastgele Orman (RF) Modelleri: Bu modeller için, veri setinin aykırı değerlere karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla, StandardScaler, MinMaxScaler ve RobustScaler ölçeklendirme yöntemleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.
- İleri Beslemeli Sinir Ağları (FNN) Modeli: Bu model için, verilerin ortalama ve standart sapma ile ölçeklendirilmesi gerektiği göz önünde bulundurularak, StandardScaler ölçeklendirme yöntemi kullanılmıştır.
- Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) Modeli: Bu model için, verilerin 0 ile 1 arasında bir aralığa ölçeklendirilmesi gerektiği göz önünde bulundurularak, MinMaxScaler ölçeklendirme yöntemi kullanılmıştır.

Sonuç olarak, ölçekleyici seçimi, belirli veri özelliklerine, modellerin özellik ölçeklemesi duyarlılığına ve model tiplerine bağlıdır. Veri setinin incelenmesi ve farklı ölçeklendirme yöntemlerinin karşılaştırılması, her model için en uygun ölçekleyicinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamıştır.

3.3.3. Yapay zeka modeli

Enerji tüketimi verilerinin zaman serisi doğası ve Herat Şehri için sınırlı tarihsel veri kullanılabilirliği göz önüne alındığında, uygun makine öğrenmesi ve derin öğrenme modellerinin seçimi kritik önem taşımaktadır. Buna göre dikkat edilen birincil hususlar şu şekilde sıralanabilmektedir;

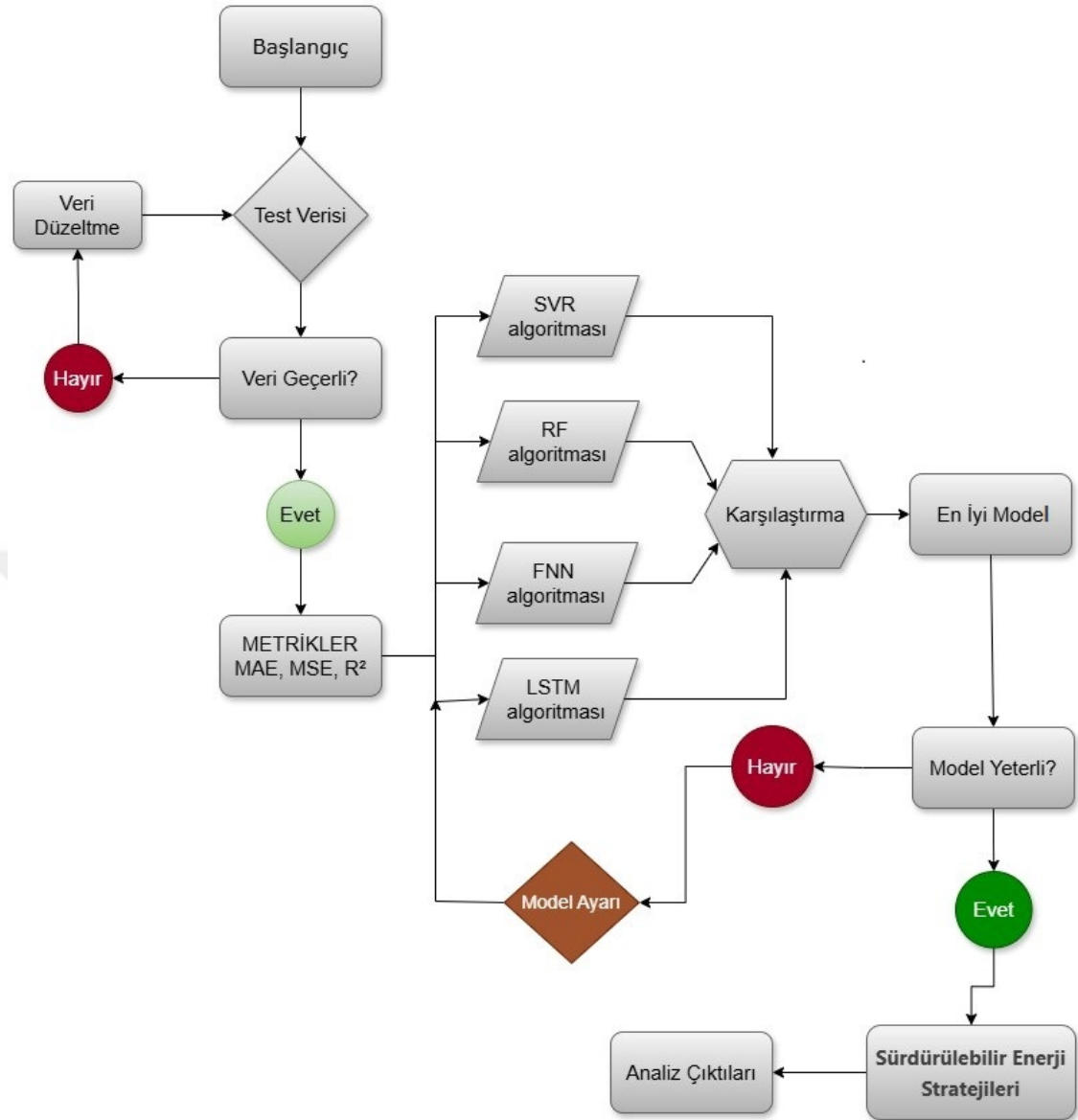
- Zamansal bağımlılıkları yakalama yeteneği: Modeller, enerji tüketimi verilerindeki içsel sıralı kalıpları ve eğilimleri etkin bir şekilde yakalayabilmelidir.
- Sınırlı veri ile performans: Modeller, aşırı öğrenmeyi (overfitting) minimize ederken, mevcut verilerden etkili bir şekilde öğrenme yeteneğine sahip olmalıdır; bu, sınırlı veri ile önemli bir husustur.
- Genelleme yeteneği: Modeller, görülmemiş veriler üzerinde gelecekteki enerji tüketimini doğru bir şekilde tahmin edebilmeli ve tahmin sonuçlarının güvenilirliğini sağlamalıdır.

Seçilen Modeller

Bu kriterlere dayanarak, değerlendirme için aşağıdaki modeller seçilmiştir:

- Destek Vektör Regresyonu (Support Vector Regression (SVR)): Yüksek boyutlu verilerle başa çıkma ve regresyon görevleri için optimum hiper düzlemleri bulma yeteneği ile bilinen güçlü bir makine öğrenmesi algoritmasıdır.
- Rastgele Orman Regresyonu (Random Forest (RF)): Tahmin doğruluğunu ve sağlamlığını artırmak için birden çok karar ağacını birleştiren bir topluluk öğrenme yöntemidir.
- İleri Beslemeli Sinir Ağı (Feedforward neural network (FNN)): Bu görev için derin öğrenme potansiyelini araştırmak üzere çoklu katmanlara sahip temel bir sinir ağı mimarisidir.
- Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory (LSTM)): Sıralı verilerle başa çıkmak üzere tasarlanmış bir tekrarlayan sinir ağı mimarisi olup, enerji tüketimindeki uzun vadeli bağımlılıkları yakalamak için oldukça uygundur.

Modellerin geliştirilmesi sürecinde, Herat Şehri'nin enerji tüketiminin karmaşık yapısını ve etkileyen faktörleri dikkate alan kapsamlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu bağlamda, her bir modelin (SVR, RF, FNN ve LSTM) mimarisi ve eğitim süreci, enerji tüketiminin kendine özgü özelliklerini yakalayacak şekilde titizlikle tasarlanmıştır. Bu kapsamlı yaklaşım, modellerin Herat Şehri'nin enerji tüketimine ilişkin zamansal (trendler, mevsimsellik, otokorelasyon) ve mekansal (dolaylı olarak meteorolojik veriler aracılığıyla) özelliklerini etkin bir şekilde temsil etmesine olanak sağlamıştır. Herat'ın enerji tahmini süreci Şekil 3.19'daki akış şemasında özetlenmiştir. Bu akış şeması, veri toplama aşamasından başlayarak politika önerilerine kadar tüm aşamaları kapsamaktadır.



Şekil 3.19. Herat Şehri enerji tahmini için model performans karşılaştırma ve seçim süreci

3.3.4. Performans testi

Bu tez çalışması kapsamında seçilen yapay zeka algoritmalarında kullanmak için öncelikle veri seti işlemleri oluşturulmuş ve model performans değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Burada;

Veri Hazırlama:

- **Veri Bölümü:** Ön işlenmiş veri seti, eğitim, doğrulama ve test setlerine bölünmüştür. Eğitim seti, modelleri eğitmek için; doğrulama seti, hiper parametre ayarlaması için; test seti ise nihai değerlendirme için kullanılmıştır.
- **Özellik Ölçeklendirme:** Model performansını ve kararlılığını artırmak için, giriş verilerine özellik ölçeklendirme uygulanmıştır.

Hiper parametre Ayarlaması:

Her modelin performansını optimize etmek için ızgara arama (grid search) ve rastgele arama teknikleri kullanılarak hiper parametre ayarlaması gerçekleştirilmiştir.

Aşağıdaki hiper parametreler her model için ayarlanmıştır:

- SVR: Kernel fonksiyonu, düzenleme parametresi (C), epsilon (ϵ), gamma (γ).
- RF: Ağaç sayısı, maksimum ağaç derinliği, yaprak başına minimum örnek sayısı, bölünme başına minimum örnek sayısı.
- İleri Beslemeli Sinir Ağı: Gizli katman sayısı, katman başına nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonları, öğrenme oranı, toplu işlem boyutu (batch size), epoch sayısı, kesme oranı (dropout rate).
- LSTM: LSTM katman sayısı, katman başına birim sayısı, kesme oranı (dropout rate), öğrenme oranı, toplu işlem boyutu (batch size), epoch sayısı.

Toplanan veri seti, eğitim ve test setlerine bölünmüştür. Tüm modeller, mevcut verilerin %80'i kullanılarak eğitilmiş ve kalan %20'si test için kullanılmıştır. Eğitim seti, seçilen modelleri eğitmek için kullanılırken, test seti, modellerin tanımadığı veriler üzerindeki performansını değerlendirmek için kullanılmıştır.

Modellerin performansını değerlendirmek için aşağıdaki değerlendirme metrikleri kullanılmıştır:

- Ortalama Mutlak Hata (MAE): Tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki hataların ortalama büyüklüğünü ölçer.
- Ortalama Kare Hata (MSE): Tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki ortalama kare farkını hesaplar.
- R-kare (R^2): Bağımlı değişkendeki varyansın, model tarafından açıklanan kısmını gösterir.

Bu tez çalışmasında; bu modelleri dikkatlice seçerek ve uygulayarak, Herat Şehri'nde enerji tüketimini doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin etmek için en etkili yaklaşımın belirlenmesi amaçlanmıştır.

3.3.5. Enerji tüketimi tahmini

Enerji tüketimi tahmin süreci, çeşitli kritik değişkenleri ve etkileyen faktörleri içermektedir:

- Geçmiş Enerji Kullanımı: Gelecekteki tüketimin tahminlerini bilgilendirmek ve kalıpları belirlemek için önceki elektrik tüketimine ilişkin veriler kullanılmıştır.
- Meteorolojik Koşullar: Sıcaklık, nem, güneş radyasyonu, rüzgar hızı ve yağış gibi iklimsel değişkenler, enerji kullanımına olan önemli etkileri nedeniyle incelenmiştir.
- Zamansal Özellikler: Günün saati, haftanın günleri ve mevsimsel döngüler dahil olmak üzere zamanla ilgili faktörler, tüketim davranışları üzerindeki etkilerini anlamak için analiz edilmiştir.

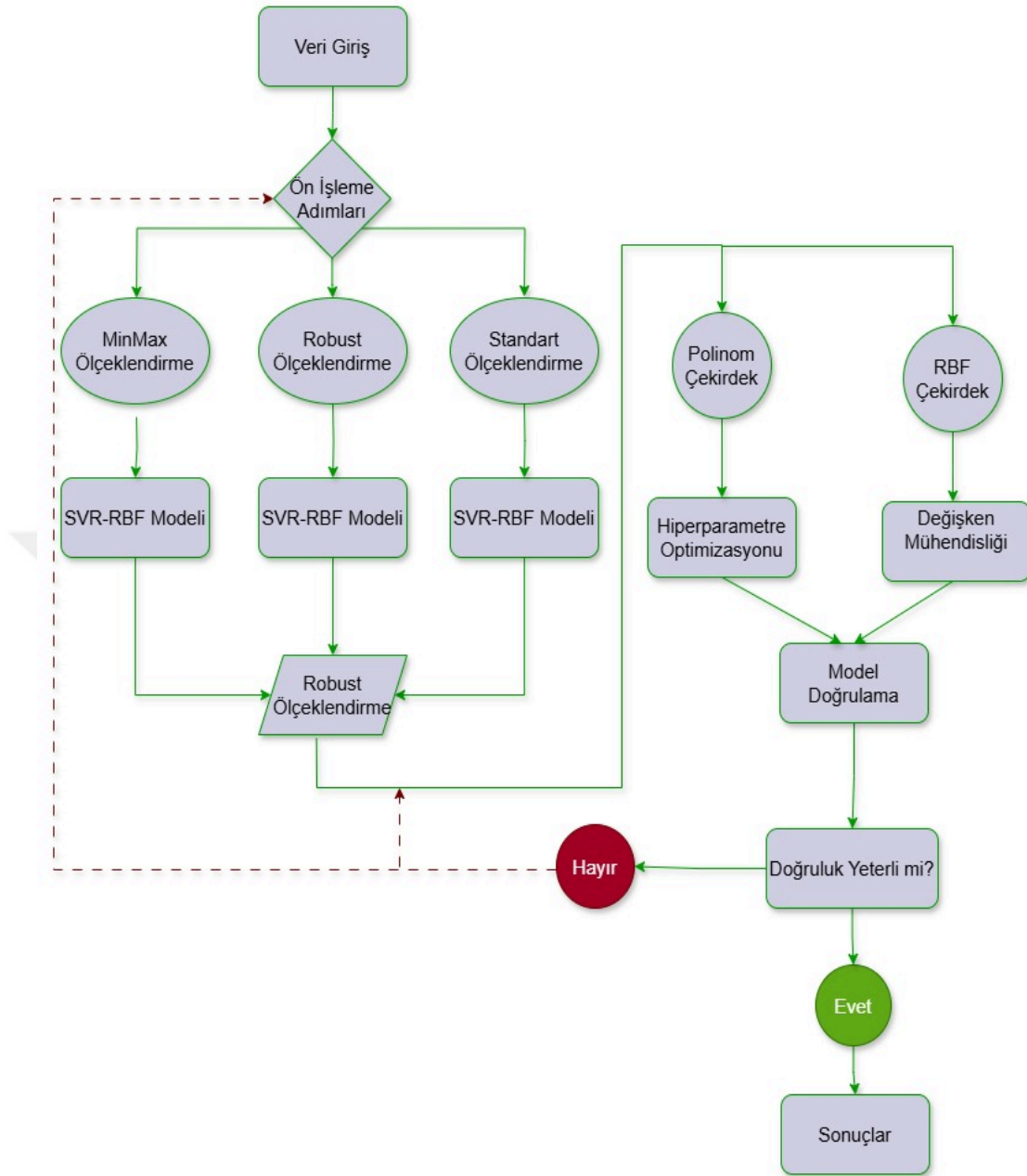
Sağlam ve kapsamlı bir analiz sağlamak için, enerji tüketiminin hem zamansal hem de mekansal yönleri dikkatlice incelenmiştir. Bu boyutlar, farklı zaman ölçekleri ve coğrafi bağlamlarda enerji kullanımındaki değişimleri yakalamada kritik bir rol oynamaktadır.

- **Zamansal Ayrıntılılık:** Hem anlık hem de uzun vadeli tüketim eğilimlerini yakalamak için, saatlik, günlük, haftalık ve aylık aralıklar gibi çoklu zaman ölçekleri kapsamında analiz gerçekleştirilmiştir.
- **Mekânsal Kapsam:** Herat'ın toplam enerji tüketim dinamiklerine odaklanarak şehir genelinde bir perspektif benimsenmiştir.
- **Zaman Serisi Yöntemleri:** Verilerdeki tekrarlayan kalıpları, uzun vadeli eğilimleri ve periyodik dalgalanmaları belirlemek için gelişmiş zaman serisi analizi teknikleri uygulanmıştır.

Bu kapsamlı yaklaşım, modellerin Herat Şehri'nin enerji tüketimine ilişkin zamansal ve mekansal özelliklerini etkin bir şekilde temsil etmesine olanak sağlamıştır. Enerji tahmini için kullanılan her bir modelin kendine özgü adımlarını ve süreçlerini detaylandıran akış şemaları ayrı ayrı sunulmuştur. Bu akış şemaları ile de her bir modelin veri işleme, eğitim ve tahmin aşamalarındaki farklılıkları ve özel yapıları görsel olarak da açıklanmıştır.

SVR algoritması ile Enerji Tüketimi Tahmini Metodolojisi

Bu tez çalışmasının metodolojisi çerçevesinde, Herat Şehri'nde enerji tüketimi tahmini için Destek Vektör Regresyonu (SVR) algoritması detaylı bir şekilde incelenmiştir. SVR modelinin tahmin yeteneğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla, farklı veri ön işleme teknikleri uygulanmış ve çeşitli kernel fonksiyonları sistematik olarak denenmiştir. SVR modelinin bu performans optimizasyon sürecinin aşamaları, Şekil 3.20'de sunulmuştur.



Şekil 3.20. SVR model optimizasyon süreci

SVR modelinin akış şemasını (Şekil 3.20) takiben, süreç girdi özelliklerini Radyal Taban Fonksiyonu (RBF) çekirdeğini kullanan SVR modeline hazırlamak için çeşitli veri ölçeklendirme tekniklerinin, özellikle Min-Max ölçeklendirme, Robust ölçeklendirme ve Standart ölçeklendirmenin uygulanmasıyla başlar. Ölçeklendirilmiş her veri seti, ayrı bir SVR-RBF modeli eğitmek için kullanılır. Akış şeması, Robust ölçeklendirme ile eğitilen modellerin performansının değerlendirildiği bir geri bildirim döngüsünü göstermektedir. Performans tatmin edici değilse ("Hayır"), süreç potansiyel daha fazla ayarlama veya farklı ön işleme stratejilerinin keşfi için "Ön İşleme Adımları"na geri döner.

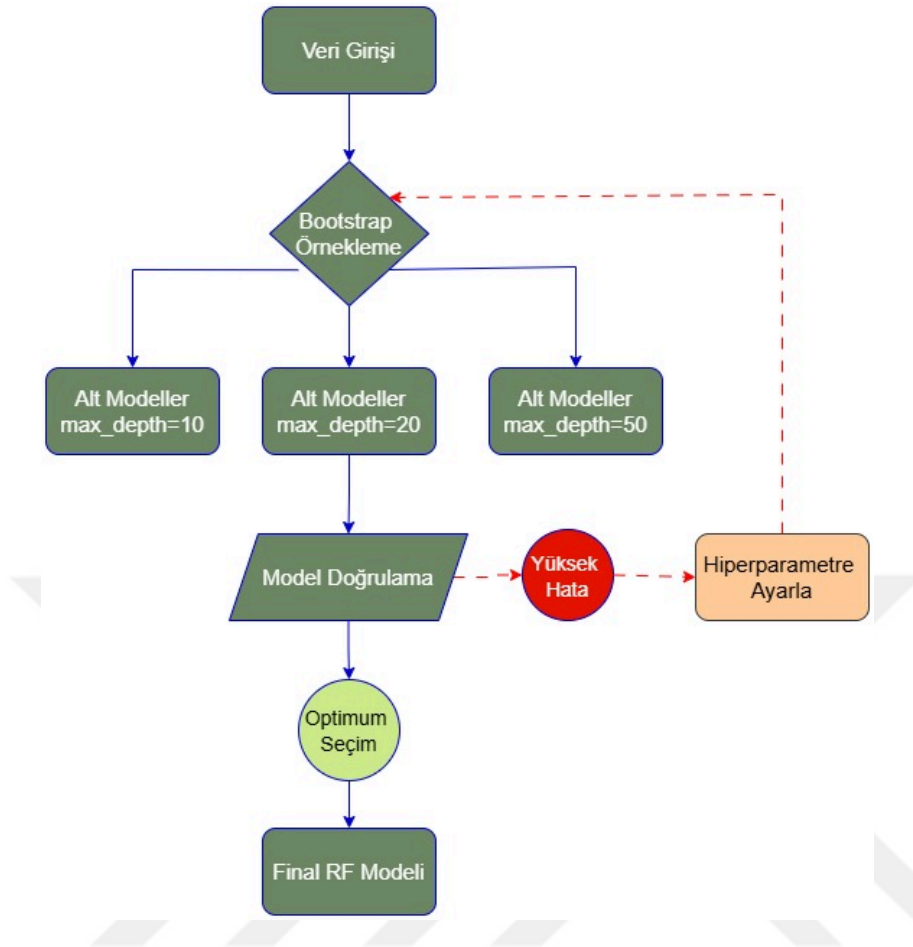
Bağımsız olarak, akış şeması ayrıca başka bir SVR modelini eğitmek için hiperparametre optimizasyonu ile bir Polinom çekirdeğinin uygulanmasını da

göstermektedir. Ek olarak, muhtemelen çekirdek seçeneklerinden biriyle model eğitime yol açan "Değişken Mühendisliği"ni içeren bir yol da gösterilmektedir.

Son olarak, farklı SVR model konfigürasyonlarının (çeşitli ölçeklendirme yöntemleri ve çekirdeklerle eğitilmiş) çıktıları "Model Doğrulama" aşamasında birleşir. Burada, her modelin performansı önceden tanımlanmış kriterlere göre değerlendirilir. Modelin doğruluğu yeterli görülürse ("Evet"), süreç sona erer. Aksi takdirde ("Hayır"), akış şeması ön işleme adımlarına bir dönüş olduğunu gösterir ve bu da veri ön işleme, değişken mühendisliği veya hiperparametre ayarlamasındaki değişiklikler yoluyla model geliştirme ve optimizasyonuna yönelik yinelemeli bir yaklaşımı düşündürür.

RF algoritması ile Enerji Tüketimi Tahmini Metodolojisi

Bu tez çalışmasının metodolojisi kapsamında, enerji tüketimi tahmini için kullanılan bir diğer makine öğrenmesi algoritması olan Rastgele Orman (RF) modeli detaylı bir şekilde incelenmiştir. RF modelinin tahmin doğruluğunu ve genelleme yeteneğini optimize etmek amacıyla, farklı ağaç derinlikleri ve çeşitli hiperparametre kombinasyonları sistematik olarak test edilmiştir. Model geliştirme sürecindeki bu kritik karar noktaları ve izlenen adımlar, Şekil 3.21'de sunulan akış şeması aracılığıyla özetlenmektedir. Şema, özellikle farklı maksimum ağaç derinliklerinin (max_depth=10, 20, 50) ve bootstrap örneklemesinin kullanıldığı alt modellerin doğrulama veri seti üzerindeki performanslarının karşılaştırmalı analizini görselleştirmektedir. Yüksek hata oranlarının gözlemlendiği durumlarda, modelin performansını iyileştirmek için hiperparametre ayarlamalarına yönelik iteratif bir geri besleme döngüsü de akış şemasında belirtilmektedir.



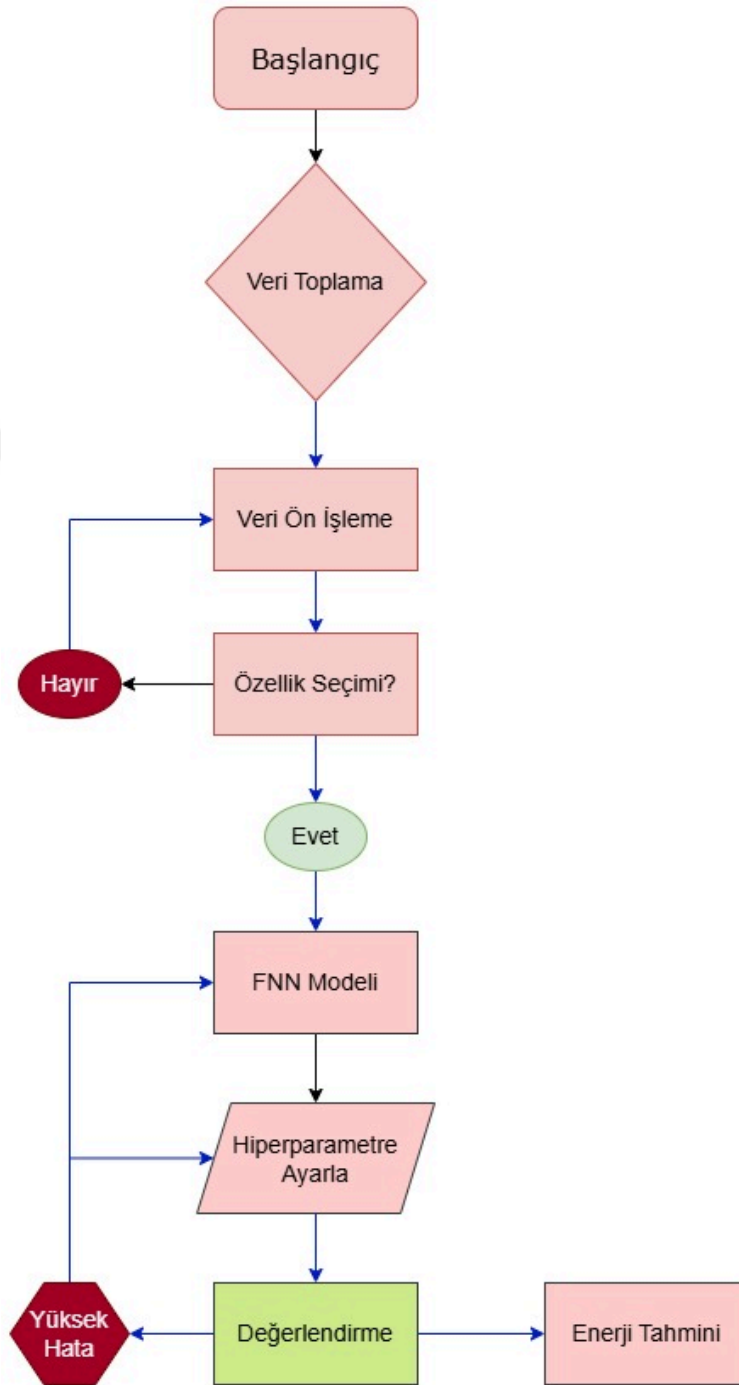
Şekil 3.21. RF modeli hiperparametre optimizasyon şeması

RF modelinin akış şeması, sürecin "Veri Girişi" ile başladığını ve ardından "Bootstrap Örnekleme" tekniğinin uygulandığını göstermektedir. Bootstrap örnekleme sonucunda, farklı maksimum ağaç derinliklerine ($\text{max_depth}=10$, $\text{max_depth}=20$, $\text{max_depth}=50$) sahip çeşitli alt modeller oluşturulmuştur. Bu alt modellerin performansları "Model Doğrulama" aşamasında değerlendirilmektedir. Eğer doğrulama sonucunda "Yüksek Hata" tespit edilirse, modelin performansını iyileştirmek amacıyla "Hiperparametre Ayarla" adımına geri dönmekte ve iteratif bir optimizasyon süreci izlenmektedir. Doğrulama sonucunda kabul edilebilir bir performans elde edildiğinde ise "Optimum Seçim" aşamasına geçilerek en iyi performansı gösteren model belirlenmektedir. Bu akış şeması, Rastgele Orman modelinin farklı hiperparametre konfigürasyonlarının sistematik olarak denenerek en uygun modelin seçilmesine yönelik metodolojik yaklaşımı görselleştirmektedir.

FNN algoritması ile Enerji Tüketimi Tahmini Metodolojisi

Herat Şehri'nin enerji tüketiminin karmaşık doğrusal olmayan ilişkilerini modelleme potansiyeli nedeniyle İleri Beslemeli Sinir Ağı (FNN) algoritması uygulanmıştır. Modelin tahmin doğruluğunu en üst düzeye çıkarmak amacıyla, farklı ağ topolojileri ve hiperparametreler denenerek geri yayılım algoritması ile kapsamlı bir eğitim süreci gerçekleştirilmiştir. Herat şehrinin enerji tüketimi tahmini için geliştirilen bu ileri beslemeli sinir ağı modelinin temel çalışma adımlarını özetleyen akış şeması Şekil 3.22'de sunulmaktadır. Şema, veri hazırlama aşamasından başlayarak, girdi özelliklerinin

seçimi, uygun ağ mimarisinin tasarımı, hiperparametrelerin optimizasyonu ve son olarak model performansının değerlendirilmesini içeren sistematik bir yaklaşımı görsel olarak ifade etmektedir.



Şekil 3.22. Sinir ağı modeli tabanlı enerji tahmini akış şeması

FNN modelinin akış şemasında, enerji tahmini sürecinin sistematik adımlarını detaylı bir şekilde görselleştirmektedir. Süreç, "Başlangıç" noktasıyla tetiklenmekte ve ardından çalışmada kullanılacak olan enerji tüketimi ve meteorolojik verilerinin "Veri Toplama" aşaması gerçekleştirilmektedir. Toplanan ham veriler, modelin öğrenme

sürecini iyileştirmek amacıyla "Veri Ön İşleme" aşamasında temizlenmekte, dönüştürülmekte ve ölçeklendirilmektedir.

Ön işlenmiş verilerin ardından, enerji tüketimini en iyi tahmin edebilecek ilgili girdi özelliklerinin belirlendiği "Özellik Seçimi?" karar noktasına ulaşılmaktadır. Eğer seçilen özelliklerin model için yeterli olmadığı düşünülürse ("Hayır" dalı), süreç veri ön işleme aşamasına geri dönerek farklı özellik mühendisliği tekniklerinin uygulanması veya mevcut özelliklerin farklı şekillerde dönüştürülmesi gibi alternatif yaklaşımlar denenmektedir.

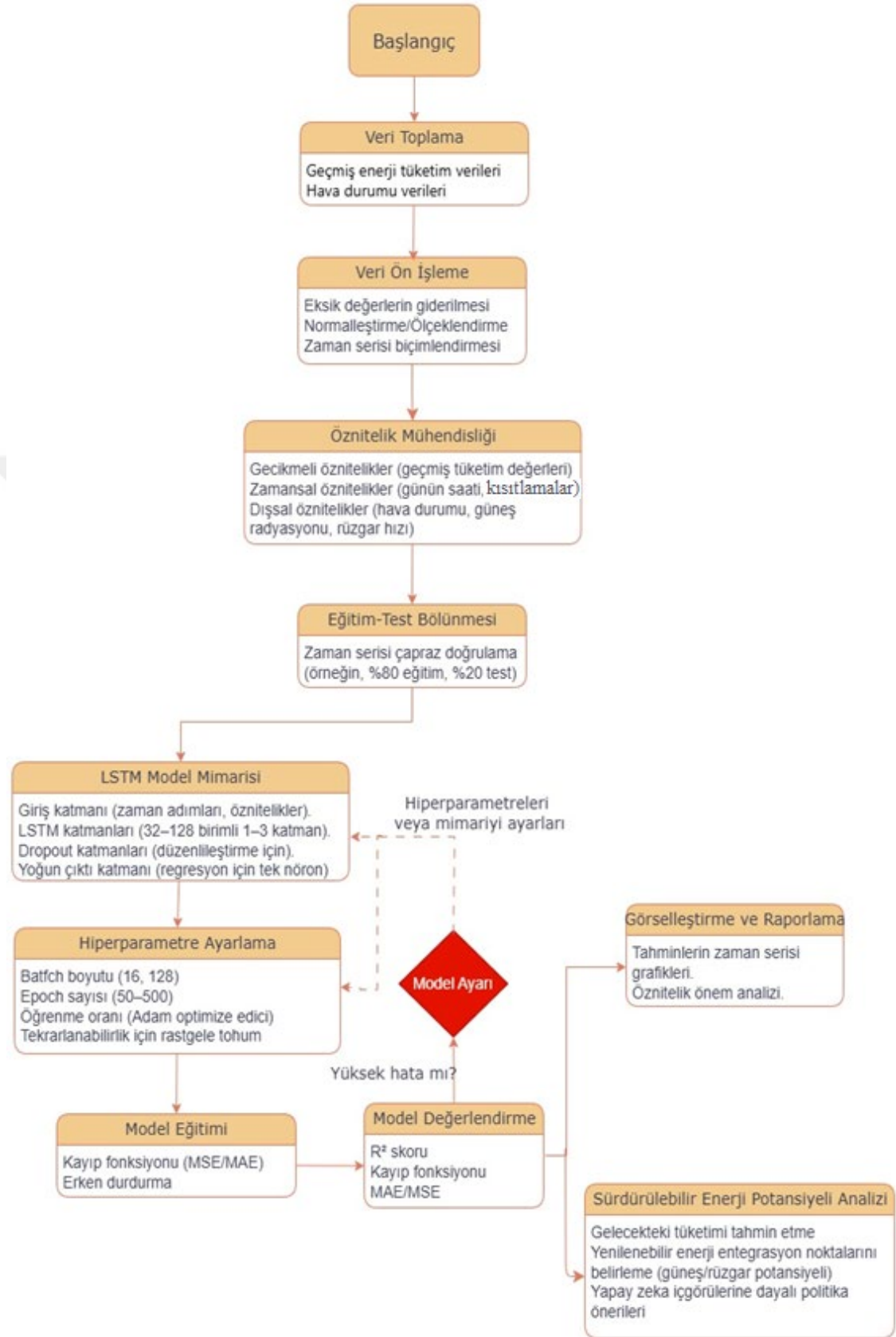
Uygun özelliklerin belirlenmesinin ardından ("Evet" dalı), belirlenen girdi özelliklerine dayalı olarak "FNN Modeli" oluşturulmaktadır. Bu aşamada, ağı katman sayısı, her katmandaki nöron sayısı ve aktivasyon fonksiyonu gibi temel mimari kararları alınmaktadır. Oluşturulan modelin performansını optimize etmek amacıyla "Hiperparametre Ayarla" adımı izlenmektedir. Bu adımda, öğrenme oranı, toplu batch boyutu, epoch sayısı gibi kritik hiperparametreler farklı değerler denenerek ayarlanmaktadır.

Ayarlanan hiperparametrelerle eğitilen modelin performansı, ayrılan doğrulama veri seti üzerinde "Değerlendirme" aşamasında titizlikle ölçülmektedir. Bu değerlendirme aşamasında, MSE, MAE ve R^2 gibi regresyon metrikleri kullanılmaktadır. Eğer modelin performansı önceden belirlenen eşik değerlerin altında kalır ve "Yüksek Hata" tespit edilirse, hiperparametrelerin farklı kombinasyonlarının denenmesi veya ağ mimarisinde değişiklik yapılması için "Hiperparametre Ayarla" adımı geri dönlmektedir. Bu döngü, kabul edilebilir bir performans seviyesine ulaşılan kadar devam etmektedir.

Modelin değerlendirme sonucunda tatmin edici bir performans göstermesi durumunda, süreç "Enerji Tahmini" aşamasına ilerleyerek eğitilmiş ve optimize edilmiş FNN modeli kullanılarak gelecekteki enerji tüketimi tahminleri üretilmektedir. Bu detaylı akış şeması, FNN modelinin enerji tahmini için kullanılan sistematik geliştirme, optimizasyon ve değerlendirme sürecinin her bir adımını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

LSTM algoritması ile Enerji Tüketimi Tahmini Metodolojisi

Herat Şehri'nin enerji tüketiminin zamana bağlı yapısını ve geçmiş tüketim değerlerinin gelecekteki tüketimi üzerindeki etkisini modelleme amacıyla, bu tez çalışmasında Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) algoritması temel alınmıştır. Şekil 3.23'de sunulan akış şeması, LSTM modelleri aracılığıyla Herat Şehri'nin enerji tüketiminin tahmin edilmesine yönelik yapay zeka tabanlı sürecin aşamalarını görselleştirmektedir. Veri toplama ve ön işlemeden başlayarak, modelin eğitilmesi, hiperparametrelerinin ayarlanması ve nihayetinde enerji tüketimi tahminlerinin üretilmesine kadar uzanan bu süreç, doğru tahminler elde etmeyi ve aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyon potansiyelini değerlendirmeyi hedeflemektedir. LSTM algoritması, girdi verilerini ardışık zaman adımları boyunca işleyerek, enerji kullanımındaki karmaşık desenleri ve uzun vadeli bağımlılıkları başarılı bir şekilde modelleyebilmektedir. Modelin performansını optimize etmek için katman sayısı, her katmandaki birim sayısı ve öğrenme oranı gibi çeşitli hiperparametreler sistematik olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.23. LSTM tabanlı enerji tüketimi tahmin süreci

LSTM modelinin enerji tahmini sürecine özgü doğası gereği, bu akış şeması (Şekil 3.23), girdi verilerinin zamansal sıralılığını dikkate alan ve geçmişteki enerji tüketimi ile hava durumu örüntülerinden öğrenme yeteneğine sahip özel bir metodolojiyi görselleştirmektedir. Süreç, geçmiş bilgilerin gelecekteki enerji tüketimini tahmin etmedeki kritik rolünü vurgulayarak "Başlangıç" noktasıyla başlamakta ve ardından ilgili zaman serisi verilerinin "Veri Toplama" aşamasına odaklanmaktadır. Toplanan veriler üzerinde eksik değerlerin giderilmesi, normalleştirme/ölçeklendirme ve zaman serisi biçimlendirmesi gibi "Veri Ön İşleme" adımları titizlikle uygulanmaktadır.

Ön işlenmiş verilerden "Öznitelik Mühendisliği" aşamasında, modelin öğrenme kapasitesini artırmak amacıyla gecikmeli öznitelikler (geçmiş tüketim değerleri), zamansal öznitelikler (günün saati, haftanın günü, tatiller gibi periyodik bilgiler) ve dışsal öznitelikler (hava durumu değişkenleri, güneş radyasyonu, rüzgar hızı gibi çevresel faktörler) özenle oluşturulmaktadır. Bu zenginleştirilmiş öznitelik seti, "Eğitim-Test Bölünmesi" aşamasında zaman serisi çapraz doğrulama prensiplerine uygun olarak eğitim ve test kümelerine ayrılmaktadır.

"LSTM Model Mimarisi" bloğunda, modelin temel katmanları olan giriş katmanı (zaman adımları ve mühendislik ürünü öznitelikler), uzun vadeli bağımlılıkları yakalamak üzere yapılandırılmış LSTM katmanları (uygun sayıda birim ve katman), aşırı öğrenmeyi önlemek için kullanılan dropout katmanı ve nihai enerji tahmini için yoğun çıktı katmanı tanımlanmaktadır. Modelin mimarisi ve "Hiperparametre Ayarlama" aşamasında belirlenen kritik parametreler (batch boyutu, epoch sayısı, öğrenme oranı, optimizasyon algoritması, tekrarlanabilirliği sağlayan rastgele tohum) "Model Eğitimi" aşamasında kayıp fonksiyonu (MSE/MAE) ve erken durdurma (early stopping) mekanizması ile optimize edilmektedir.

Eğitilen modelin performansı "Model Değerlendirme" aşamasında R-kare ve kayıp fonksiyonu (MAE/MSE) gibi uygun regresyon metrikleriyle titizlikle ölçülmektedir. Model değerlendirme aşamasında yetersiz performans tespit edildiğinde ("Yüksek hata mı?" - Evet), süreç "Model Ayarı" aşamasına geri dönerek modelin mimarisi veya hiperparametreleri üzerinde ince ayarlar yapılmasına olanak tanıyan önemli bir geri bildirim döngüsü bulunmaktadır. Bu iteratif optimizasyon süreci, modelin veri setindeki karmaşık zamansal örüntüleri daha iyi öğrenmesini ve dolayısıyla daha doğru enerji tüketimi tahminleri üretmesini amaçlamaktadır.

Yeterli performans sağlandığında ise "Görselleştirme ve Raporlama" aşamasına geçilerek elde edilen tahminlerin zaman serisi grafikleri ve öznitelik önem analizleri sunulmaktadır. Son olarak, doğru ve güvenilir enerji tüketimi tahminleri "Sürdürülebilir Enerji Potansiyeli Analizi" bağlamında değerlendirilerek gelecekteki tüketim projeksiyonları, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyon potansiyeli ve veri odaklı politika önerileri oluşturulmaktadır. Bu kapsamlı akış şeması, LSTM modelinin enerji tahmini için kullanılan tüm geliştirme, optimizasyon, değerlendirme ve analiz adımlarını detaylı bir şekilde özetlemektedir.

Araştırmanın tüm yönleri için, veri ön işleme, model geliştirme, eğitim, değerlendirme ve görselleştirme dahil olmak üzere, güçlü bir entegre geliştirme ortamı (IDE) olan PyCharm kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan kütüphaneler aşağıda verilmiştir;

- Scikit-learn: SVR algoritması ve RF algoritması'nın uygulanması için.
- TensorFlow/Keras: İleri Beslemeli Sinir Ağı ve LSTM algoritması modellerinin uygulanması için.
- Pandas ve NumPy: Veri işleme ve sayısal hesaplamalar için.
- Matplotlib ve Seaborn: Veri görselleştirme ve bilgilendirici grafikler oluşturmak için.

3.4 Sürdürülebilir Enerji Potansiyeli

Herat Şehri, enerji ihtiyacını büyük ölçüde komşu ülkelerden sağlanan elektrik ithalatı ile karşılamakta olup, bu durum şehri uluslararası enerji piyasalarındaki fiyat dalgalanmalarına ve arz kesintilerine karşı savunmasız bırakmaktadır. Mevcut iletim altyapısındaki yetersizlikler, özellikle ekstrem hava koşullarında sıklıkla yaşanan elektrik kesintilerine neden olmakta ve şehirdeki kırsal (%11) ile kentsel (%89) alanlar arasındaki enerjiye erişimdeki eşitsizlikler önemli sorunlar teşkil etmektedir. Artan nüfus ve ekonomik kalkınma ile paralel olarak Herat'ın enerji tüketimi sürekli yükselmekte olup, 2025 yılı nüfus projeksiyonu 752.910 kişidir (Review 2025). Buna karşın, Afganistan'daki kişi başına düşen yıllık elektrik tüketimi yaklaşık 790 kWh (2,69 milyon Btu (Factbook 2025)) seviyesinde olup, bu değer küresel ortalamanın oldukça altında yer almaktadır.

Bu mevcut enerji sorunlarına karşı sürdürülebilir enerji çözümleri hayati bir önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sistemine entegrasyonu, yalnızca dışa bağımlılığı azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda enerji üretiminin çevresel etkilerini de minimize edecektir. Fosil yakıt kullanımından kaynaklanan karbon emisyonları, hava kirliliği ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlar, yenilenebilir enerji teknolojileri aracılığıyla önemli ölçüde azaltılabilir. Güneş, rüzgar ve biyokütle gibi yerel kaynaklar, Herat'ın enerji gereksinimlerini karşılamak için uygun ve sürdürülebilir alternatifler sunarken, çevresel faydaların yanı sıra ekonomik istikrar ve enerji güvenliğini de güçlendirecektir. Bu kısım, Herat'ın mevcut enerji sorunlarına yönelik kapsamlı sürdürülebilir çözümleri incelemeyi ve bu bağlamda geliştirilen yapay zekâ tabanlı enerji tüketimi tahminlerinin, şehirdeki yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji verimliliği odaklı politika geliştirme süreçlerine nasıl değerli katkılar sağlayabileceğini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

3.4.1. Herat'ta enerji durumu ve talep-arz dengesi

Afganistan'ın elektrik şebekesi genelinde kentsel bölgelerde kırsal alanlara kıyasla daha yüksek bir erişim oranı gözlemlenmektedir. İller arasındaki şebeke erişimindeki bu farklılıklar belirgindir; Herat gibi büyükşehirlerde ise komşu ülkelerden sağlanan elektrik ithalatı sayesinde erişim oranları nispeten daha yüksektir (Noorzad 2018). Herat'ın elektrik tüketiminin yaklaşık %80'i konut sektöründe gerçekleşmekte olup, bu tüketimin büyük bir kısmı Türkmenistan ve İran'dan yapılan elektrik ithalatı ile karşılanmaktadır (Ahmadzai ve McKinna 2018). Ülke genelindeki enerji üretiminin yalnızca %20'si hidroelektrik santralleri başta olmak üzere yerel kaynaklardan sağlanmakta, geri kalan tüketim ise büyük ölçüde ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Ancak, şebeke sisteminin parçalı ve senkronize olmaması, enerji arzının güvenliğini ve şebeke genişleme çabalarını olumsuz yönde etkilemektedir (ESCAP 2017).

Ancak, mevcut tüketim verilerinin Herat şehrinin gerçek enerji talebini tam olarak yansıtmadığı önemli bir husustur. Şehir, büyük ölçüde komşu ülkelerden sağlanan elektrik ithalatına bağımlı olup, bu ithalatın kapasitesi sınırlı kalmaktadır. Özellikle yaz aylarında artan soğutma ihtiyacı ve kış aylarında yükselen ısınma talebi gibi dönemlerde, arz-talep dengesizliği belirginleşmekte ve şehir genelinde planlı veya plansız elektrik kesintileri yaşanmaktadır. Bu durum, şebekede dönüşümlü elektrik paylaşımı (yük atma - load shedding) uygulamalarının yaygınlaşmasına neden olmakta ve birçok bölgede elektrik enerjisi günde sadece belirli saatler arasında sağlanabilmektedir. Bu yapısal arz kısıtları nedeniyle, ölçülen elektrik tüketimi gerçek enerji ihtiyacının önemli ölçüde altında kalmakta ve potansiyel enerji talebi baskılanmaktadır. Bu nedenle, mevcut tüketim verileri analiz edilirken bu teknik ve altyapısal sınırlamaların dikkate alınması gerekmektedir.

Herat, Afganistan'ın enerji altyapısındaki mevcut zorlukları açıkça ortaya koyan önemli bir örnektir. Uzun süren iç çatışmalar, enerji altyapısının yıpranmasına ve şehrin ithal enerjiye olan bağımlılığının artmasına yol açmıştır. Şehrin elektrik talebi, şebeke elektriği, dizel jeneratörler ve biyokütle yakıtlarının bir kombinasyonu ile karşılanmaktadır. Ancak, şebeke elektriğinin düşük kalitesi ve sık yaşanan kesintiler, genellikle maliyetli ve çevresel açıdan zararlı olan dizel jeneratörlere olan bağımlılığı artırmaktadır. Sınırlı şebeke bağlantısı, özellikle kırsal bölgelerde enerjiye erişimi daha da zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yerel enerji şebekelerinin ve mikro şebekelerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

3.4.1.1. Kişi başına tüketim, sektörel dağılım ve nüfus etkisi

2022 verileri itibarıyla Afganistan'ın kişi başına düşen yıllık elektrik tüketimi yaklaşık 790 kWh (2,69 milyon Btu) seviyesinde olup, bu değer küresel ortalamanın belirgin şekilde altında yer almaktadır. Ülke genelindeki elektrik tüketiminin büyük bir bölümü, yaklaşık %80'lik bir oranla hane halkları tarafından gerçekleştirilmektedir (ESCAP 2017). Ancak, özellikle Herat gibi büyük şehirlerde gözlemlenen hızlı nüfus artışı ve şehirleşme eğilimi, mevcut enerji tüketimi üzerinde giderek artan bir baskı oluşturmaktadır (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Herat Şehri'nin yıllara göre nüfus değişimi (2000–2030) (Review 2025)

Yıl	Nüfus	Yıl	Nüfus	Yıl	Nüfus
2000	230000	2011	380000	2022	660000
2001	240000	2012	410000	2023	690000
2002	250000	2013	440000	2024	724172
2003	260000	2014	475000	2025	752910
2004	275000	2015	510000	2026	780000
2005	290000	2016	545000	2027	810000
2006	305000	2017	570000	2028	840000
2007	320000	2018	585000	2029	870000
2008	335000	2019	595000	2030	900000
2009	345000	2020	600000		
2010	350000	2021	630000		

2025 yılına gelindiğinde, Herat Şehri'nin nüfusunun yaklaşık olarak 752910 kişiye ulaşması beklenmektedir. Bu sürekli nüfus artışı, mevcut elektrik tüketimini daha da yükseltmekte ve şehrin zaten yetersiz olan enerji altyapısı üzerindeki yükü önemli ölçüde artırmaktadır. Artan konut ihtiyacı, ticari faaliyetlerin genişlemesi ve şehirleşmeyle birlikte değişen yaşam standartları, elektrik tüketiminin farklı sektörlerde (konut, ticari, küçük sanayi vb.) artmasına neden olmaktadır. Bu durum, Herat'ın sürdürülebilir bir enerji geleceği planlaması yaparken hem mevcut enerji açığını gidermeyi hem de gelecekteki artan tüketimi karşılamayı hedeflemesinin kritik önemini vurgulamaktadır. Aksi takdirde, enerji altyapısındaki mevcut zorluklar daha da derinleşebilir ve şehrin sosyo-ekonomik kalkınma potansiyeli olumsuz etkilenebilir.

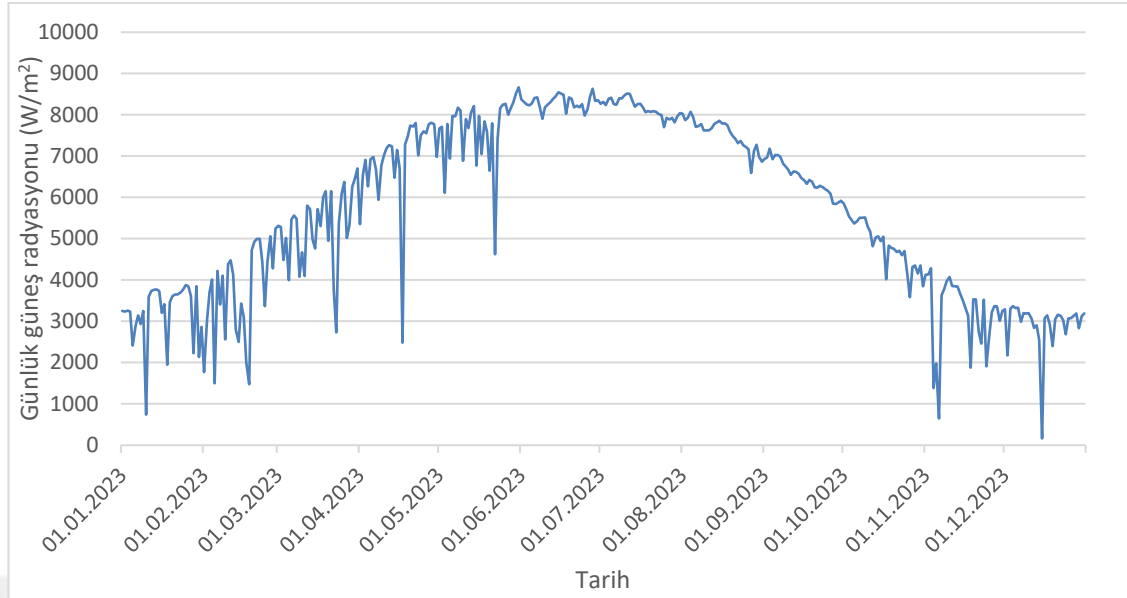
3.4.2. Yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli

Afganistan, önemli miktarda hem fosil yakıt hem de yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeline sahip olmasına rağmen, bu kaynakların büyük bir bölümü henüz yeterince değerlendirilememiştir. Özellikle Herat Şehri'nin kendine özgü coğrafi ve iklimsel koşulları, güneş ve rüzgar enerjisi üretimi açısından kayda değer fırsatlar sunmaktadır. Bu bölümde, Herat'ın sahip olduğu yenilenebilir enerji potansiyeli detaylı bir şekilde analiz edilmektedir.

Güneş enerjisi potansiyeli

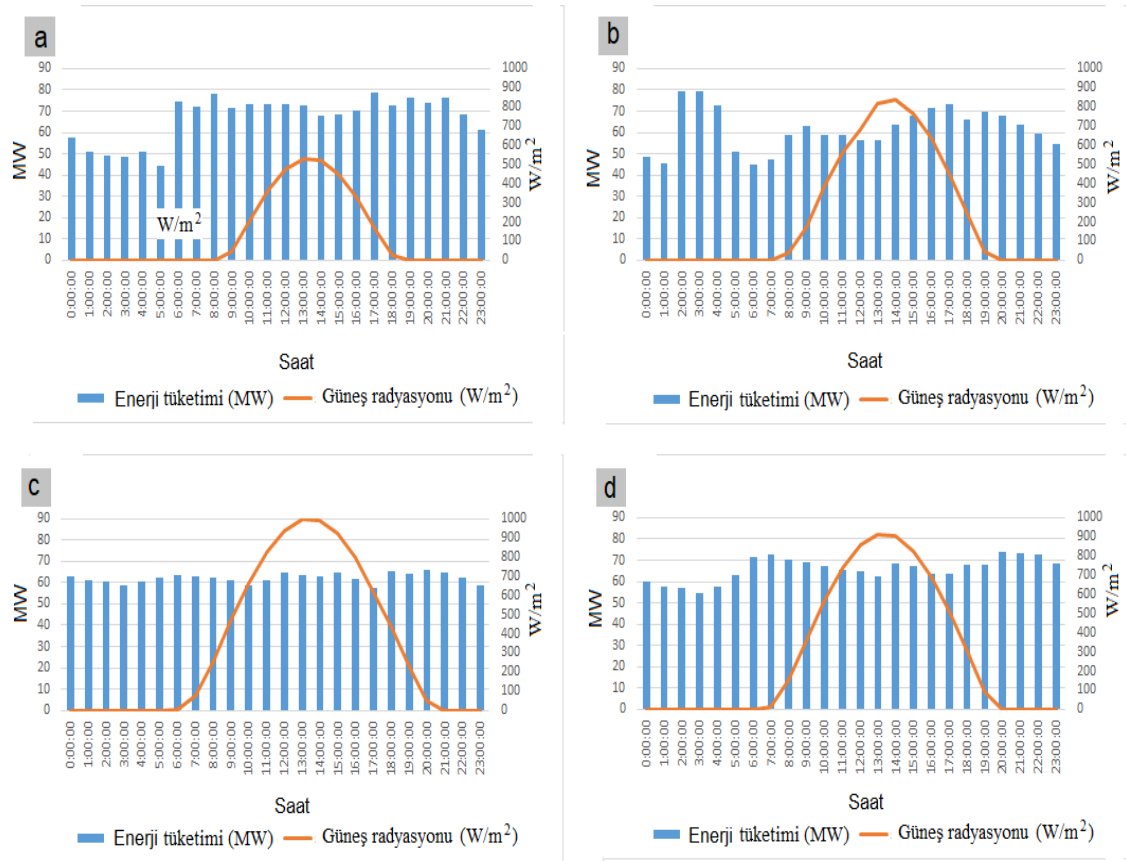
Herat Şehri, uzun süreli yüksek güneşlenme oranı ve yeterli düzeydeki güneş radyasyonu ile güneş enerjisi üretimi için elverişli koşullara sahiptir. Şehirde yıllık ortalama 300 günden fazla güneşli gün kaydedilmekte olup, ortalama güneş radyasyonu seviyesi 4,5 ila 6,5 kWh/m²/gün aralığında değişmektedir (Group 2024a). Bu değerler, fotovoltaik (FV) sistemlerin hem şebekeye bağlı (on-grid) hem de şebekeden bağımsız (off-grid) uygulamalar için teknik ve ekonomik uygunluğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Güneş enerjisi sistemleri, özellikle enerjiye erişimin sınırlı olduğu kırsal bölgelerde düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir çözüm alternatifi sunmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi kullanımı fosil yakıtlara olan enerji bağımlılığını azaltarak çevresel etkilerin önemli ölçüde minimize edilmesine katkıda bulunur. Şekil 3.24'te görüldüğü üzere, Herat şehrinde örneğin 2023 yılı boyunca günlük güneş radyasyonu değerleri yüksek bir potansiyel sergilemektedir. Ocak ayı gibi kış aylarında günlük ortalama radyasyon değerleri 2000–4000 W/m² arasında seyrederken, Nisan ayından itibaren yaz aylarına doğru belirgin bir artış gözlemlenmekte ve Temmuz ayında 8000 W/m²'yi aşan tepe değerlerine ulaşılmaktadır. Bu eğilim, güneş enerjisi sistemlerinin yılın büyük bir bölümünde verimli çalışabileceğini ve özellikle yaz aylarında maksimum üretim kapasitesine ulaşabileceğini göstermektedir. Güneş radyasyonundaki bu istikrarlı ve yüksek düzey, Herat'ın sürdürülebilir enerji dönüşümünde güneş enerjisinin temel bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.24. 2023 yılı için Herat şehri günlük güneş radyasyonu (W/m^2)

Şekil 3.25, Herat şehrinde 2023 yılı için farklı mevsimlerdeki saatlik enerji tüketimi ile güneş radyasyonu değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Ocak (a) ve Mart (b) aylarında güneş radyasyonu sabah saatlerinden itibaren yükselmekte, öğlen saatlerinde zirveye ulaşmakta ve akşam saatlerine doğru azalmaktadır. Ancak bu dönemlerde enerji tüketimi sabit bir seyir izlemekte ve özellikle sabah ile akşam saatlerinde yüksek olmaktadır. Temmuz ayı (c) grafiğinde ise güneş radyasyonu oldukça yüksek düzeylere ulaşmakta ve gün boyunca uzun süreli üretim potansiyeli sunmaktadır. Bu dönemde enerji tüketiminin dağılımı da daha dengeli ve sürdürülebilir enerji katkısı için uygun bir profil göstermektedir. Eylül ayı (d) verileri ise yaz sonundaki potansiyeli ortaya koymakta, yine gün ortasında yüksek güneş radyasyonu ile enerji üretimi açısından avantajlı bir dönem olduğunu göstermektedir. Bu grafikler, güneş enerjisinin gündüz saatlerinde yüksek potansiyele sahip olduğunu ve doğru sistem tasarımlarıyla şehirdeki enerji ihtiyacının önemli bir bölümünün karşılanabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.25. Enerji tüketim ile mevsimsel güneş radyasyonu değerlerinin karşılaştırması; a) Ocak enerji tüketimi ile güneş radyasyonu; b) Mart enerji tüketimi ile güneş radyasyonu; c) Temmuz enerji tüketimi ile güneş radyasyonu; d) Eylül enerji tüketimi ile güneş radyasyonu

Rüzgar enerjisi potansiyeli

Herat Şehri'nin çevresindeki dağlık topografya, yıl boyunca tutarlı rüzgar akımlarının oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Yapılan rüzgar kaynağı değerlendirme çalışmaları, şehrin çeşitli bölgelerinde ticari ölçekte türbin kurulumuna uygun ortalama rüzgar hızlarının mevcut olduğunu göstermiştir. Ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu ölçümleri, belirli bölgelerde önemli düzeyde rüzgar enerjisi potansiyeli bulunduğunu ortaya koymaktadır (ASIM ve ANDO 2020).

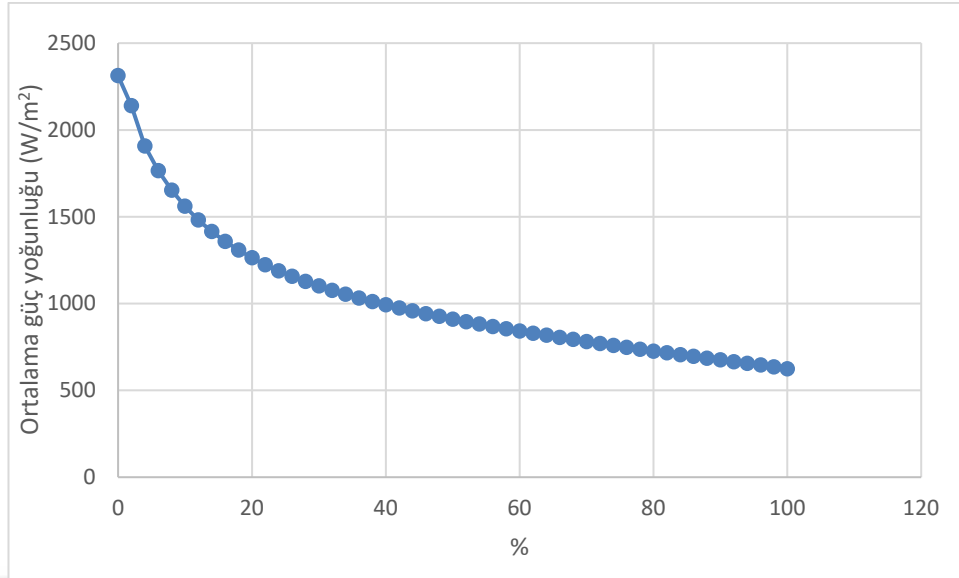
Rüzgar enerjisi, özellikle güneş enerjisi üretiminin azaldığı gece saatlerinde enerji arzını destekleyerek şebeke kararlılığına katkı sağlayabilir. Bu durum, güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinin birbirini tamamlayıcı niteliğini güçlendirmektedir. Herat şehrindeki rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmek amacıyla, en rüzgarlı alanların yüzdelik dilimlerine göre ortalama rüzgar hızları analiz edilmiştir. Çizelge 3.5'te, en rüzgarlı %0'lık kesimde ortalama rüzgar hızı 13,25 m/s ile en yüksek seviyede olup, rüzgar türbinlerinin verimli çalışabileceği hız sınırlarının üzerindedir (Group 2024b). Ancak bu hız sadece çok sınırlı bir alanda gözlemlenmektedir. Yüzdelik oran arttıkça ortalama rüzgar hızının kademeli olarak düştüğü görülmektedir; örneğin en rüzgarlı %10'luk alanda ortalama hız 11,49 m/s iken, bu oran %50'ye çıktığında hız 9,37 m/s'e kadar gerilemektedir. Tüm şehir geneline bakıldığında ise rüzgar hızının ortalama olarak 7,78

m/s seviyesine düştüğü görülmektedir. Bu analiz, Herat şehrinde rüzgar türbinlerinin kurulumu için en uygun bölgelerin belirlenmesinde önemli bir veri kaynağı sağlamakta ve enerji üretiminde verimliliği artırmak için stratejik alan seçiminin önemini ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.5. Yüz metre yükseklikteki rüzgarlı alanların verileri (Group 2024b)

En Rüzgarlı Alanların %'si	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)
0%	13,25
10%	11,49
20%	10,64
30%	10,12
40%	9,72
50%	9,37
60%	9,05
70%	8,74
80%	8,44
90%	8,13
100%	7,78

Şekil 3.26, Herat şehri için rüzgar enerjisi potansiyelini değerlendirmek amacıyla, en rüzgarlı alanlara göre ortalama güç yoğunluğunu göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere, rüzgar potansiyeli en yüksek olan %10'luk alanın ortalama güç yoğunluğu 1561 W/m² olarak tespit edilmiştir. Bu değer, özellikle bu bölgenin rüzgar enerjisi yatırımları açısından yüksek bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Güç yoğunluğunun alan yüzdesine bağlı olarak hızlı bir şekilde azaldığı da dikkat çekmektedir; bu durum, enerji yatırımlarında yer seçiminde yüksek rüzgar potansiyeline sahip bölgelerin tercih edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu grafik, tez kapsamında kullanılan 2023 yılına ait meteorolojik tarihsel rüzgar hızı verileri ile Global Wind Atlas'tan elde edilen verilere dayanmakta olup, güç yoğunluğu değerleri rüzgar hızından hesaplanmıştır.



Şekil 3.26. Herat şehri için en rüzgarlı alanlara göre ortalama güç yoğunluğu (W/m²)

Hidroelektrik, biyokütle, jeotermal

Afganistan genelinde olduğu gibi Herat bölgesi de diğer yenilenebilir enerji kaynakları açısından belirli bir potansiyele sahiptir:

- **Hidroelektrik Enerji:** Afganistan'ın toplam hidroelektrik potansiyelinin yaklaşık 23000 MW olduğu tahmin edilmektedir (Ahmadzai ve McKinna 2018). Herat'a yakın bölgelerdeki küçük ölçekli akarsular, mikro hidroelektrik sistemler için uygun olabilir. Bu tür sistemler, özellikle şebeke bağlantısı olmayan dağ köyleri gibi uzak yerleşim birimlerinde enerji ihtiyacını karşılamak için değerlendirilebilir.
- **Biyokütle Enerjisi:** Tarım ve hayvancılığın yaygın olduğu Herat kırsalında, tarımsal ve hayvansal organik atıklardan enerji üretimi potansiyeli bulunmaktadır. Özellikle evsel organik atıkların biyogaz tesisleri aracılığıyla değerlendirilmesi, hem atık yönetimi sorunlarına çözüm sunabilir hem de temiz enerji üretimini teşvik edebilir.
- **Jeotermal Enerji:** Herat bölgesinde düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklara ilişkin sınırlı veri mevcuttur. Ancak, Batı Afganistan'daki bazı jeolojik araştırmalar, jeotermal potansiyelin varlığına dair işaretler sunmaktadır. Bu alandaki potansiyelin kesin olarak belirlenmesi için daha kapsamlı jeolojik ve jeofiziksel analizlerin yapılması gerekmektedir.

Entegrasyon zorlukları ve çözümleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut enerji sistemine başarılı bir şekilde entegre edilmesi, çeşitli teknik ve yapısal zorlukları beraberinde getirebilmektedir. Bu zorlukların etkin bir şekilde yönetilmesi ve uygun çözümlerin geliştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelinden tam olarak yararlanılması, enerji arzının güvenilirliğinin sağlanması ve sürdürülebilir enerjiye geçiş sürecinin hızlandırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Kaynakların Süreksizliği ve Şebeke Etkileri: Güneş ve rüzgar gibi temel yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği değişken ve öngörülemez olması, enerji üretiminde dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu durum, özellikle şebekeye bağlı (on-grid) sistemlerde enerji arz ve talep dengesinin korunmasını zorlaştırabilir. Rüzgar hızının düşmesi veya bulutlu hava koşulları nedeniyle güneş enerjisi üretiminin azalması gibi senaryolar, şebeke istikrarını olumsuz etkileyebilir ve ek şebeke yönetimi maliyetleri doğurabilir.

Depolama ve Akıllı Şebeke Çözümleri: Yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğinden kaynaklanan zorlukların üstesinden gelmek için enerji depolama sistemleri (örneğin, batarya teknolojileri, hidrojen depolama) hayati bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, üretim fazlasının depolanarak tüketim zirve saatlerinde veya üretim düşüşlerinde kullanılmasına olanak tanır. Ayrıca, akıllı şebeke teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması, enerji üretim ve tüketiminin gerçek zamanlı olarak izlenmesini, çift yönlü enerji akışını ve tüketim yanıt mekanizmalarını mümkün kılarak şebeke esnekliğini artırır. Bu sayede, yenilenebilir enerjinin şebekeye entegrasyonu kolaylaşır ve genel arz güvenliği önemli ölçüde desteklenir.

Finansman ve Politika Desteği: Yenilenebilir enerji projelerinin ekonomik olarak uygulanabilirliği ve yaygınlaşması, yeterli düzeyde finansmana erişim ve destekleyici politika çerçevelerinin oluşturulması ile doğrudan ilişkilidir. Ulusal ve yerel düzeyde belirlenecek uzun vadeli ve istikrarlı teşvik mekanizmaları (örneğin, vergi avantajları, feed-in tarifeleri, hibeler), Herat gibi şehirlerde özel sektörün yenilenebilir enerji yatırımlarına olan ilgisini artırabilir ve proje geliştirme süreçlerini hızlandırabilir. Ayrıca, bürokratik süreçlerin basitleştirilmesi ve şeffaf düzenlemelerin oluşturulması da yatırım ortamını olumlu yönde etkileyecektir.

Eğitim ve Teknik Uzmanlık: Gelişmiş yenilenebilir enerji teknolojilerinin kurulumu, işletilmesi ve bakımı, nitelikli ve uzmanlaşmış bir iş gücünü gerektirmektedir. Bu nedenle, yerel kapasitenin geliştirilmesine yönelik kapsamlı eğitim programlarının ve mesleki eğitim projelerinin hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır. Üniversiteler, meslek yüksekokulları ve araştırma merkezlerinin bu süreçte aktif olarak entegre edilmesi, yerel uzmanlığın artırılmasına ve teknoloji transferinin sağlanmasına katkıda bulunacaktır. Ayrıca, toplumun yenilenebilir enerji kaynakları ve faydaları konusunda bilinçlendirilmesi de bu teknolojilerin kabulünü ve yaygınlaşmasını destekleyecektir.

3.4.3. Enerji verimliliği stratejileri

Afganistan genelinde olduğu gibi Herat Şehri'nde de belirginleşen elektrik arzı yetersizliği, yüksek ithalat bağımlılığı ve mevcut altyapıdaki eksiklikler, enerji verimliliğini sürdürülebilir enerji politikalarının temel ve vazgeçilmez bir unsuru haline getirmiştir. Elektrik üretiminin büyük ölçüde dış kaynaklara dayanması ve yerel üretim kapasitesinin sınırlı kalması, mevcut enerji kaynaklarının mümkün olan en üst düzeyde verimli kullanılmasının kritik önemini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda enerji verimliliği, sadece enerji arz açığını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda sera gazı emisyonlarını düşürerek çevresel sürdürülebilirliğe de önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yapay zekâ tabanlı enerji tüketimi tahminleri, önerilen enerji verimliliği stratejilerinin tüketim üzerindeki potansiyel etkilerini öngörmek açısından değerli bir analitik araç sunmaktadır.

3.4.3.1. Konut sektöründe enerji verimliliği

Herat Şehri'ndeki toplam elektrik tüketiminin önemli bir bölümü konutlarda gerçekleşmektedir. Şehirdeki konut stokunun büyük bir kısmı yetersiz yalıtıma sahip olup, geleneksel yapı malzemeleriyle inşa edilmiştir (ESCAP 2017). Bu durum, özellikle ısıtma, aydınlatma ve elektrikli ev aletlerinin kullanımında belirgin enerji verimsizliğine yol açmaktadır.

Konut sektöründe enerji verimliliğini artırmaya yönelik öncelikli konular şunlardır:

- **Aydınlatma Sistemlerinin Modernizasyonu:** Yaygın olan akkor ampul kullanımının terk edilerek, enerji tüketimini %40'a kadar azaltabilen LED aydınlatma teknolojisine geçişin teşvik edilmesi. Gün ışığından maksimum düzeyde yararlanacak tasarım prensiplerinin uygulanması.
- **Isıtma ve Soğutma Sistemlerinin İyileştirilmesi:** Düşük verimli elektrikli ısıtıcılar yerine, yerel kaynaklara dayalı biyokütle tabanlı ısıtma sistemlerinin, pasif güneş enerjisi uygulamalarının ve doğal havalandırma sistemlerinin yaygınlaştırılması. Isı pompaları gibi verimli soğutma teknolojilerinin teşvik edilmesi.
- **Isı Yalıtımının Uygulanması:** Duvar, çatı ve pencere yalıtımı bulunmayan konutlardaki yüksek ısı kayıplarının önüne geçilmesi. Temel yalıtım uygulamalarıyla %20'ye varan enerji tasarrufu potansiyelinin değerlendirilmesi. Çift camlı pencerelerin kullanımı.
- **Beyaz Eşya ve Cihaz Verimliliği:** Düşük enerji sınıfına sahip eski beyaz eşya ve diğer elektrikli cihazların, A+ ve üzeri enerji verimlilik sınıfındaki modern modellerle değiştirilmesinin teşvik edilmesi, bu sayede önemli ölçüde elektrik tasarrufu sağlanması.

Çizelge 3.6'da konut sektöründe enerji verimliliği için potansiyel uygulama alanları, mevcut durum/sorunlar, önerilen çözümler ve beklenen tasarruf oranları özetlenmektedir.

Çizelge 3.6. Konutlarda enerji verimliliği uygulamaları ve tasarruf potansiyeli

Uygulama Alanı	Mevcut Durum / Sorun	Önerilen Çözüm	Beklenen Tasarruf
Aydınlatma	Akkor ampul kullanımı yaygın	LED ampul kullanımı ve gün ışığı optimizasyonu	%40'a kadar
Isıtma/Soğutma	Elektrikli ısıtıcılar, verimsiz fanlar	Isı pompaları, verimli vantilatörler, biyokütle	%30–50
Yalıtım	Yalıtım eksikliği	Çatı, duvar yalıtımı, çift cam pencere	%15–25
Beyaz Eşyalar	Eski, verimsiz cihazlar	Enerji etiketli yeni cihazlar	%50–70
Bina Tasarımı	Enerji tasarruflu tasarım eksikliği	AEEC uyumlu bina kodları ve pasif tasarım prensipleri	Uzun vadeli tasarruf

Bu enerji verimliliği uygulamalarının başarılı bir şekilde yaygınlaştırılabilmesi için konut sahiplerinin bilinçlendirilmesine yönelik kapsamlı eğitim programlarının hayata geçirilmesi, enerji verimliliği etiketleme sisteminin etkin bir şekilde uygulanması

ve düşük gelirli haneler için finansal destek (sübvansiyon) mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir.

3.4.3.2. Sanayi ve ticaret sektörlerinde enerji verimliliği

Herat Şehri, Batı Afganistan'ın önemli bir sanayi ve ticaret merkezi konumundadır. Şehir ekonomisinde küçük ve orta ölçekli işletmeler önemli bir yer tutmakta olup, bu işletmeler genellikle tekstil, gıda işleme, inşaat malzemeleri üretimi ve atölye bazlı imalat gibi sektörlerde faaliyet göstermektedir. Bu işletmelerin önemli bir kısmı, teknolojik olarak eski ve enerji açısından düşük verimli üretim sistemleri kullanmaktadır. Ayrıca, sık yaşanan elektrik kesintileri nedeniyle dizel jeneratörlere olan bağımlılık da yüksek seviyededir (ESCAP 2017).

Sanayi ve ticaret sektörlerinde enerji verimliliğini artırabilecek temel önlemler şunlardır:

- Motorlu sistemlerde yüksek verimli motorlar ve değişken hızlı sürücüler gibi enerji verimli ekipmanların kullanımı.
- Isıtma ve buhar üretim sistemlerinde atık ısı geri kazanım sistemlerinin kurulması ve işletilmesi.
- Aydınlatma sistemlerinde enerji tasarruflu LED çözümlerinin kullanılması ve hareket sensörleri gibi kontrol mekanizmalarının entegrasyonu.
- Enerji etütleri (enerji denetimleri - energy audits) aracılığıyla enerji kayıplarının sistematik olarak tespiti ve enerji performansı iyileştirme planlarının geliştirilmesi.

3.4.3.3. Ulaşımda Sürdürülebilirlik

Herat Şehri'ndeki ulaşım sektörü büyük ölçüde dizel ve benzinle çalışan konvansiyonel araçlara bağımlıdır (Review 2025). Toplu taşıma sistemleri sınırlı bir kapsama sahip olup, şehir içi hareketlilik genellikle bireysel motorlu taşıtlarla sağlanmaktadır. Bu durum, fosil yakıt tüketimini önemli ölçüde artırmakta ve şehirdeki hava kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır.

Ulaşım sektöründe sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla önerilen stratejiler şunlardır:

- Elektrikli araçların kullanımını teşvik etmek için pilot programların başlatılması ve gerekli şarj altyapısının kademeli olarak oluşturulması.
- Mevcut toplu taşıma sistemlerinin modernize edilerek kapsamının ve kalitesinin artırılması (örneğin, yetersiz minibüs hatlarının daha kapasiteli otobüs hatlarına dönüştürülmesi).
- Bisiklet yolları ve yaya altyapısının geliştirilmesi yoluyla aktif ulaşım modlarının teşvik edilmesi.
- Araç verimliliği etiketleme sistemlerinin uygulanması ve düşük emisyonlu araçlara yönelik vergi indirimi gibi teşvik mekanizmalarının hayata geçirilmesi.

Ayrıca, ulaşım planlaması ile kentleşme arasındaki yakın ilişki dikkate alınarak, akıllı şehir konseptiyle entegre ulaşım planlama yaklaşımları benimsenmelidir. Bu sayede hem yakıt tasarrufu sağlanabilir hem de trafik kaynaklı emisyonların önemli ölçüde azaltılması mümkün olabilir.

Çizelge 3.7’de ulaşım sektöründeki mevcut sorunlar, stratejik müdahale alanları ve beklenen etkiler özetlenmektedir.

Çizelge 3.7. Ulaşım sektöründe sorunlar ve beklenen etkiler

Sektör	Mevcut Sorunlar	Stratejik Müdahaleler	Beklenen Etkiler
Ulaşım	Fosil yakıtı bağımlılık	Elektrikli araç pilot programları ve altyapı	Emisyonlarda azalma
	Yetersiz toplu taşıma	Toplu taşıma sistemlerinin modernizasyonu ve yaygınlaştırılması	Enerji ithalatının azaltılması
	Hava kirliliği	Bisiklet ve yaya yollarının geliştirilmesi	Şehir içi yaşam kalitesinin artması
	Trafik yoğunluğu	Akıllı ulaşım sistemleri ve entegre planlama	Yakıt tasarrufu ve emisyon azaltımı

Sunulan bu kapsamlı enerji verimliliği stratejileri, yalnızca Herat Şehri'nin enerji tüketimini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda yapay zekâ tabanlı enerji tüketimi senaryoları ile birlikte değerlendirilerek, şehrin sürdürülebilir enerji planlamasına bütünlük bir yaklaşım geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında değerlendirilen enerji tüketimi tahmin modellerinin analizini sunulmaktadır. Bu amaç için SVR algoritması, RF algoritması, FNN algoritması ve LSTM algoritması ağırları dahil olmak üzere bir dizi makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritması kullanılmıştır.

4.1. Model Eğitimi ve Hiper Parametre Ayarlaması

Tüm modeller, mevcut verilerin %80'i kullanılarak eğitilmiş ve kalan %20'si test için kullanılmıştır. Model performansını optimize etmek için ızgara arama ve rastgele arama kullanılarak hiper parametre ayarlaması gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki hiper parametreler araştırılmıştır:

Çizelge 4.1. Farklı modeller için hiper parametre ayarlama konfigürasyonları

Model	Parametre Ayarı	Değerler
SVR algoritması	Scaling Method	MinMax, Robust, Standard
	Kernel	'linear', 'poly', 'rbf'
	Regularization (C)	1, 10, 30 (Best SVR: C=30)
	Epsilon (ϵ)	0,005, 0,01, 0,03
	Gamma (γ)	1, 2, 5
	Shrinking	True, False
RF algoritması	Number of Trees	10, 50, 100, 200
	Maximum Depth	10, 20, 50
	Bootstrap	True, False
	Random State	0, 1, 42
	Scaling Method	Standard, MinMax, Robust, None
	Performance Metric	R ² Score, Mean Squared Error
FNN algoritması	Number of Layers	3–6
	Neurons per Layer	[256, 128, 64, 32], [512, 256, 128, 64, 32], [128, 64, 32]
	Activation Function	relu, sigmoid
	Dropout Rate	0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5
	Optimizer	Adam
	Learning Rate	0,001, 0,01, 0,0001
	Batch Size	16, 32, 64, 128
	Number of Epochs	50, 100, 200
	Weight Initialization	he_normal
	Loss Function	mean_squared_error, R ² Score
	Early Stopping Patience	5, 10, 15
	Scaling Method	Standard, MinMax, Robust
	Regularization (L2)	0,001, 0,01, 0,1

Çizelge 4.1'in devamı

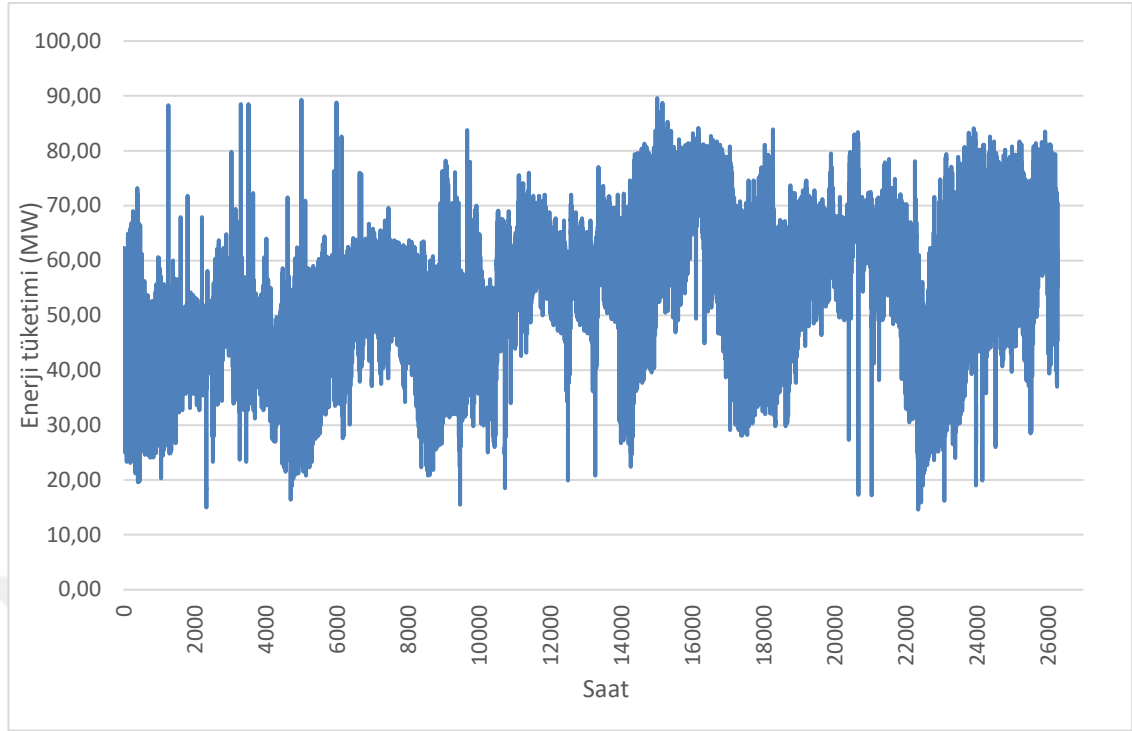
LSTM algoritması	LSTM Layers	1, 2, 3
	Units per LSTM Layer	50, 100
	Dropout Rate	0, 0,2, 0,5
	Batch Normalization	True, False
	Learning Rate	0,001, 0,01, 0,0001
	Optimizer	Adam
	Batch Size	16, 32, 64, 128
	Timesteps	5, 10, 15, 20
	Number of Epochs	50, 100, 300, 500
	Loss Function	mean_squared_error, R ² Score
	Return Sequences	True, False

LSTM için, öğrenme oranı, katman sayısı, birim sayısı, kesme oranı (dropout rate) ve optimizasyon algoritması gibi hiper parametreler, model karmaşıklığı ve performansı arasında denge kurmak için titizlikle kalibre edilmiştir. Mevcut verilerin kısıtlamalarına rağmen, algoritmalar dikkatlice seçilerek ve hiper parametreleri optimize edilerek Herat Şehri için sağlam bir enerji tüketimi tahmin modeli geliştirilmiştir.

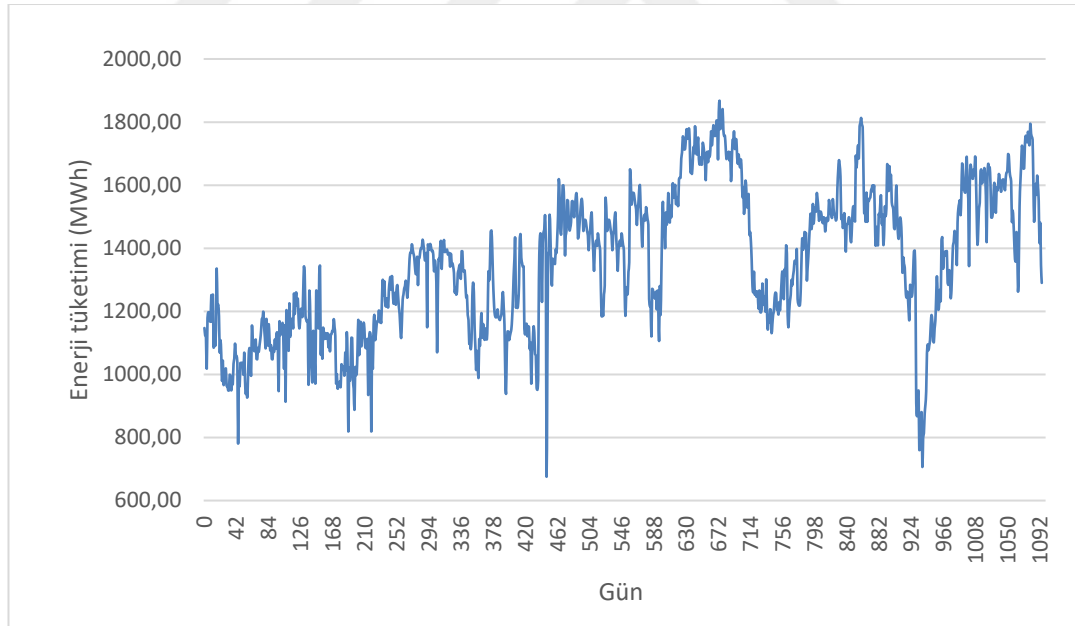
4.2. Model Çıktıları ve Doğruluk Değerlendirmesi

Herat Şehri'nin enerji tüketimi tahmini için oluşturulan modellerin tahmin doğruluğu ve güvenilirliğini nicel olarak karşılaştırmak için MAE, Ortalama MSE ve R² dahil olmak üzere temel performans göstergeleri kullanılmıştır. Hem ortalama hatayı hem de modellerin tüketim eğilimlerindeki varyansı etkili bir şekilde yakalama yeteneklerini dikkate alan bu kriterler, tahmin doğruluğunu ölçmek için yararlı olduğu için seçilmiştir. Farklı modeller ve kurulumlar arasında bu ölçümleri karşılaştırarak, tez kapsamında en doğru tahminleri üreten strateji belirlenmiştir.

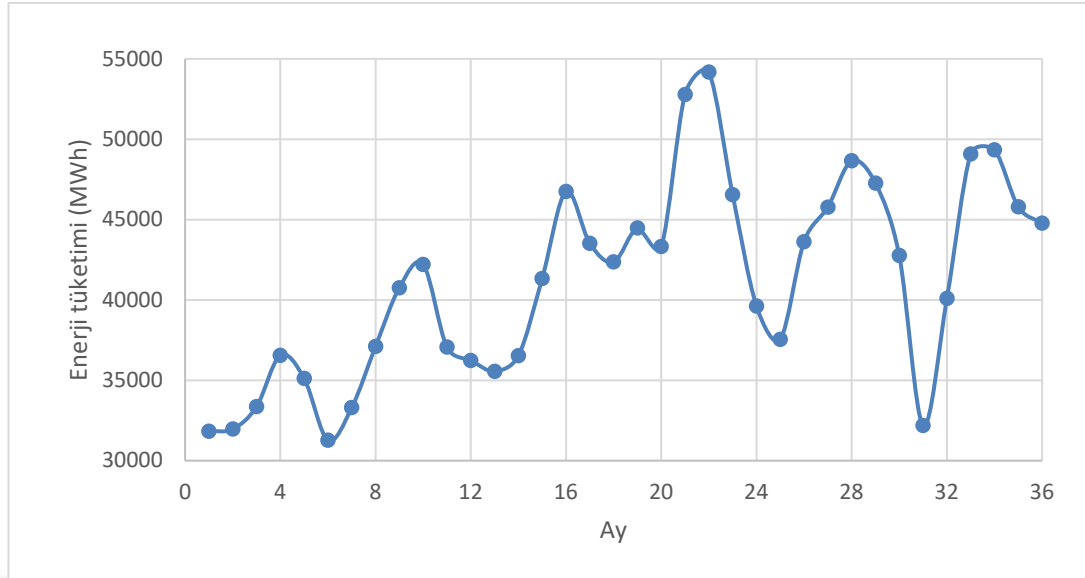
Herat Şehri'nin üç yıllık (Mart 2021 - Mart 2024) enerji tüketim eğilimleri, saatlik, günlük ve aylık profillerle temel karakteristiği sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu temel eğriler ile özellikle tüketim pikleri dikkate alınarak algoritma sonuçları yorumlanmıştır. Veri seti, 21 Mart 2021 ile 21 Mart 2024 tarihleri arasında toplanan 26280 saatlik veriden oluşmaktadır. Bu veri, saatlik (toplam 26280 saat), günlük (1095 gün), haftalık (156 hafta) ve aylık (36 ay) çözünürlükte analiz edilmiştir. Tüm zaman çözünürlüklerinde veriler %80 eğitim ve %20 test olacak şekilde ayrılmıştır. saatlik verilerde 1–21030 arası eğitim, 21031–26280 arası ise test verisi olarak belirlenmiştir. Günlük ölçeğe, 1–875 gün arası eğitim, 876–1095 gün arası test verisi olarak belirlenmiştir. Haftalık ölçeğe, 1–125 hafta arası eğitim, 126–156 hafta arası test verisi; aylık ölçeğe ise 1–29 ay arası eğitim ve 30–36 ay arası test verisi olarak ayrılmıştır.



Şekil 4.1. Herat Şehri saatlik enerji tüketim desenleri



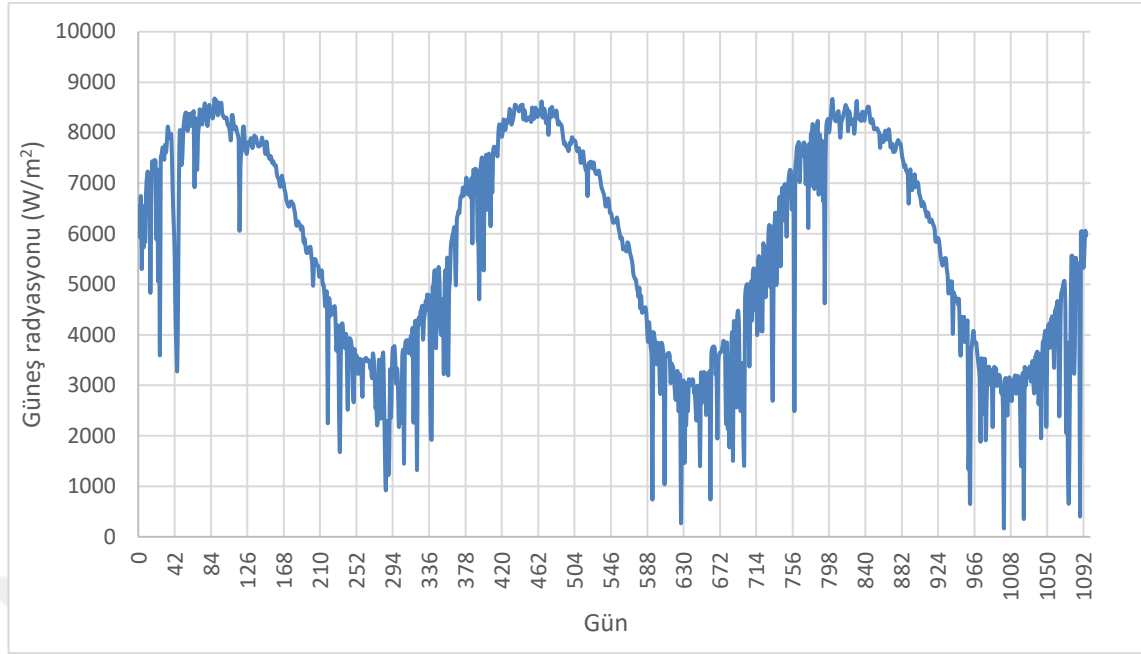
Şekil 4.2. Herat Şehri günlük enerji tüketim desenleri



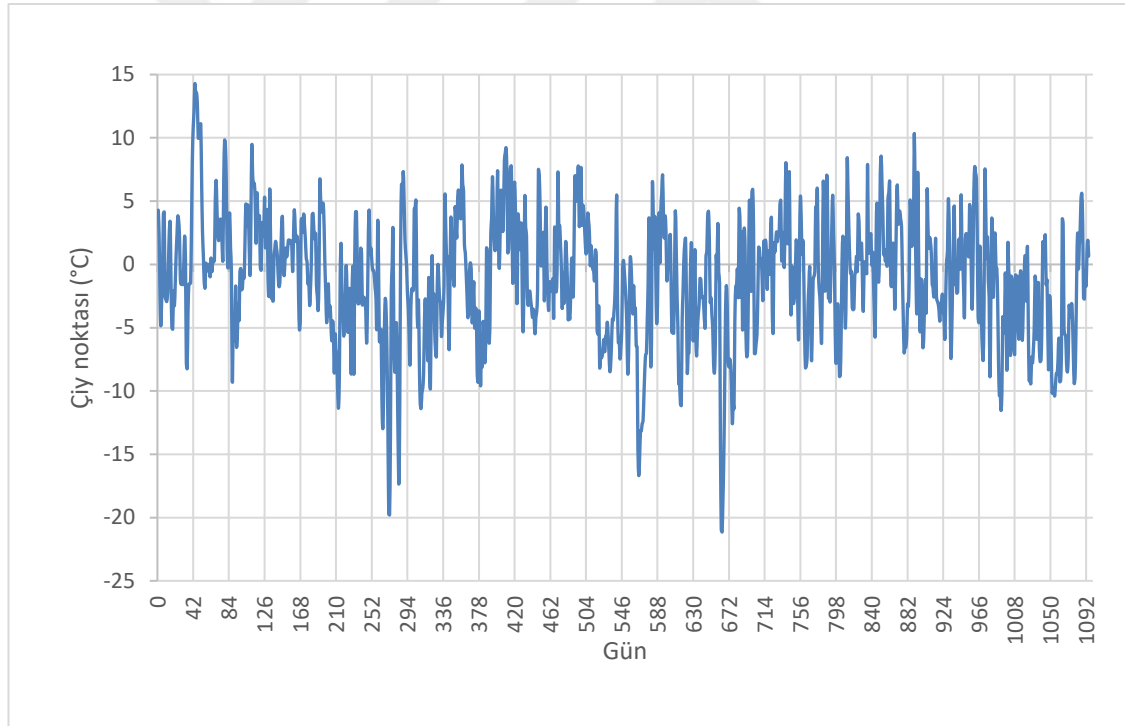
Şekil 4.3. Herat Şehri enerji tüketim aylık mevsimsel değişimler

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te, Herat Şehri'nin Mart 2021 ile Mart 2024 tarihleri arasındaki saatlik, günlük ve aylık elektrik tüketim verilerinin mevsimsel değişimi gösterilmiştir. Yaz aylarında artan klima kullanımı nedeniyle tüketim yükselirken, kış aylarında bazı dönemlerde düşüş görülmektedir. Bu durum, kış mevsiminde yaşanan elektrik sıkıntılarının da kaynaklandığını düşündürmektedir.

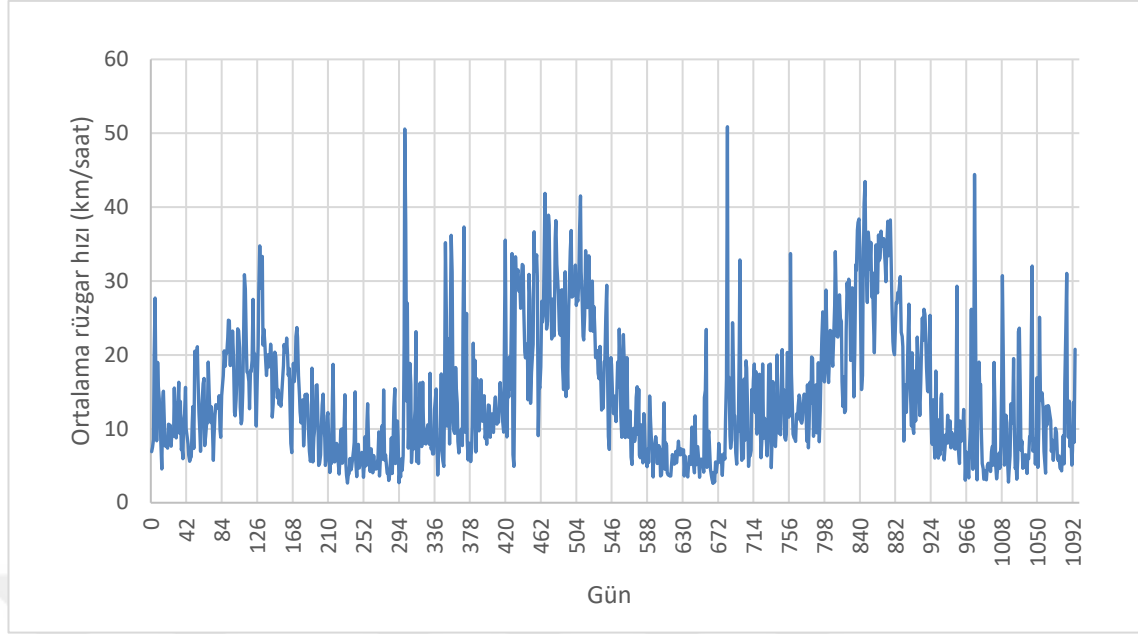
Herat Şehri'nin yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla, 2021-2024 yılları arasındaki günlük güneş radyasyonu, ortalama çiy noktası ve ortalama rüzgar hızı verileri analiz edilmiştir. Şekil 4.4'te sunulan üç yıllık günlük güneş radyasyonu verileri, bölgenin fotovoltaik sistemler için elverişliliğini ve mevsimsel değişimleri açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 4.5 ise çiy noktası verilerinin zaman içindeki değişimini göstermektedir. Şekil 4.6 ise aynı döneme ait ortalama günlük rüzgar hızı dağılımını göstererek, rüzgar enerjisi uygulamaları için temel oluşturmaktadır. Bu veriler, enerji kaynaklarının bölgesel potansiyelini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve özellikle güneş radyasyonu ile rüzgar hızını sürdürülebilir enerji analizlerinde temel parametreler olarak kullanmak için kritik bir başlangıç noktası sağlamaktadır.



Şekil 4.4. Herat Şehri günlük güneş radyasyonu dağılımı



Şekil 4.5. Herat Şehri günlük çiy noktası dağılımı



Şekil 4.6. Herat Şehri ortalama günlük rüzgar hızı dağılımı

SVR Performansı

Bu tez çalışması kapsamında SVR algoritması modeli, Herat Şehri'nde enerji tüketimi tahmini için performansını optimize etmek üzere farklı ön işleme teknikleri ve kernel fonksiyonları kullanılarak kapsamlı bir şekilde test edilmiştir.

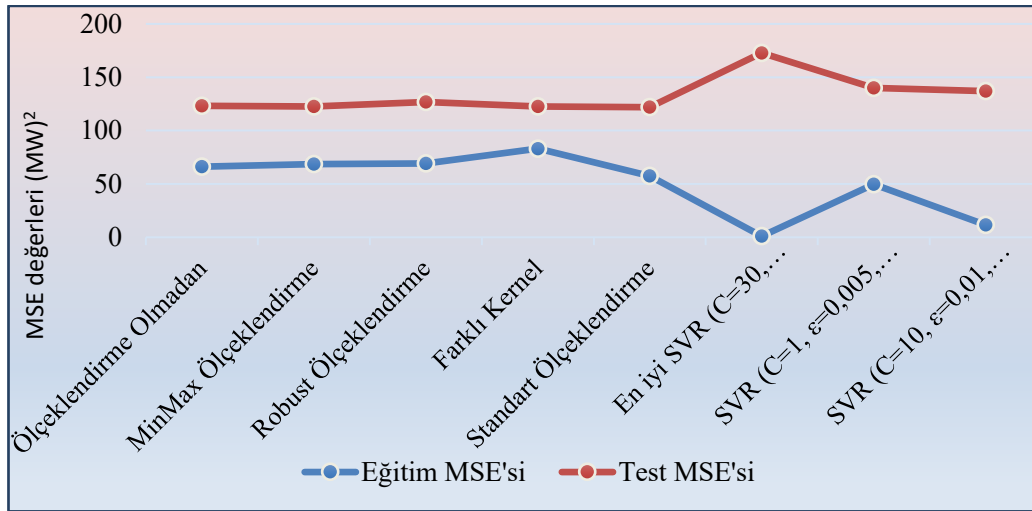
Başlangıçta, RBF kernel'e sahip SVR modeli, ölçeklendirme yapılmadan uygulanmış ve test verileri üzerinde 0,397 R^2 skoru ve 123,27 ortalama kare hata (MSE) ile orta düzeyde performans metrikleri elde edilmiştir. Modelin doğruluğunu artırmak için, MinMax ölçeklendirme ve Robust ölçeklendirme ön işleme adımları olarak kullanılmıştır. Her iki yöntem de test verilerinin R^2 skoru ve MSE'sinde hafif iyileşmeler gösterse de Çizelge 4.2'de gösterildiği gibi MinMax ölçeklendirme, Robust ölçeklendirmeye ($R^2=0,379$, MSE = 126,93) kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir ($R^2=0,401$, MSE = 122,47). Bu bulgular, ölçeklendirmenin SVR model performansını olumlu yönde etkileyebileceğini ancak iyileştirmelerin artımlı olduğunu göstermektedir. Modeli daha da geliştirmek için alternatif kernel fonksiyonları araştırılmıştır. Polinom kernel (derece=5) kullanıldığında, eğitim verilerinde R^2 skoru 0,446'ya düşmüş ve MSE'de ilişkili bir artış gözlemlenmiştir; bu da daha yüksek dereceli polinom kernel'lerin, test veri seti üzerinde önemli faydalar sağlamadan veriye aşırı uyum sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, ek değişkenlerin dahil edilmesi, nemin çıkarılması ve standart ölçeklemenin uygulanması ile modelin doğruluğunu önemli ölçüde artırarak eğitim verileri üzerinde 0,617 R^2 skoru ve 57,41 MSE elde edilmiştir. Bu sonuç, SVR'nin enerji tüketimi tahmini için tahmin gücünü artırmada özellikle mühendisliğin ve uygun ön işleme yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır.

Çizelge 4.2. SVR için çeşitli ölçekleme yöntemleri ve hiper parametre ayarlaması dahil olmak üzere model değerlendirme sonuçları

Ölçeklendirme/Yöntem	Eğitim R ² Skoru	Eğitim MSE'si	Test R ² Skoru	Test MSE'si
Ölçeklendirme Olmadan	0,5596	66,06	0,3972	123,27
MinMax Ölçeklendirme	0,5425	68,63	0,4011	122,47
Robust Ölçeklendirme	0,5388	69,17	0,3793	126,93
Farklı Kernel	0,4458	83,12	0,5613	122,45
Standart Ölçeklendirme	0,6172	57,41	0,4038	121,91
En iyi SVR (C=30, $\epsilon=0,03$, $\gamma=5$)	0,9934	0,99	0,155	172,79
SVR (C=1, $\epsilon=0,005$, $\gamma=1$)	0,6696	49,56	0,3149	140,09
SVR (C=10, $\epsilon=0,01$, $\gamma=2$)	0,9233	11,51	0,3303	136,94

Örneğin, titiz hiper parametre ayarlaması (C=30, $\epsilon=0,03$, $\gamma=5$) ile elde edilen "En İyi SVR" konfigürasyonu, 0,9934'lük oldukça yüksek bir eğitim R² skoru göstermiş, ancak bu performans test setine iyi yansımamış ve önemli ölçüde daha düşük bir test R² skoru olan 0,155 ile sonuçlanmıştır. Bu da güçlü bir şekilde aşırı uyum sağlamaya (overfitting) işaret etmektedir.

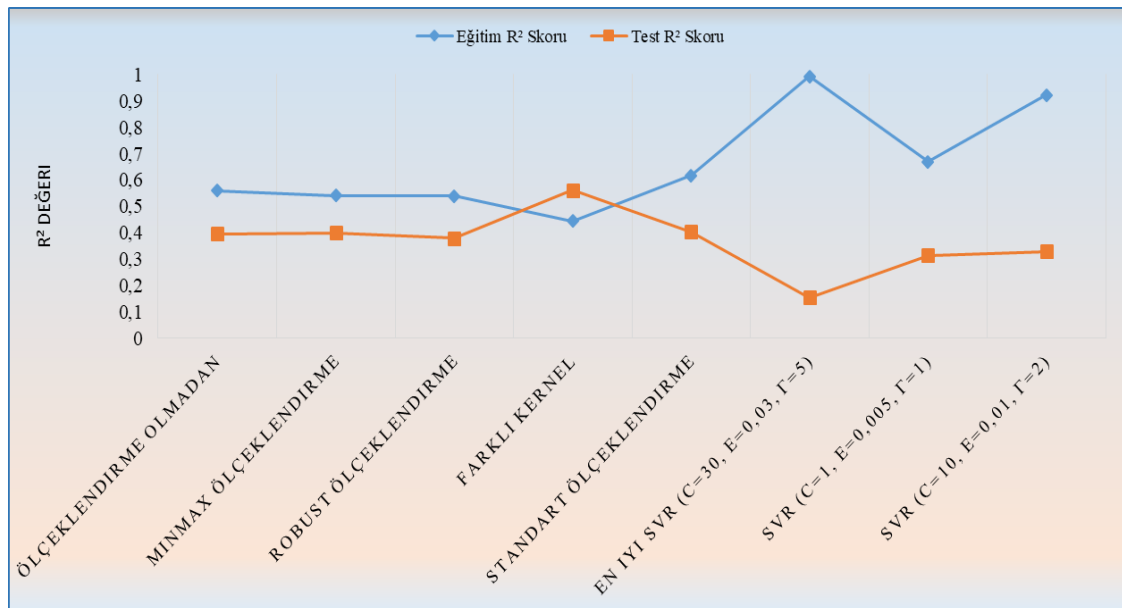
Şekil 4.7 SVR modelinin eğitim ve test verileri üzerindeki Ortalama Karesel Hata (MSE) değerlerini göstermektedir. Bu grafik ile farklı hiper parametre konfigürasyonlarının modelin performansı üzerindeki etkisi görsel olarak sunulmuştur. Eğitim ve test verileri arasındaki MSE farkı, modelin aşırı uyum veya yetersiz uyum eğilimlerini göstermektedir.



Şekil 4.7. SVR modelinin MSE değerlerinin eğitim ve test verilerindeki performansı

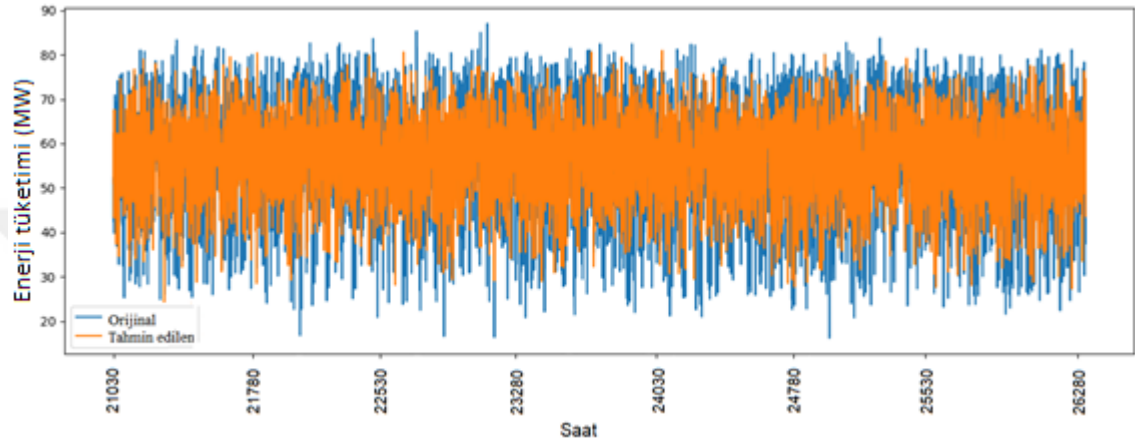
Aksine, SVR ($C=1$, $\epsilon=0,005$, $\gamma=1$) ve SVR ($C=10$, $\epsilon=0,01$, $\gamma=2$) gibi daha düşük eğitim R^2 skorlarına sahip konfigürasyonlar, eğitim ve test arasında daha dengeli bir performans sergilemiştir. Bu da daha iyi genelleme yeteneklerini düşündürmektedir. Bu bulgular, aşırı uyum sağlamayı önlemek ve görülmemiş veriler üzerinde sağlam performans sağlamak için dikkatli hiper parametre ayarlaması ve model seçiminin önemini vurgulamaktadır.

Şekil 4.8, SVR modelinin eğitim ve test verileri üzerindeki R^2 skorlarını karşılaştırmaktadır. R^2 skoru, modelin verilerini ne kadar iyi açıkladığını göstermiştir. Bu grafik ile farklı hiper parametre ayarlarının modelin genelleme yeteneği üzerindeki etkisi görselleştirilmiştir. Eğitim ve test R^2 skorları arasındaki tutarsızlık, modelin aşırı uyum sorununu ortaya koymuştur.



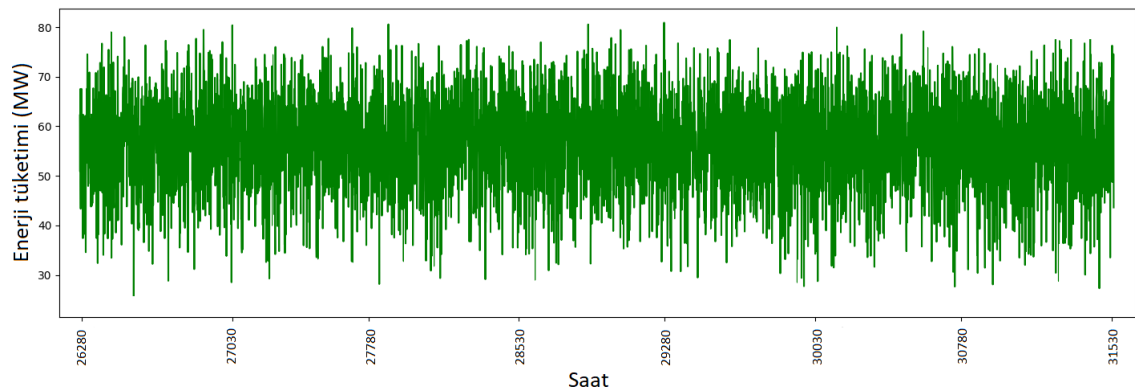
Şekil 4.8. SVR modelinin R^2 skorlarının eğitim ve test verilerindeki performansı

Şekil 4.9'da SVR modelinin tahminlerinin Herat Şehri'nin gerçek enerji tüketimi ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Bu karşılaştırma, toplam 26280 saatlik verinin %80'i (0–21030 saat arası) eğitim verisi olarak kullanılarak eğitilen modelin, geri kalan %20'lik test verisi (21031–26280 saat arası) üzerindeki tahmin performansını yansıtmaktadır. Bu modelin enerji kullanımındaki genel kalıpları doğru bir şekilde tasvir etmesine rağmen, özellikle keskin tüketim dalgalanmaları sırasında bazı önemli farklılıklar olduğu görülmektedir. SVR modeli mükemmel olmasa da tahminleri gözlemlenen değerlere oldukça yakın olduğu için, enerji tüketimi kalıplarını modellemede genellikle uyum içinde olduğu belirlenmiştir.



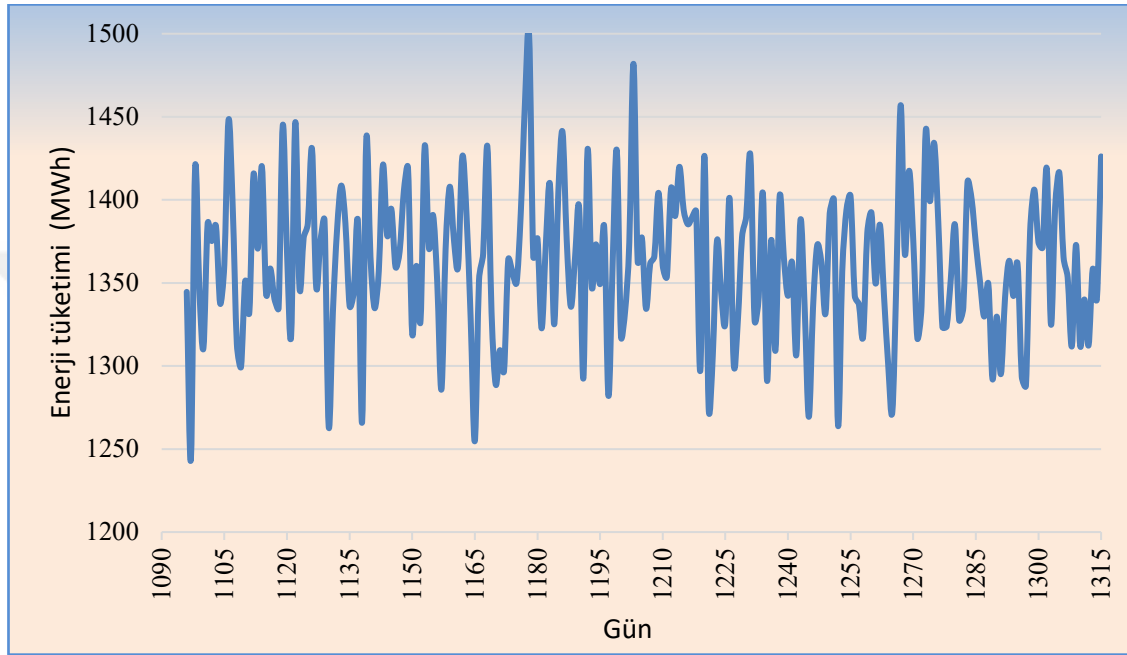
Şekil 4.9. SVR tahmin modelinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu

Herat Şehri için SVR modelinin gelecekteki enerji tüketimi tahminlerinin grafiğinde, Şekil 4.10'da gösterildiği gibi mevsimsel ve zamansal dalgalanmalar yakalanmaktadır. Tahminler, planlama açısından faydalıdır ancak doğrulukları, girdi verilerin doğruluğuna ve modelin genelleme yeteneğine bağlıdır, bu da daha fazla iyileştirme ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu tahminler, geçmişteki 26280 saatlik gözlemsel verilere dayanmaktadır. Geleceğe yönelik tahminler ise bu sürecin hemen ardından başlayarak toplam 5250 saatlik bir dönemi kapsamaktadır (26281–31530 saat arası). Bu uzun vadeli öngörü, Herat Şehri'nin enerji talebine yönelik orta vadeli eğilimlerin incelenmesi ve gelecekteki planlamalara veri temelli katkı sağlanması açısından anlamlı bir referans noktası oluşturmaktadır.



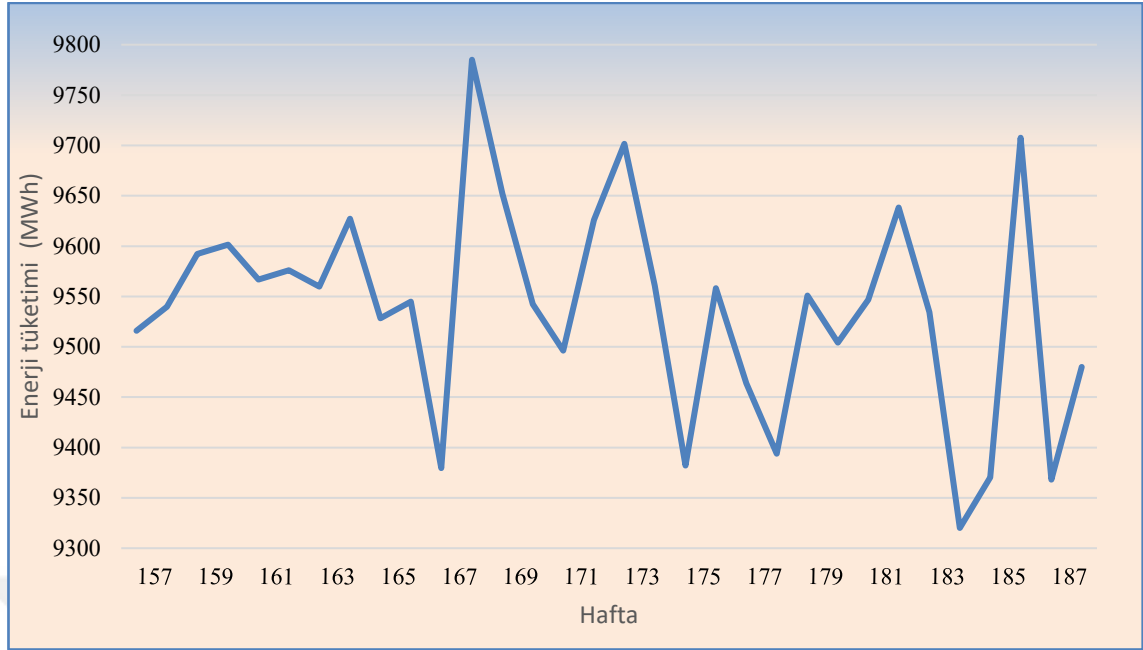
Şekil 4.10. SVR modeli ile Herat şehri için saatlik enerji tüketim tahminleri

Herat Şehri için SVR modeliyle elde edilen günlük enerji tüketimi tahminlerinin grafiğinde, Şekil 4.11'de saatlik dalgalanmaları daha geniş bir perspektifle ele alarak genel tüketim eğilimlerini ortaya koymaktadır. Bu tahminler, günlük operasyonel planlamalar ve kaynak tahsisi için kritik öneme sahiptir. Günlük zirve ve dip noktaları, enerji üretim ve dağıtım sistemlerinin verimli bir şekilde yönetilmesine yardımcı olur. Tahmin süreci, 1095 günlük tarihsel veri temel alınarak gerçekleştirilmiş ve bu verilerin ardından toplam 220 gün boyunca (1096–1315 gün) geleceğe dönük enerji tüketimi öngörülmüştür.



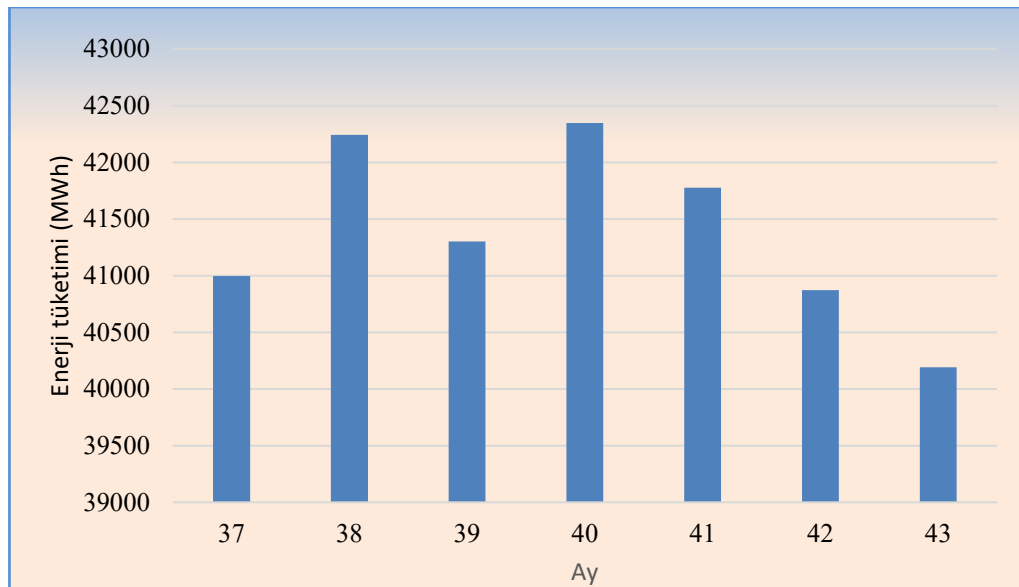
Şekil 4.11. SVR modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri

Şekil 4.12'de Herat Şehri için SVR modeliyle elde edilen haftalık enerji tüketimi tahminleri, iş günleri ve hafta sonları arasındaki farklılıkları dikkate alarak daha uzun vadeli bir görünüm sunar. Bu tahminler, haftalık bakım programları, personel planlaması ve yakıt tedariki gibi stratejik kararlar için temel oluşturur. Haftalık döngüler, enerji tüketimindeki düzenli değişiklikleri göstererek gelecekteki olası dalgalanmalara karşı hazırlıklı olmayı sağlar. Bu analizde, 156 haftalık tarihsel veriye dayanarak model geliştirilmiş ve takip eden 31 hafta boyunca (157–187. haftalar) toplam haftalık enerji tüketimi tahmin edilmiştir.



Şekil 4.12. SVR modeli ile Herat şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri

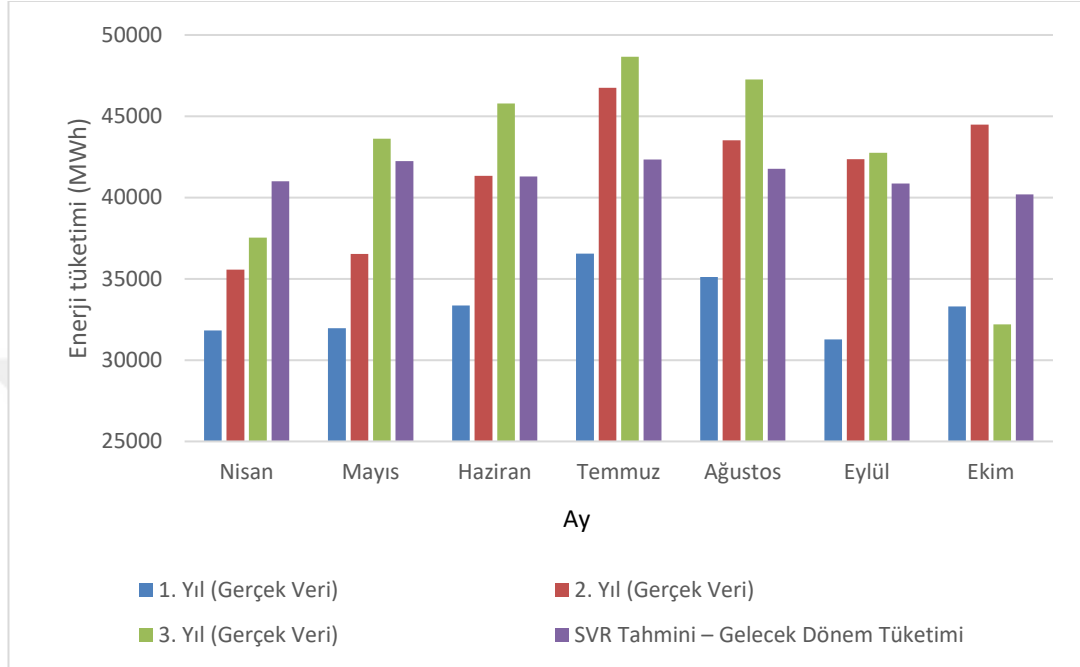
Şekil 4.13'te Herat Şehri'nin aylık enerji tüketim eğilimlerini anlamak için SVR modeliyle tahminler yapılmıştır. Mevsimsel değişiklikler ve önemli olaylar dikkate alınarak oluşturulan bu tahminler, enerji tüketimindeki döngüleri ve potansiyel değişimleri gösterir. Bu çalışmada, 36 aylık tarihsel veri kullanılarak model geliştirilmiş ve ardından 7 aylık bir dönem için (37–43. aylar) toplam enerji tüketimi öngörülmüştür.



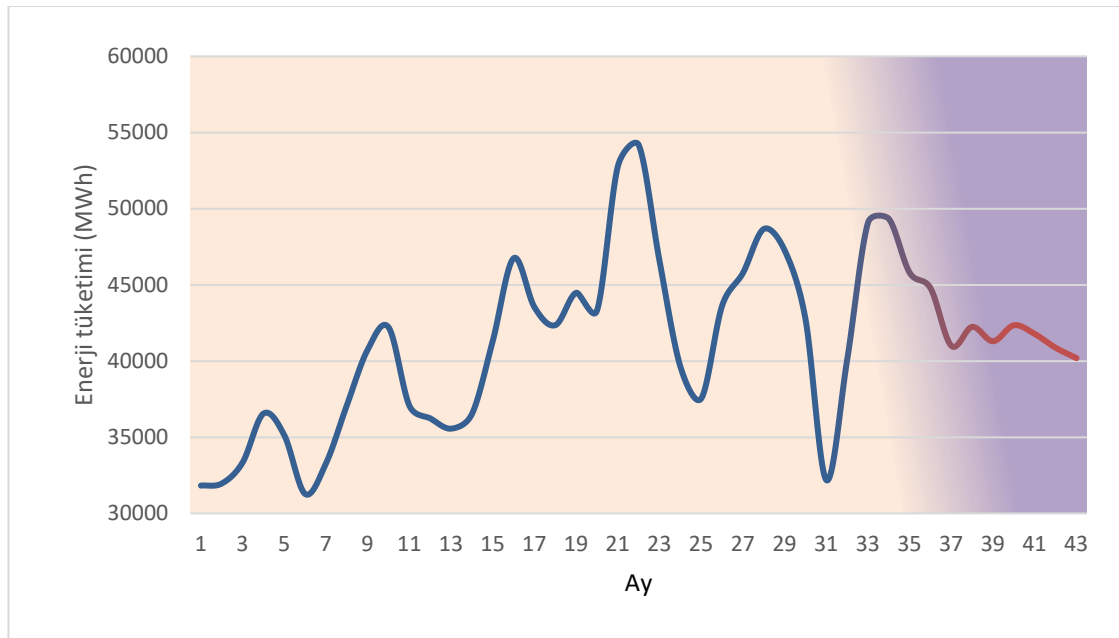
Şekil 4.13. SVR modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri

SVR modelinin tahmin performansı Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.14'te, üç yıllık tarihsel aylık ortalamalarının tahmin edilen gelecek değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.15'te, 1–36. aylar arasındaki

tarihsel veriler ile 37–43. aylar arasındaki tahmin verileriyle kesintisiz birleştiği sürekli bir zaman serisi içindeki eğilim tutarlılığının kanıtlanması gösterilmiştir. Model, geçmiş tüketim eğilimlerini iyi bir şekilde takip etmiş ve gelecek dönem için azalan bir tüketim öngörüsünde bulunmuştur. Bu görsel karşılaştırmalar ile modelin mevsimsel desenleri yakalama ve gelecek tüketimi öngörme yeteneğini doğrulamıştır.



Şekil 4.14. SVR modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması



Şekil 4.15. SVR modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi

RF algoritmasını Performansı

RF modelinin performansı, farklı ağaç derinlikleri ve hiperparametre kombinasyonları kapsamlı şekilde test edilerek optimize edilmiştir. RF algoritması modelinin enerji tüketimi verilerindeki karmaşık kalıpları yakalama yeteneği, farklı maksimum ağaç derinlikleri (10, 20 ve 50) kullanılarak test edilmiştir.

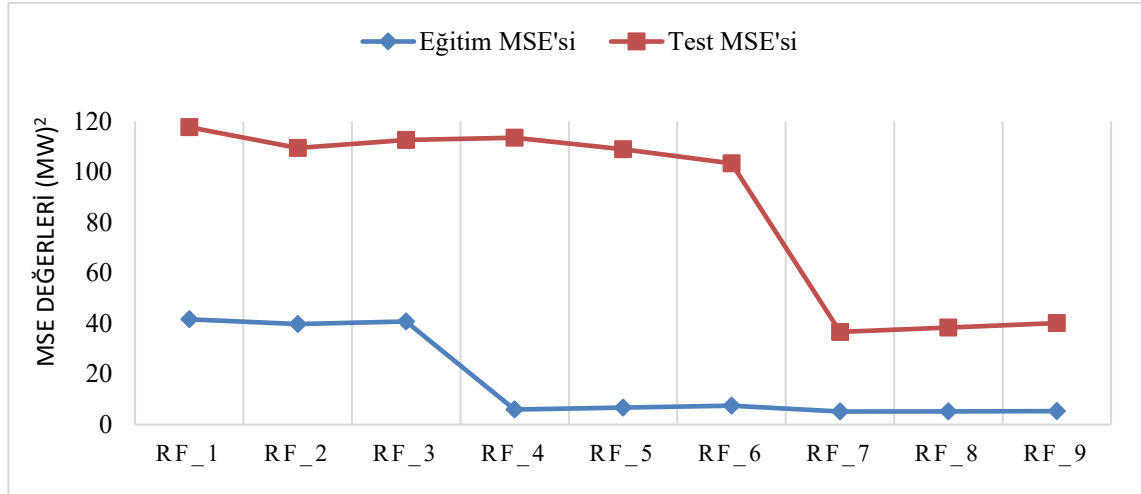
İlginç bir şekilde, önceki bulguların aksine, maksimum ağaç derinliği 50'ye yükseltildiğinde test performansı önemli ölçüde iyileşmiştir. Çizelge 4.3'te gösterildiği gibi, test R^2 skoru, modelin bilinmeyen verilere genelleme kapasitesinde önemli bir iyileşme göstererek 0,4449'dan (max_depth=20) 0,7765'e (max_depth=50) yükselmiştir. Bu durumda, modelin karmaşıklığı artırıldıkça, modelin verilerdeki temel kalıpları tanımlama kapasitesinin artırıldığı ve aşırı uyum sağlanmadığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.3. Farklı maksimum derinlik değerlerine sahip RF model değerlendirme sonuçları; eğitim ve test setlerindeki performansları

Model	Model Yapılandırması	Eğitim R^2 Skoru	Eğitim MSE'si	Test R^2 Skoru	Test MSE'si
RF_1	RF (max_depth=10, random state = 0)	0,7223	41,65	0,4246	117,67
RF_2	RF (max_depth=10, random state = 1)	0,7642	39,79	0,4353	109,45
RF_3	RF (max_depth=10, random state = 42)	0,7326	40,78	0,4311	112,65
RF_4	RF (max_depth=20, random state = 0)	0,9604	5,94	0,4449	113,52
RF_5	RF (max_depth=20, random state = 1)	0,9326	6,72	0,4738	108,94
RF_6	RF (max_depth=20, random state = 42)	0,9048	7,43	0,511	103,36
RF_7	RF (max_depth=50, random state = 1)	0,9686	5,16	0,7765	36,67
RF_8	RF (max_depth=50, random state = 1)	0,9613	5,18	0,7512	38,44
RF_9	RF (max_depth=50, random state = 1)	0,934	5,35	0,7235	40,12

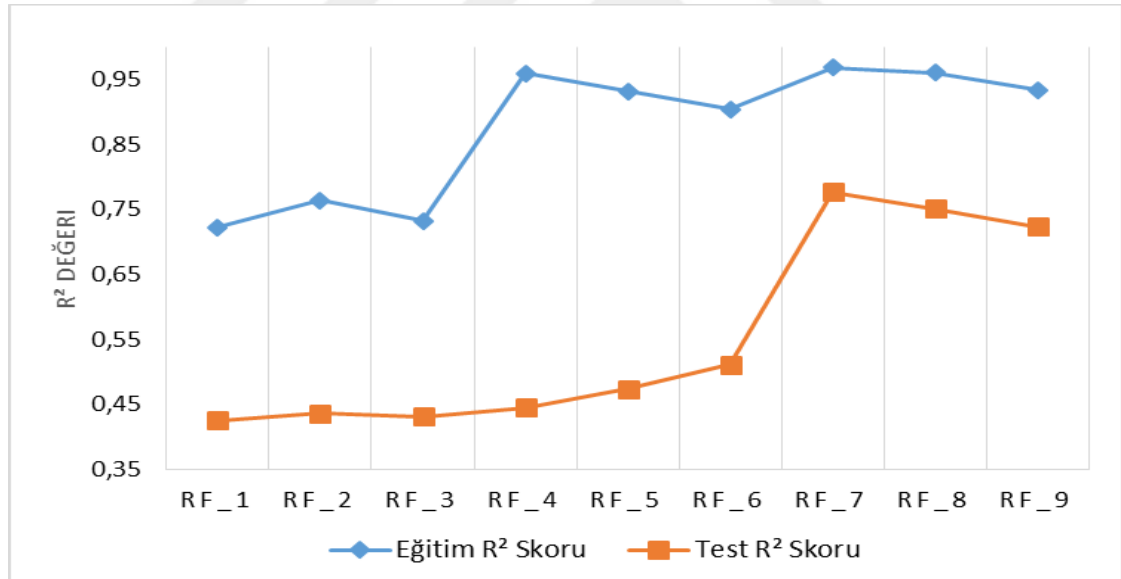
Bu sonuçlar, model karmaşıklığı ve genelleme kabiliyeti arasında ideal dengeyi sağlamak için hiper parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanmasının ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır. İlk çalışmalarda görüldüğü gibi, karmaşıklığı artırmak bazen aşırı uyum sağlamaya yol açabilir, ancak model verilerdeki temel kalıpları başarıyla yakaladığında, model performansında da önemli kazanımlar elde edilebilir.

Şekil 4.16, RF modelinin eğitim ve test verileri üzerindeki MSE değerlerini göstermektedir. Bu grafik, modelin farklı veri setlerindeki tahmin doğruluğunu ve tutarlılığını görselleştirir. Eğitim ve test MSE değerleri arasındaki fark, modelin aşırı uyum veya yetersiz uyum eğilimlerini ortaya koyar.



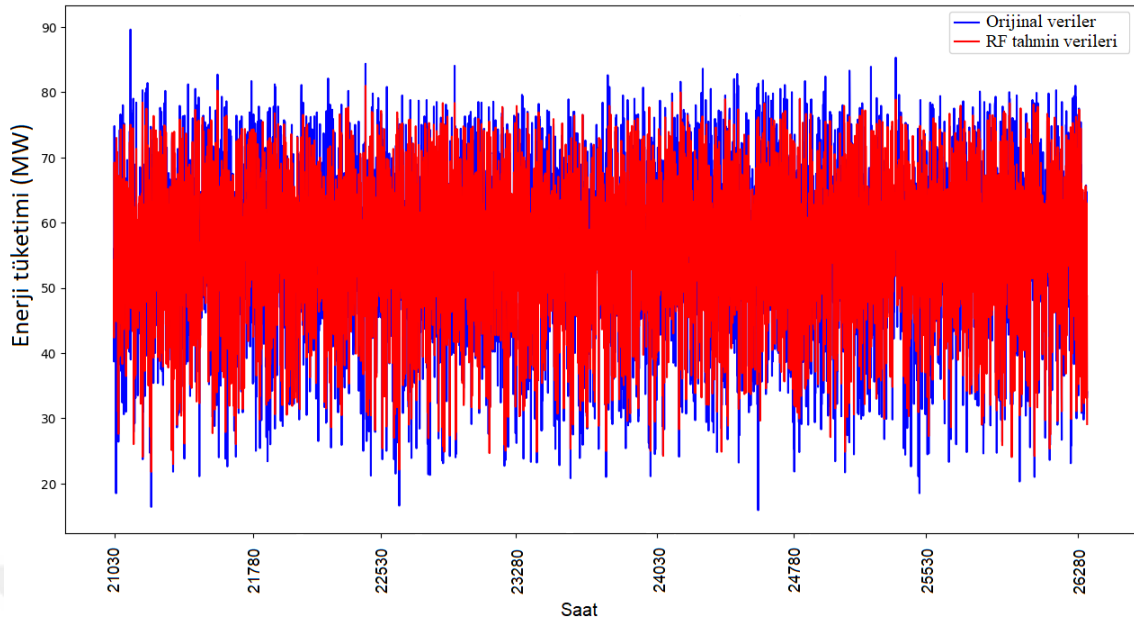
Şekil 4.16. RF modelinin MSE değerlerinin eğitim ve test verilerindeki performansı

Şekil 4.17, RF modelinin eğitim ve test verileri üzerindeki R^2 skorlarını karşılaştırmaktadır. R^2 skoru, modelin verileri ne kadar iyi açıkladığını ölçer. Bu grafik, modelin genelleme yeteneğini ve farklı veri setlerindeki performansını değerlendirmeye yardımcı olur. Eğitim ve test R^2 skorları arasındaki tutarlılık, modelin güvenilirliğini ve sağlamlığını gösterir.



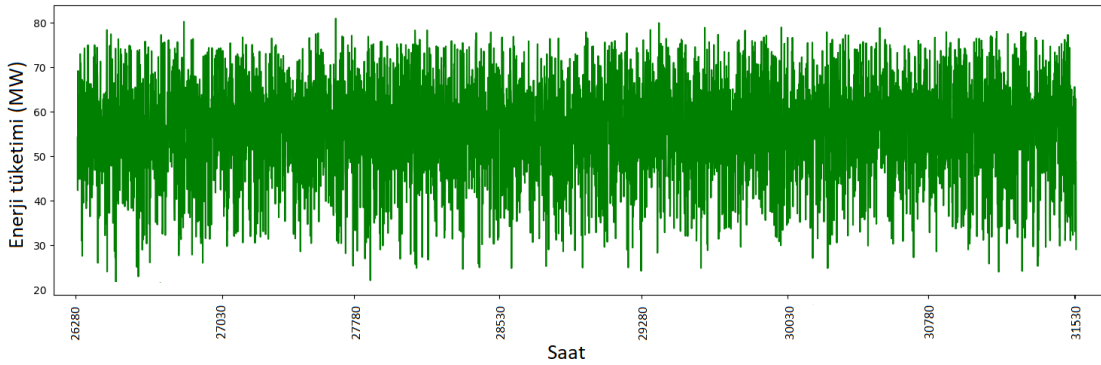
Şekil 4.17. RFmodelinin R^2 skorlarının eğitim ve test verilerindeki performansı

Şekil 4.18, RF modelinin öngördüğü enerji tüketimi ile Herat Şehri'nin gerçek enerji tüketimi arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Bu karşılaştırma, toplam 26280 saatlık verinin %80'i (0–21030 saat arası) eğitim verisi olarak kullanılarak eğitilen modelin, geri kalan %20'lik test verisi (21031–26280 saat arası) üzerindeki tahmin performansını yansıtmaktadır. Model, tarihsel verilerde bulunan mevsimsel ve günlük dalgalanmaları temsil edebilme açısından saygın bir kapasite sergilemektedir. Model, genellikle enerji tüketiminin genel eğilimini takip etse de bazen tepe noktası tüketim dönemlerini fazla veya eksik tahmin edebilmektedir.



Şekil 4.18. Optimize edilmiş RF modelinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu

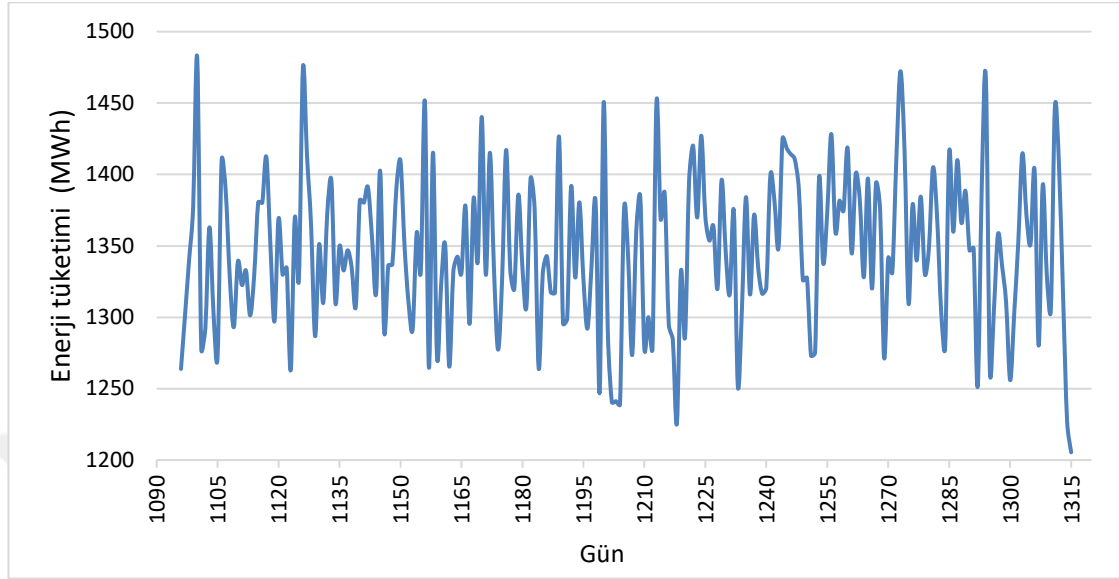
Ayrıca, Şekil 4.19, Herat Şehri'nin gelecekteki enerji tüketimi için modelin projeksiyonlarını göstermektedir. Bu tahminler, enerji kullanımında olası gelecekteki kalıplar hakkında bilgilendirici bilgiler sunar ve bu da kaynak tahsisi ve altyapı tasarım kararları için önemlidir. RF modeliyle gerçekleştirilen ileriye dönük enerji tüketimi öngörülleri, daha önce analiz edilen toplam 26280 saatlik veri seti temel alınarak oluşturulmuştur. Tahmin süreci, bu verilerin sona erdiği noktadan itibaren başlamış olup, yaklaşık 5250 saatlik bir zaman aralığını kapsamaktadır (26281–31530 saat). Bu yaklaşım, modelin mevcut eğilimleri takip ederek gelecekteki olası enerji talebini ortaya koymasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.19. Optimize edilmiş RF modeli ile Herat şehri için saatlik enerji tüketim tahminleri

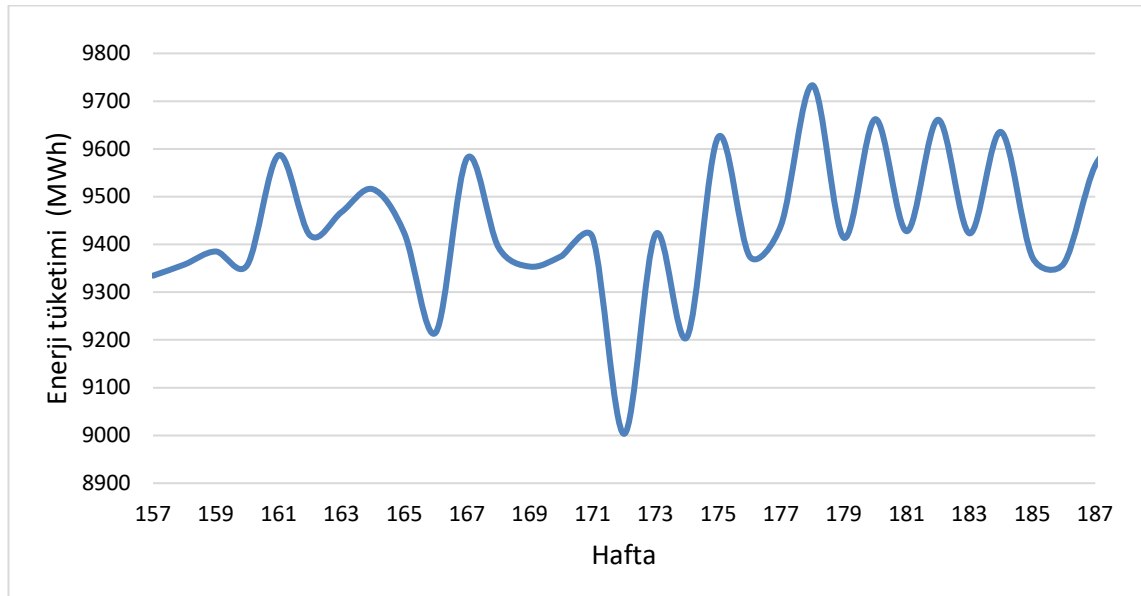
RF modeli, Herat Şehri'nin günlük enerji tüketimini tahmin etmek için kullanılmıştır. Şekil 4.20'de modelin günlük tahminleri, tüketimdeki yüksek ve düşük noktaları yakalayıp dinamik bir görünüm sunmaktadır. Bu tahminler, günlük enerji yönetimi ve dağıtım planlaması için önemli bir araç olarak hizmet edebilir. Tahminler,

toplam 1095 günlük tarihsel veri seti esas alınarak yapılmış olup, bu dönemin hemen sonrasındaki 220 günlük süreyi (1096–1315 gün) kapsayacak şekilde geleceğe yönelik enerji tüketimi projeksiyonları oluşturulmuştur.



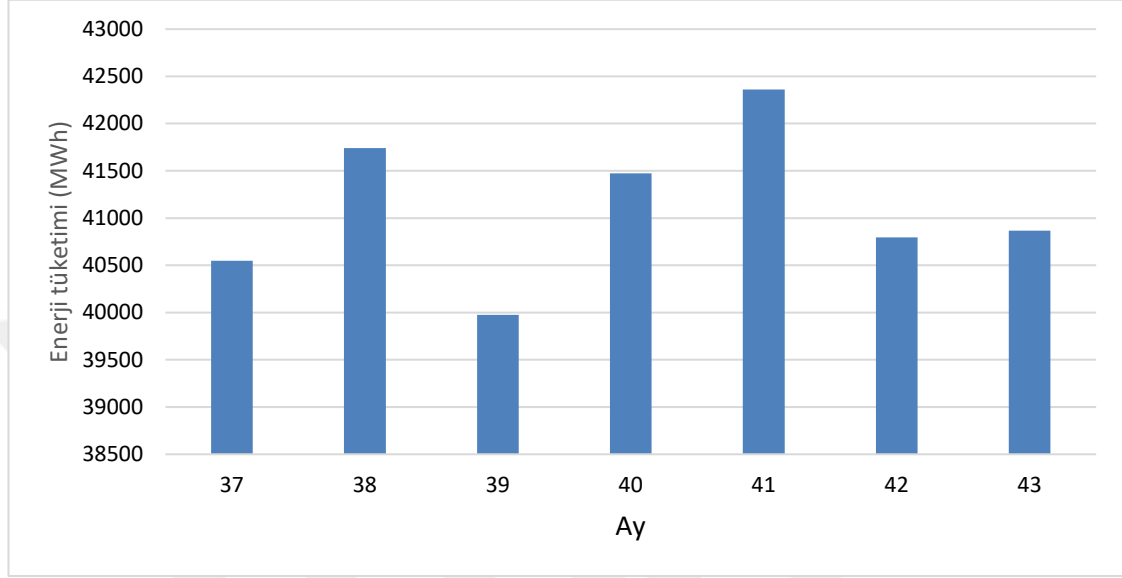
Şekil 4.20. RF modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri

Herat Şehri'nin haftalık enerji tüketim desenleri, RF modeli ile analiz edilmiştir. Şekil 4.21, modelin haftalık tahminlerini göstermektedir ve bu tahminler, haftanın farklı günlerinde enerji tüketimindeki belirgin değişiklikleri vurgulamaktadır. Bu analizde, 156 haftalık geçmiş veri kullanılarak model oluşturulmuş ve bunu takiben gelen 31 haftalık dönem (157–187. haftalar) için toplam haftalık enerji tüketimi öngörülmüştür.



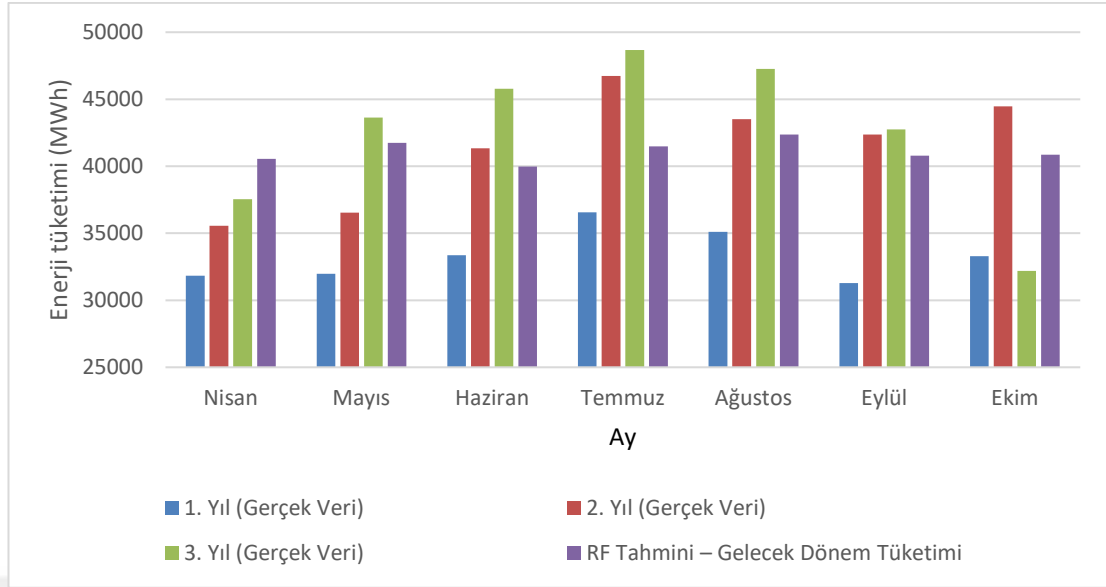
Şekil 4.21. RF modeli ile Herat şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri

Aylık enerji tüketimindeki eğilimleri anlamak için RF modeli kullanılmıştır. Şekil 4.22, modelin aylık tahminlerini sunarak mevsimsel değişikliklerin ve diğer uzun vadeli faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu tahminler, uzun vadeli enerji stratejileri ve planlamaları için temel oluşturabilir. Bu çalışmada, 36 aylık tarihsel veri kullanılarak model geliştirilmiş ve ardından 7 aylık bir dönem için (37–43. aylar) toplam enerji tüketimi öngörülmüştür.

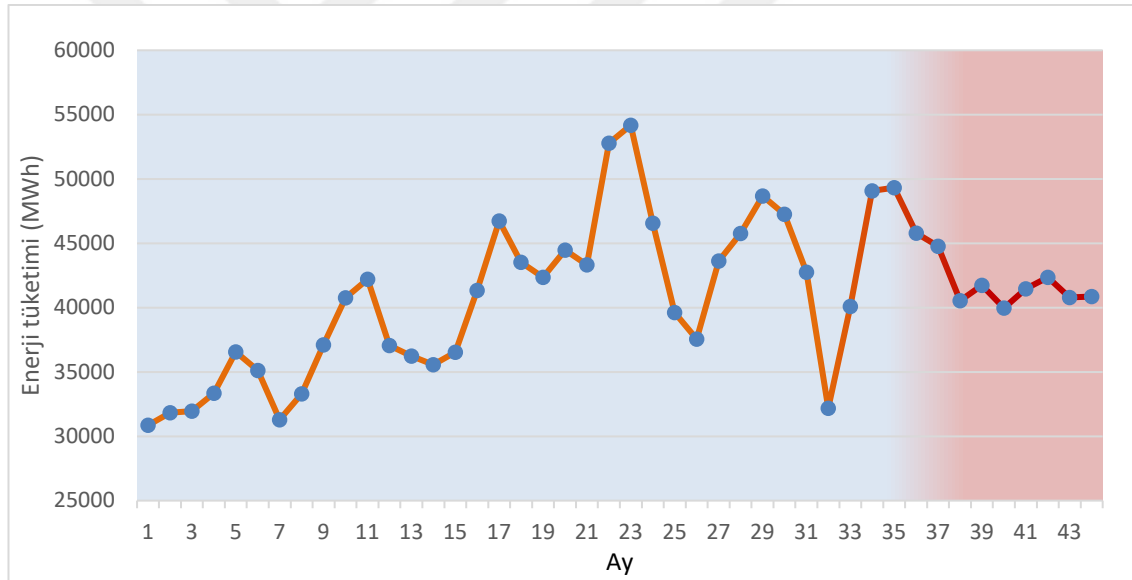


Şekil 4.22. RF modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri

Şekil 4.23, üç yıllık tarihsel aylık ortalamalarının tahmin edilen gelecek değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Grafik, tüketimin Nisan-Ekim arasında 48000 MWh'dan 39000 MWh'a düşen mevsimsel bir dalgalanma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Gelecek tahminleri, önceki yılların eğilimleriyle genel olarak uyumlu görünmektedir. Şekil 4.24'te, 1–36. aylar arasındaki tarihsel veriler ile 37–43. aylar arasındaki tahmin verileriyle kesintisiz birleştiği sürekli bir zaman serisi içindeki eğilim tutarlılığının kanıtlanması gösterilmiştir. Bu görseller, RF modelinin karmaşık tüketim desenlerini işlemedeki sağlamlığını doğrulamaktadır.



Şekil 4.23. RF modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması



Şekil 4.24. RF modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi

FNN algoritmasını Performansı

Karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri temsil etme kapasitesini kullanarak Herat Şehri'nin enerji tüketimini tahmin etmek için FNN algoritması uygulanmıştır. Performansı en üst düzeye çıkarmak için ağ, çeşitli topolojiler ve hiper parametreler kullanılarak geri yayılım algoritması ile eğitilmiştir.

İlk sonuçlara göre, FNN, hem eğitim hem de test aşamalarında daha basit modellere üstünlük göstermiş ve önemli tüketim kalıplarını başarıyla yakalamıştır. İleri Beslemeli Sinir Ağı modeli, değişen epoch sayıları, toplu işlem boyutları (batch size) ve öğrenme oranları gibi farklı hiper parametre konfigürasyonları ile Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi değerlendirilmiştir. Epoch sayısının 50'den 500'e artırılması, R^2

skorlarındaki kademeli artış ve MSE değerlerindeki azalma ile kanıtlandığı üzere, genel olarak performansı artırmıştır. Bununla birlikte, epoch sayısının 500'ün üzerine çıkarılması, önemli performans kazanımlarına yol açmamıştır. Toplu işlem boyutunun ayarlanması da performansı etkilemiştir. 32'lik bir toplu işlem boyutu (Model No. 5), en yüksek R^2 skorunu (0,7868) ve en düşük MSE'yi (34,85) elde etmiş, bu da bu toplu işlem boyutunun bu belirli model ve veri seti için optimum olabileceğini düşündürmektedir. Öğrenme oranı da model performansını etkilemiştir. 0,001 öğrenme oranı, daha yüksek öğrenme oranlarına (0,01, 0,005) sürekli olarak üstünlük göstermiş, bu da daha düşük bir öğrenme oranının modelin daha etkili bir şekilde yakınsamasına izin verdiğini göstermektedir.

Çizelge 4.4. Sinir ağı modeli değerlendirmesi, dönem sayısına, parti büyüklüğüne ve öğrenme oranına dayanmaktadır.

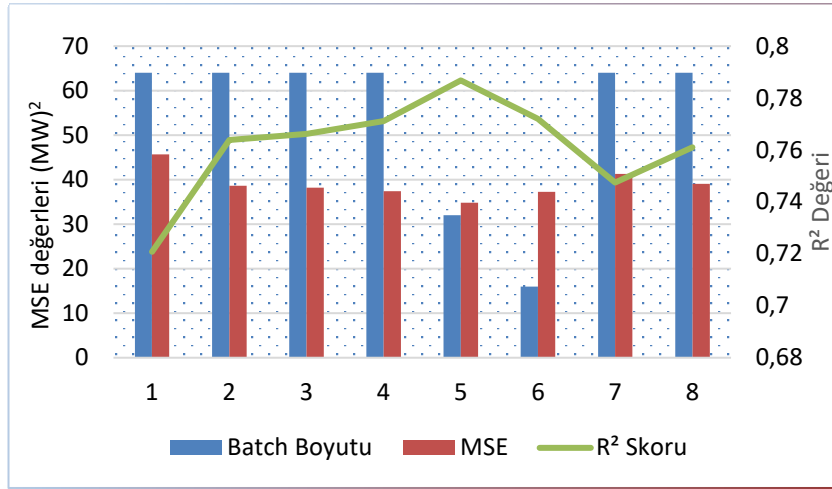
Model Numarası	Epoch Sayısı	Batch Boyutu	Öğrenme Oranı	R^2 Skoru	MSE
1	50	64	0,001	0,7208	45,65
2	200	64	0,001	0,7639	38,6
3	300	64	0,001	0,7662	38,23
4	500	64	0,001	0,7711	37,43
5	500	32	0,001	0,7868	34,85
6	500	16	0,001	0,772	37,27
7	500	64	0,01	0,7475	41,28
8	500	64	0,005	0,7610	39,05

Bu analizden elde edilen temel çıkarımlar:

- Epochların Etkisi: Epoch sayısının artırılması genel olarak model performansını artırmıştır, ancak belirli bir noktadan sonra azalan getiriler gözlemlenmiştir.
- Toplu İşlem Boyutunun Etkisi: Toplu işlem boyutu, model performansını önemli ölçüde etkilemiş, bu durumda daha küçük bir toplu işlem boyutu (32) en iyi sonuçları vermiştir.
- Öğrenme Oranına Duyarlılık: Modelin performansı, öğrenme oranına duyarlı olduğu için genellikle daha küçük öğrenme oranları daha iyi sonuç vermiştir.

Sinir ağı modelinin performansını etkileyen önemli faktörlerden biri de batch boyutudur. Şekil 4.25'te, farklı batch boyutlarının modelin R^2 skoru ve MSE değerleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Grafikte, batch boyutunun değiştirilmesiyle modelin eğitim ve test verilerindeki performansının nasıl değiştiği görsel olarak sunulmaktadır. Özellikle, belirli bir batch boyutunun (32) diğerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği ve

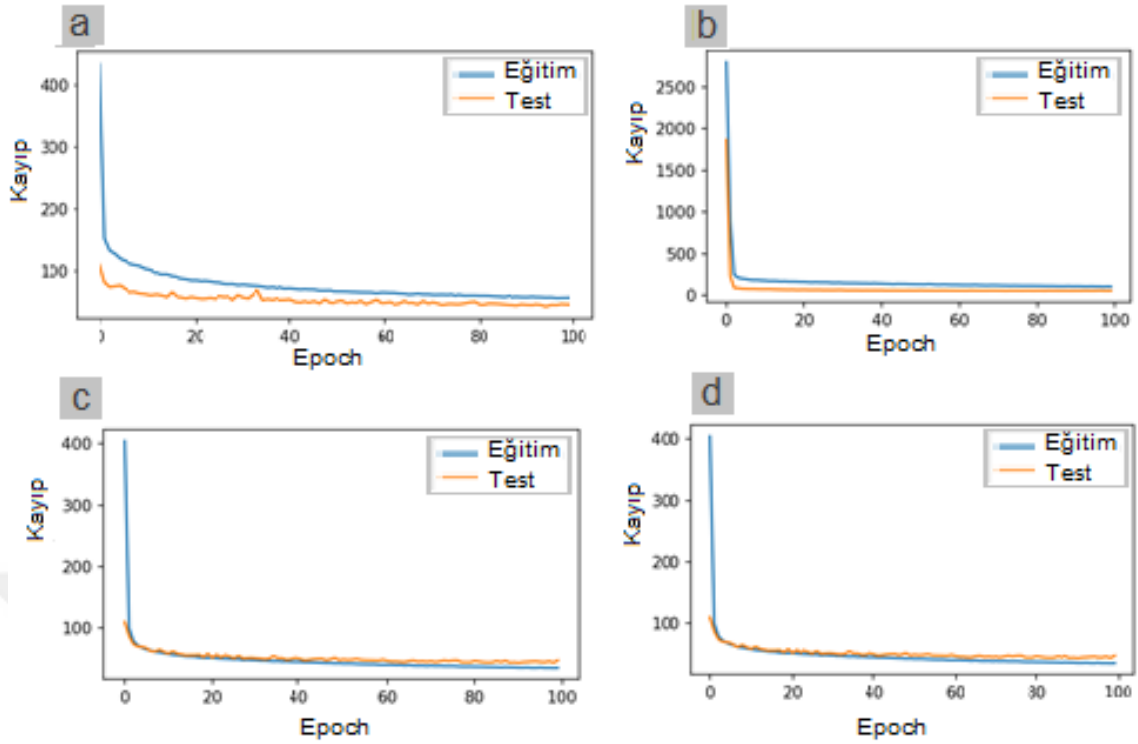
modelin genelleme yeteneğini artırdığı gözlemlenmektedir. Bu grafik, Herat Şehri enerji tüketim tahminleri için en uygun batch boyutunun belirlenmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 4.25. Farklı batch boyutlarına göre sinir ağı modellerinin R² skoru ve MSE değerleri

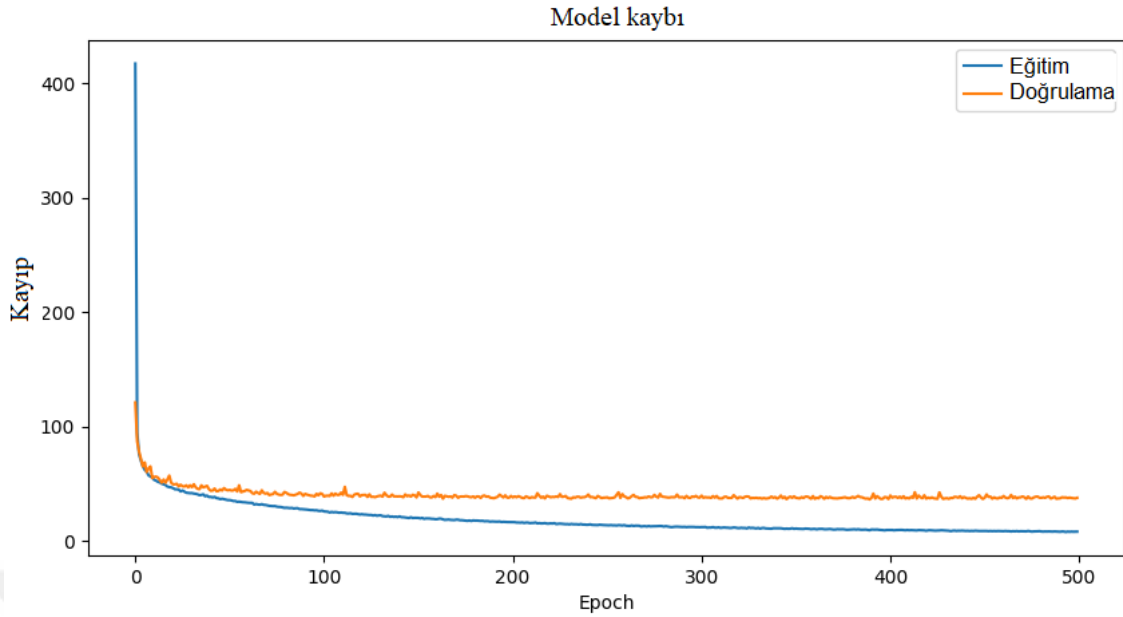
Bu bulgular, enerji tüketimi tahmini için İleri Beslemeli Sinir Ağı modelinin performansını optimize etmede hiper parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanmasının önemini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, daha derin mimariler bazı aşırı uyum sağlama (overfitting) durumları göstermiş, bu da dropout ve erken durdurma gibi düzenleme (regularization) stratejilerinin kullanımını gerekli kılmıştır. Doğru şekilde ayarlandığında, Sinir ağı, enerji tahmini için kullanılabilir, bu da enerji tüketimi verilerindeki karmaşık bağımlılıkları ne kadar iyi yakaladığını göstermektedir.

Şekil 4.26, Sinir Ağı modelinin hiperparametre optimizasyonu sürecinin ilk aşamalarını göstermektedir. Dört farklı konfigürasyonun (a, b, c, d) enerji tüketimi tahmin performansları, modelin hiperparametrelerinin (epoch, batch boyutu, öğrenme oranı, dropout oranı) etkisini anlamak için sunulmuştur. Bu aşamada elde edilen sonuçlar, nihai model için yeterli doğruluğu sağlamamaktadır. Ancak, bu denemeler, hiperparametrelerin modelin performansını nasıl etkilediğine dair değerli bilgiler sunmakta ve daha iyi sonuçlar elde etmek için sonraki optimizasyon adımlarına rehberlik etmektedir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde iyi sonuçların elde edilmediği ilk aşamayı göstermektedir.



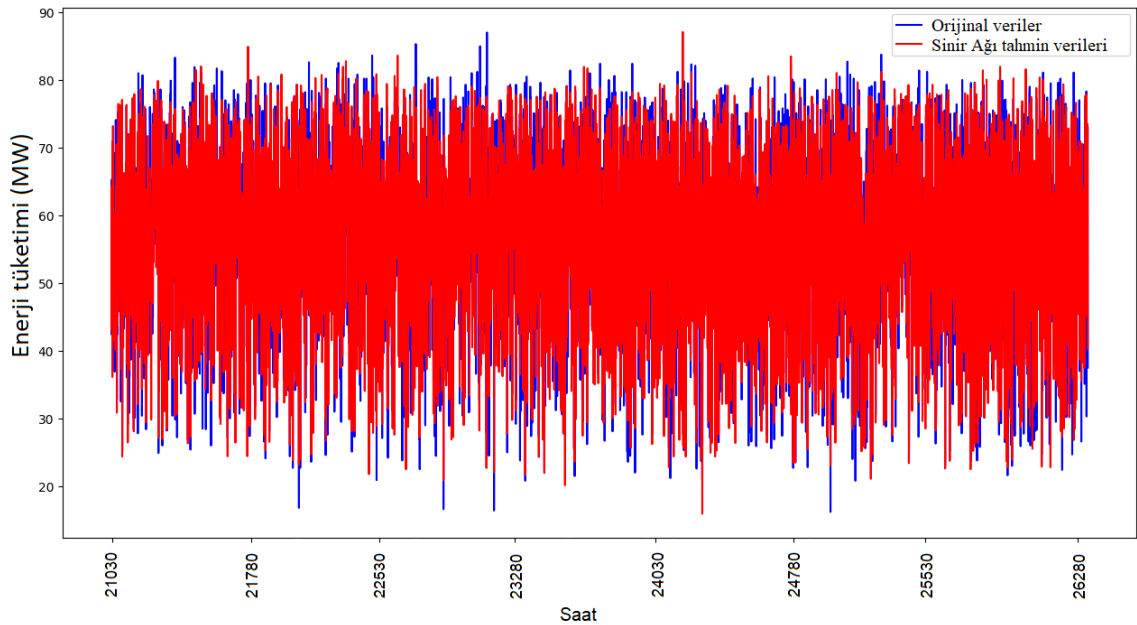
Şekil 4.26. Sinir ağı modelinin hiperparametre denemeleri: ilk sonuçların değerlendirilmesi; a) epoch 100, batch boyutu 64, öğrenme oranı 0,1, dropout 0,2; b) epoch 300, batch boyutu 128, öğrenme oranı 0,01, dropout 0,3; c) epoch 100, batch boyutu 16, öğrenme oranı 0,05, dropout 0,1; d) epoch 50, batch boyutu 32, öğrenme oranı 0,001, dropout 0,4

İleri Beslemeli Sinir Ağı modelinin eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, eğitim kaybının epoch sayısı arttıkça sürekli olarak azalmasıyla, modelin eğitim verilerinden başarıyla öğrendiği kanıtlanmaktadır. İlginç bir şekilde, doğrulama kaybı da önce düşmekte ve ardından sabitlenmekte, bu da modelin aşırı uyum sağlamadığını ve yeni verilere iyi bir şekilde genelleme yaptığını göstermektedir. Doğrulama kayıp eğrisinin sabit davranışı, modelin mantıksal bir sonuca ulaştığını göstermektedir.



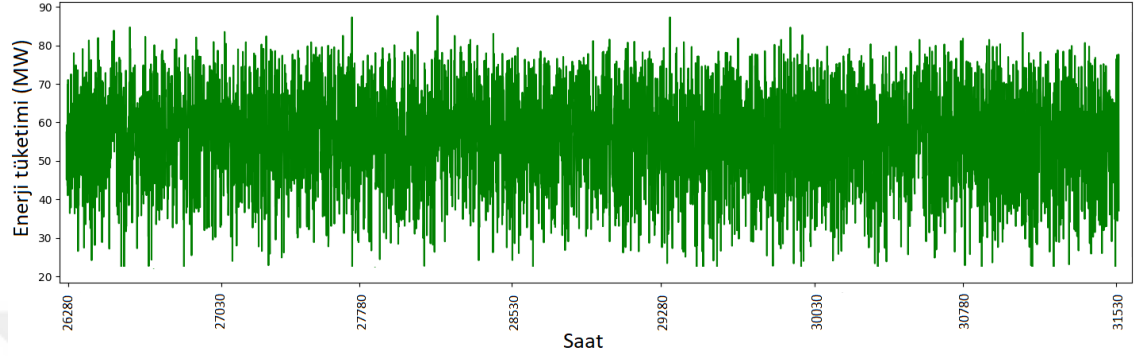
Şekil 4.27. Sinir ağı modeli için eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri

Şekil 4.28, modelin enerji tüketimindeki saatlik ve mevsimsel değişimleri ne kadar iyi yakaladığını göstermektedir. Bu karşılaştırma, toplam 26280 saatlik verinin %80'i (0–21030 saat arası) eğitim verisi olarak kullanılarak eğitilen modelin, geri kalan %20'lik test verisi (21031–26280 saat arası) üzerindeki tahmin performansını yansıtmaktadır. Model genellikle enerji tüketiminin genel eğilimini takip etse de özellikle tüketim en yüksek seviyede iken, tahminlerin gerçek okumalara uymadığı durumlar olabilir. Bu farklılıklar, beklenmedik olaylar, havada ani değişiklikler veya kaydedilmemiş sosyoekonomik güçler tarafından tetiklenebilir.



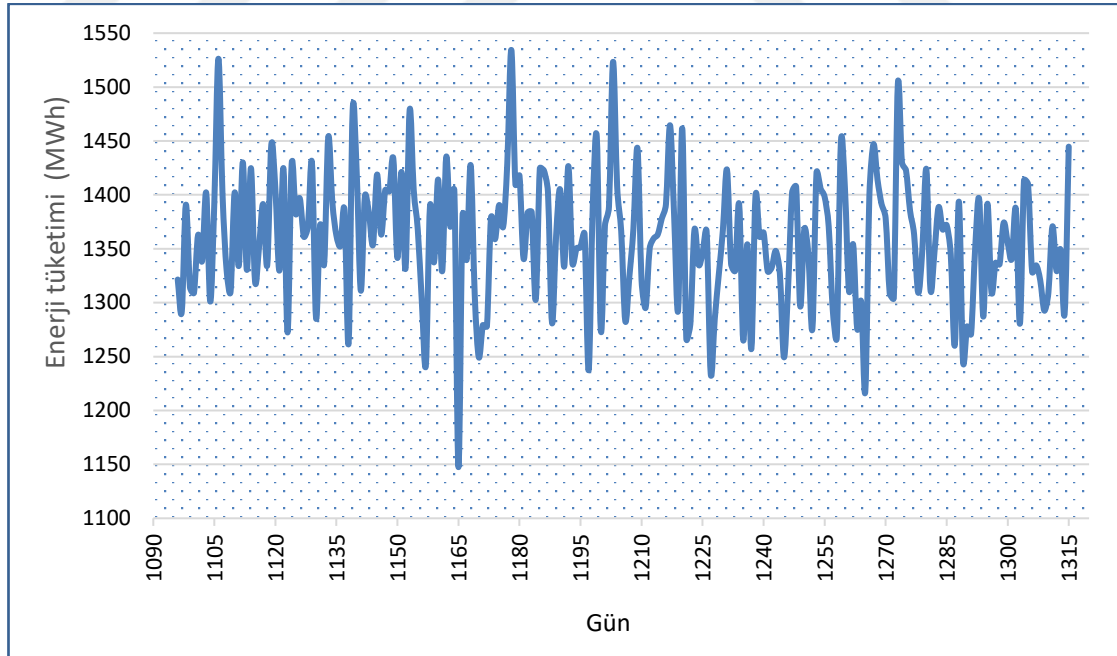
Şekil 4.28. Sinir ağı modeli tahminlerinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu

Herat Şehri'nin gelecekteki enerji tüketimi için modelin tahminleri Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Bu tahminler, geçmişteki 26280 saatlik gözlemsel verilere dayanmaktadır. Geleceğe yönelik tahminler ise bu sürecin hemen ardından başlayarak toplam 5250 saatlik bir dönemi kapsamaktadır (26281–31530 saat arası). Uzun vadeli enerji planlama tekniklerinde modelin işlevselliğine dair bilgilendirici görseller sunan bu bulgulardan yararlanabilir.



Şekil 4.29. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için enerji tüketimi tahminleri

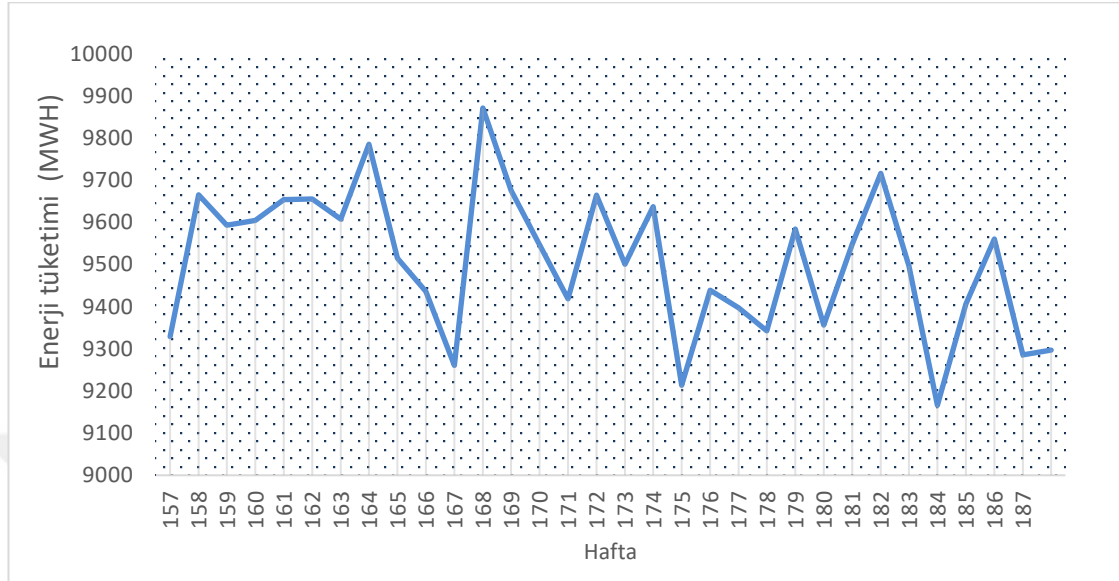
Şekil 4.30'da sinir ağı modeli kullanılarak Herat şehri için yapılan günlük enerji tüketim tahminleri sunulmaktadır. RF modelinden farklı olarak, sinir ağı tahminleri daha dalgalı bir azalma pateni göstermektedir. Tahmin süreci, 1095 günlük tarihsel veri temel alınarak gerçekleştirilmiş ve bu verilerin ardından toplam 220 gün boyunca (1096–1315 gün) geleceğe dönük enerji tüketimi öngörülmüştür.



Şekil 4.30. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri

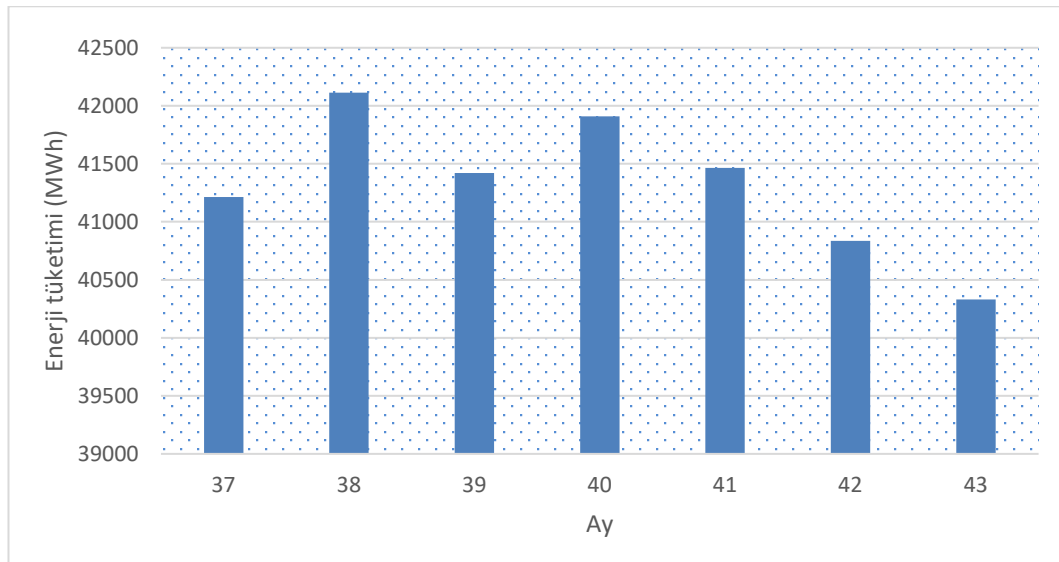
Şekil 4.31'de sinir ağı modeli ile Herat şehri için yapılan haftalık enerji tüketim tahminlerini göstermektedir. Bu analizde, 156 haftalık tarihsel veriye dayanarak model

geliştirilmiş ve takip eden 31 hafta boyunca (157–187. haftalar) toplam haftalık enerji tüketimi tahmin edilmiştir. Model, haftalık döngüleri ve enerji tüketimindeki değişimleri analiz ederek gelecekteki haftalık tüketim desenleri hakkında öngörüler sunmaktadır.



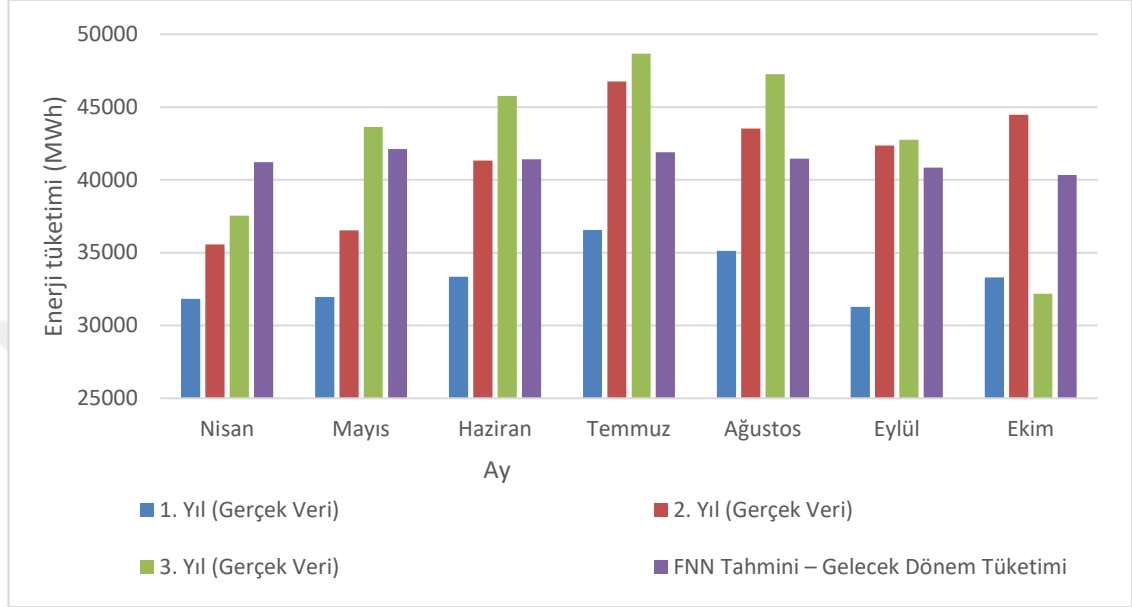
Şekil 4.31. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri

Şekil 4.32, sinir ağı modeli kullanılarak Herat şehri için yapılan aylık enerji tüketim tahminlerini göstermektedir. Bu çalışmada, 36 aylık tarihsel veri kullanılarak model geliştirilmiş ve ardından 7 aylık bir dönem için (37–43. aylar) toplam enerji tüketimi öngörülmüştür. Model, mevsimsel değişiklikler ve diğer uzun vadeli faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini analiz ederek gelecekteki aylık tüketim desenleri hakkında bilgi sağlamaktadır.

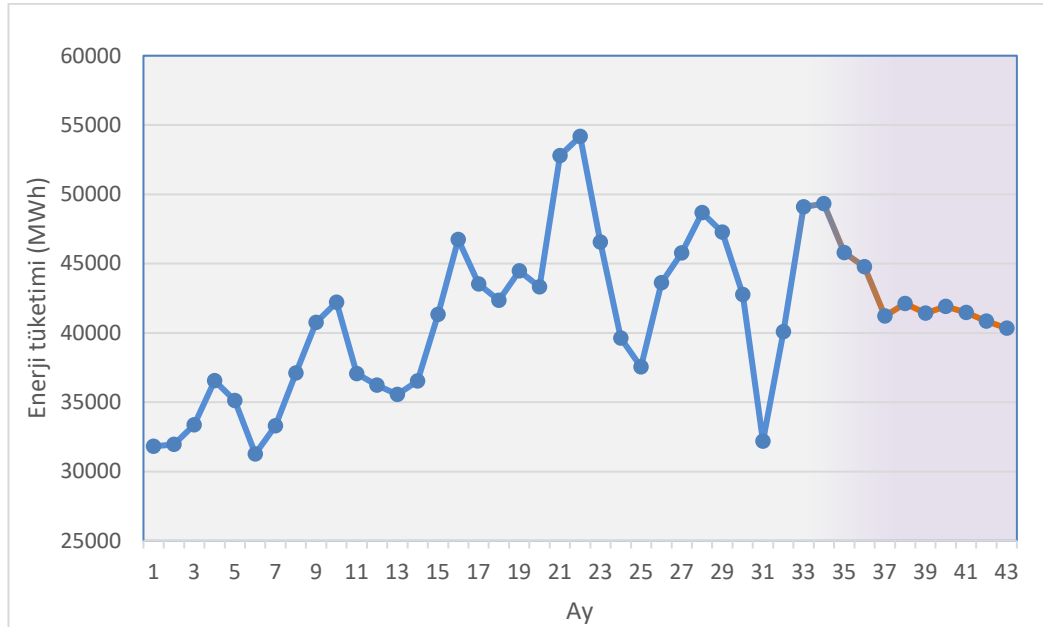


Şekil 4.32. Sinir ağı modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri

Şekil 4.33, üç yıllık tarihsel aylık ortalamalarının tahmin edilen gelecek değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.34'te, 1–36. aylar arasındaki tarihsel veriler ile 37–43. aylar arasındaki tahmin verileriyle kesintisiz birleştirilmiş sürekli bir zaman serisi içindeki eğilim tutarlılığının kanıtlanması gösterilmiştir. Bu şekiller, FNN'nin katmanlı mimarisi sayesinde karmaşık enerji tüketimi ilişkilerini modellemedeki etkinliğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.33. Sinir ağı modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması



Şekil 4.34. Sinir ağı modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi

LSTM algoritmasının Performansı

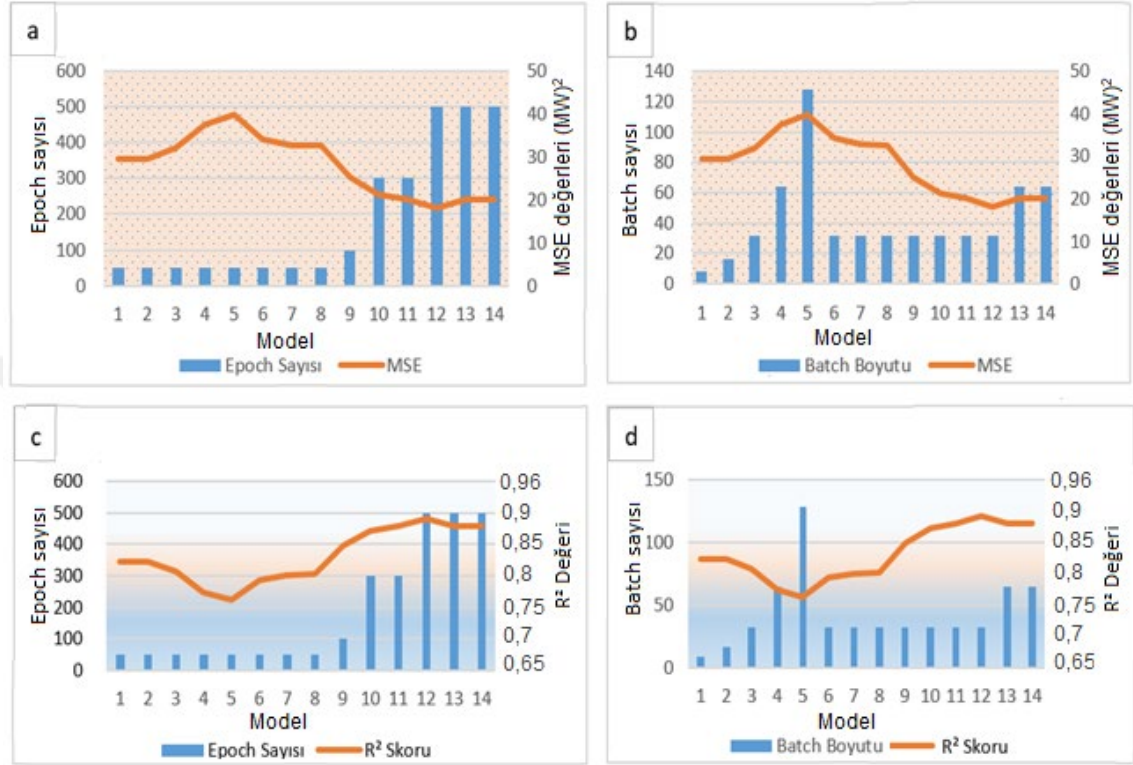
Sıralı verilerdeki zamansal bağlantıları tanımlama kapasitesini kullanarak, Herat Şehri'ndeki enerji tüketimi LSTM algoritmasının modeli kullanılarak incelenmiştir. LSTM, giriş bilgilerini zaman adımları boyunca işleyerek, enerji kullanım kalıpları başarıyla modellenmiştir. Katman sayısı, birim sayısı ve öğrenme oranı gibi diğer hiper parametreler ayarlanarak modelin performansı artırılmıştır. Uzun vadeli bağımlılıklar, LSTM tarafından geleneksel modellere göre daha iyi yakalanmış ancak aşırı uyum sağlamayı önlemek için yüksek işlem gücü ve dikkatli düzenleme (regularization) gerektirmiştir. Sonuçlar, LSTM'nin zaman serisi verilerini ne kadar iyi işlediğini vurgulamış, bu da onu dinamik ortamlarda enerji tahmini için yararlı bir araç haline getirmiştir. Model, Çizelge 4.5'te gösterildiği gibi, değişen toplu işlem boyutları, epoch sayıları ve rastgele tohumlar gibi farklı hiper parametre konfigürasyonları ile değerlendirilmiştir.

Sonuçlar, LSTM modelinin çeşitli konfigürasyonlar arasında tutarlı bir şekilde yüksek performans elde ettiğini göstermektedir. 32'lik bir toplu işlem boyutu, modeller 2, 3, 6 ve 7'nin 0,79'un üzerinde R^2 skorları elde etmesiyle tutarlı bir şekilde rekabetçi sonuçlar vermiş ve epoch sayısının 50'den 500'e artırılması, MAE ve MSE'deki azalma ve R^2 skorlarındaki artış ile kanıtlandığı üzere, model performansını önemli ölçüde artırmıştır. 32 epoch ve 500 epoch ile eğitilen Model 12, en yüksek R^2 skorunu (0,891) ve en düşük MSE'yi (18,16) elde ederek, model doğruluğunu artırmada genişletilmiş eğitimin etkinliğini göstermiştir. Rastgele tohumun model performansı üzerindeki etkisi minimum düzeyde olup, modelin performansının nispeten kararlı ve rastgele başlatmaya karşı yüksek derecede hassas olmadığını düşündürmüştür.

Çizelge 4.5. LSTM modeli değerlendirme sonuçları; (dönem sayısı ve parti büyüklüğü)

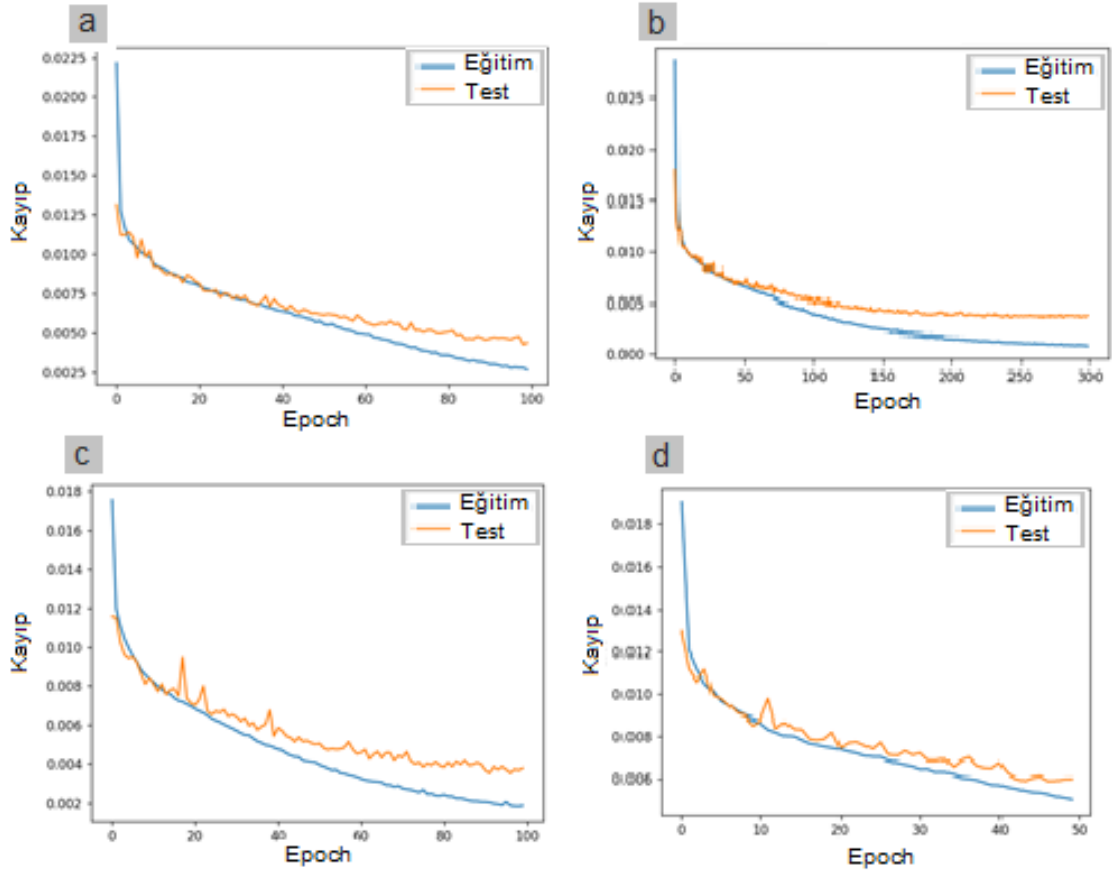
Model Numarası	Batch Boyutu	Epoch Sayısı	Verbose	Rastgele Durum	MAE	MSE	R^2 Skoru
1	8	50	1	0	4,046	29,515	0,822
2	16	50	1	0	3,932	29,454	0,823
3	32	50	1	0	4,082	32,024	0,807
4	64	50	1	0	4,455	37,533	0,774
5	128	50	1	0	4,66	39,788	0,761
6	32	50	2	0	4,205	34,16	0,794
7	32	50	1	1	4,116	32,711	0,800
8	32	50	1	41	4,113	32,614	0,802
9	32	100	1	41	3,627	25,11	0,848
10	32	300	1	41	3,296	21,16	0,872
11	32	300	1	0	3,112	20,19	0,879
12	32	500	1	0	2,997	18,16	0,891
13	64	500	1	0	3,122	20,122	0,879
14	64	500	2	0	3,122	20,122	0,879

LSTM modelinin performansını etkileyen temel faktörler olan epoch sayısı ve batch boyutu, modelin eğitim sürecinde önemli rol oynamaktadır. Şekil 4.35, bu parametrelerin modelin MSE ve R^2 skoru üzerindeki etkilerini görsel olarak sunmaktadır. Bu grafikler, modelin farklı konfigürasyonlarda nasıl performans gösterdiğini ve en uygun parametre kombinasyonlarının nasıl belirlenebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.35. LSTM model performansının epoch sayısı ve batch boyutuna bağlı değişimi; a) epoch sayısına göre MSE değişimi; b) batch boyutuna göre MSE değişimi; c) epoch sayısına göre R^2 skoru değişimi; d) batch boyutuna göre R^2 skoru değişimi

Şekil 4.36, LSTM modelinin hiperparametre optimizasyonu sürecinin ilk aşamalarını göstermektedir. Dört farklı konfigürasyonun (a, b, c, d) enerji tüketimi tahmin performansları, modelin hiperparametrelerinin (epoch, batch size, random state) etkisini anlamak için sunulmuştur. Bu aşamada elde edilen sonuçlar, nihai model için yeterli doğruluğu sağlamamaktadır. Ancak, bu denemeler, hiperparametrelerin modelin performansını nasıl etkilediğine dair değerli bilgiler sunmakta ve daha iyi sonuçlar elde etmek için sonraki optimizasyon adımlarına rehberlik etmektedir. Bu şekilde gösterilen sonuçlar, iyi sonuçların elde edilmediği ilk aşamayı göstermektedir.

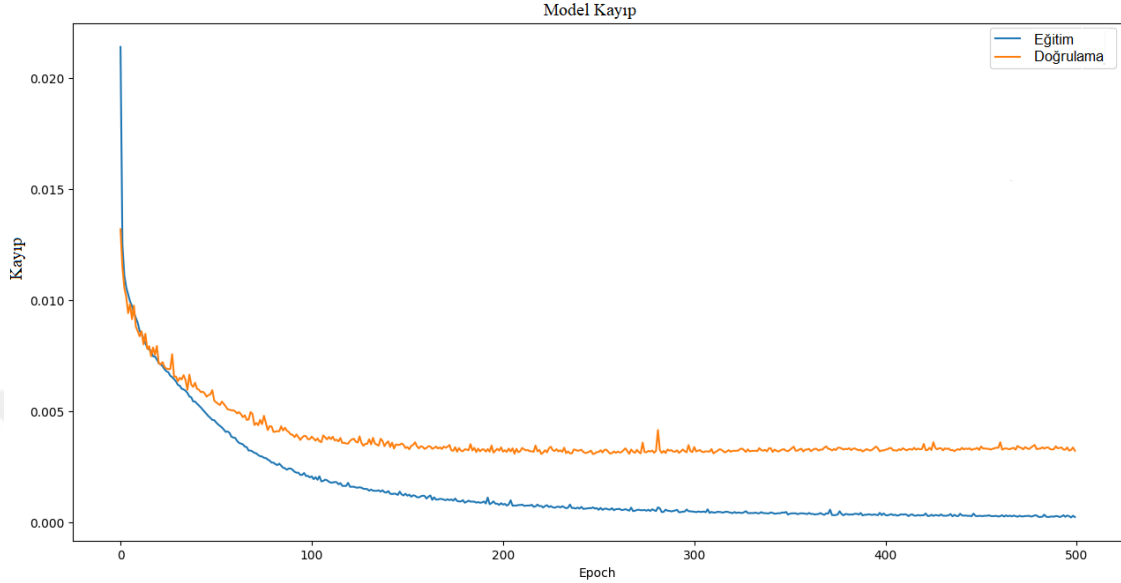


Şekil 4.36. LSTM model hiperparametre denemeleri: ilk sonuçların değerlendirilmesi; a) epoch 100, batch boyutu 64, rastgele durum 1; b) epoch 300, batch boyutu 128, rastgele durum 42; c) epoch 100, batch boyutu 16, rastgele durum 1; d) epoch 50, batch boyutu 32, rastgele durum 42

Rastgele durumdaki varyasyonlar performansı hafifçe etkilemiş, 1 ve 41 durumları en iyi sonuçları göstermiştir. Genel olarak, bu bulgular, dikkatli bir şekilde ayarlanmış LSTM modellerinin, sınırlı veri setleriyle bile zaman serisi tahminlerini etkili bir şekilde ele alabileceğini ve Herat Şehri'nin enerji tüketimi için 0,891'e kadar R^2 skorları elde edebileceğini doğrulamaktadır. Bu sonuçlar, LSTM mimarisinin enerji tüketimi verilerindeki zamansal bağımlılıkları yakalama ve yüksek tahmin doğruluğu elde etme konusundaki etkinliğini göstermektedir. Sonuçlar ayrıca, model performansını optimize etmek için özellikle epoch sayısının dikkatli bir şekilde ayarlanmasının önemini vurgulamaktadır.

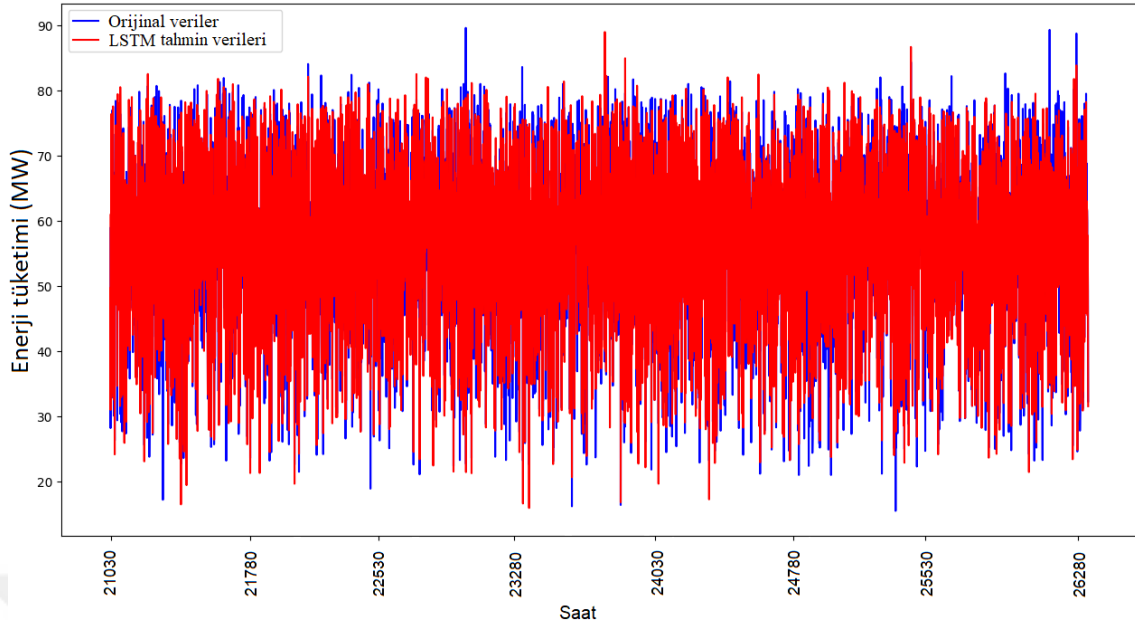
Eğitim ve doğrulama veri setlerinin kayıp değerleri, modelin öğrenme sürecini ve performansını gösteren grafikte görüntülenmektedir. Şekil 4.37'de gösterildiği gibi, eğitim kaybının sürekli azalması, LSTM modelinin hatayı etkili bir şekilde en aza indirdiğini ve ardışık epoch'lar boyunca veriye uyum sağladığını göstermiştir. Eğitim ve test kayıp eğrileri arasındaki yakın uyum, modelin güçlü bir genelleme yeteneğine sahip olduğunu ve yeni verilere iyi performans gösterdiğini, önemli ölçüde aşırı uyum sağlamadığını göstermektedir. Bu uyum aynı zamanda, modelin mimarisinin ve düzenleme (regularization) tekniklerinin öğrenme kapasitesi ve karmaşıklık arasında dengiyi başarılı bir şekilde sağladığını vurgular. Grafik, optimizasyon sürecinin başarıyla

yakınsadığını görsel olarak doğrulamaktadır ve eğitim ve doğrulama kayıpları arasındaki tutarlılık, modelin doğruluğu bozmadan farklı veri setlerinde enerji tüketimini güvenilir bir şekilde tahmin edebileceğini garanti eder. Bu davranış, LSTM modelinin zaman serisi verilerini işlemede ve tahmin istikrarını korurken sağlamlığını vurgular.



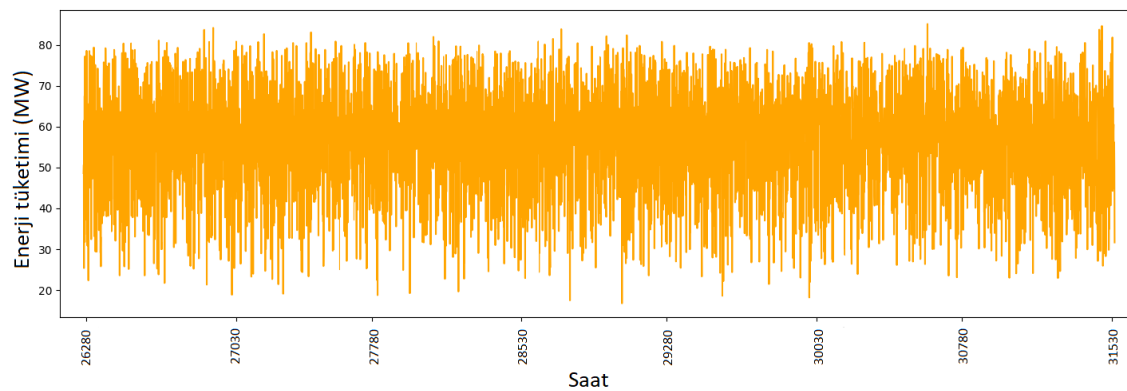
Şekil 4.37. LSTM modeli, dönemler boyunca eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri

Şekil 4.38 optimize edilmiş LSTM modelinin test verilerine ne kadar iyi uyduğunu göstererek, Herat Şehri'nin enerji tüketimini tahmin etmedeki doğruluğunu vurgulamaktadır. Bu değerlendirme, toplam 26280 saatlik zaman serisi verisinin %80'lik bölümü (ilk 21030 saat) kullanılarak eğitilen LSTM modelinin, kalan %20'lik test aralığı (son 5250 saat) üzerinde gerçekleştirdiği tahminlerin doğruluğunu ortaya koymaktadır. Model, farklı test sitelerinde minimum düzeyde varyasyon göstererek, tahminlerin gerçek değerlerle yakın bir şekilde uyum içinde olduğunu göstermiştir. Bu tutarlılık, LSTM modelinin yeni, görülmemiş verilere etkili bir şekilde genelleme yapabilme yeteneğini göstermektedir. Görselleştirme ayrıca, modelin enerji tüketimi verilerinde bulunan zamansal bağımlılıkları ve karmaşık doğrusal olmayan kalıpları yakalama konusundaki gücünü daha da vurgulamaktadır. Özellikle, LSTM, sınırlı bir veri seti kullanılarak bu performansı elde etmiş, sağlamlığını ve kısıtlı verilerden anlamlı çıkarımlar çıkarma kapasitesini göstermiştir. Bu sonuçlar, modelin enerji tahmini görevleri için uygunluğunu teyit etmekte ve dinamik enerji sistemlerinde planlama ve karar verme için güvenilir bir temel sağlamaktadır.



Şekil 4.38. LSTM model tahminlerinin Herat şehrinin enerji tüketimi ile uyumu

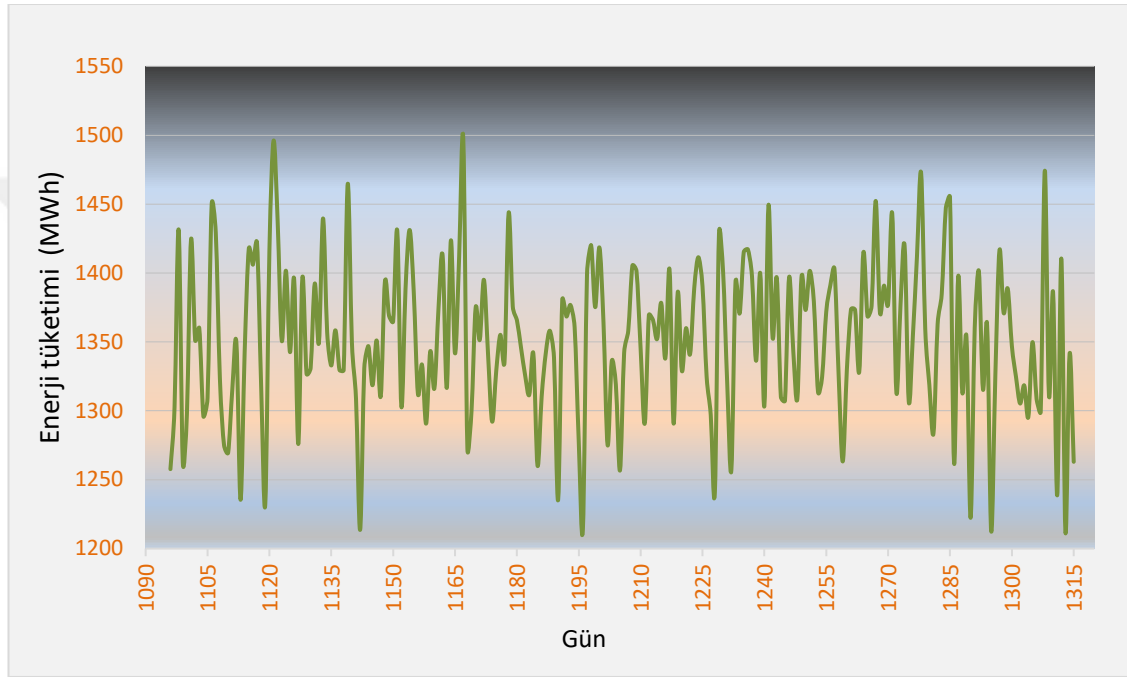
Şekil 4.39’da Herat Şehri’nin gelecekteki enerji tüketimi için modelin tahminleri gösterilmiştir. LSTM modeline dayalı olarak gerçekleştirilen ileriye dönük enerji tüketimi tahminleri, daha önce kullanılan 26280 saatlik veri setinin tamamlanmasının ardından başlatılmıştır. Bu öngörüler, modelin öğrenme sürecinde elde ettiği kalıpları takip ederek 5250 saatlik bir dönemi kapsamaktadır (26281–31530 saat arası). Bu grafik ile öngörülen enerji tüketim eğilimlerini vurgulayarak, modelin mevsimsel ve zamansal değişimleri etkili bir şekilde yakalama yeteneğini göstermektedir. Tahmin edilen ve gerçek tüketim kalıpları arasındaki yakın uyum, LSTM modelinin gelecek tahminleri için bile doğruluk ve güvenilirliğini vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, modelin Herat Şehri’nde proaktif enerji yönetimi ve planlamaya yardımcı olma potansiyelini göstermektedir.



Şekil 4.39. LSTM modeli ile Herat şehri için saatlik enerji tüketim tahminleri

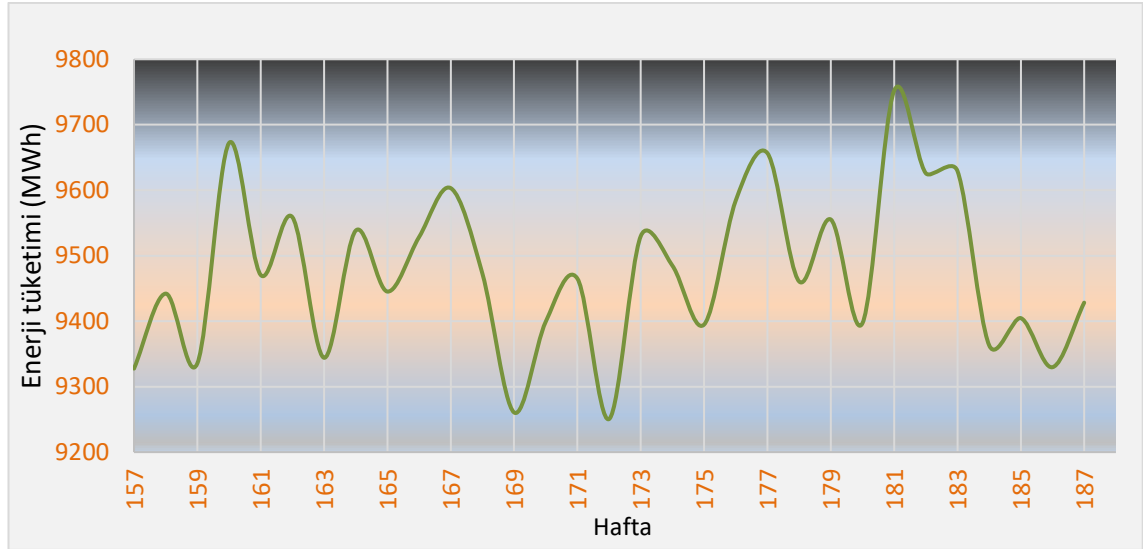
LSTM modeli, Herat şehrinin günlük enerji tüketimi için hassas tahminler sunarak, zaman serisi verilerindeki karmaşık kalıpları ve bağımlılıkları etkili bir şekilde yakalayabilme yeteneğini sergilemektedir. Şekil 4.40, LSTM modelinin Herat için (1096–1315 gün) dönemine ait günlük enerji tüketim tahminlerini sunmaktadır. Tahmin

süreci, 1095 günlük tarihsel veri temel alınarak gerçekleştirilmiş ve bu verilerin ardından toplam 220 gün boyunca (1096–1315 gün) geleceğe dönük enerji tüketimi öngörülmüştür. Tahminler, tüketimin 1550 MWh'dan 1200 MWh'a düzenli bir düşüşle azaldığını, özellikle yaz aylarında 1350 MWh civarında stabilizasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. RF ve sinir ağı modellerinden farklı olarak LSTM, daha yumuşak geçişlerle uzun vadeli trendleri daha net yansıtmakta ve düşük varyanslı tahminler üreterek temporal bağımlılıkları başarıyla modellemektedir. Bu sonuçlar, LSTM'nin enerji planlaması için daha güvenilir projeksiyonlar sağladığını göstermektedir. Bu yetenek, modelin enerji tüketimindeki ani değişiklikleri, mevsimsel dalgalanmaları ve diğer karmaşık eğilimleri doğru bir şekilde tahmin etmesini sağlar.



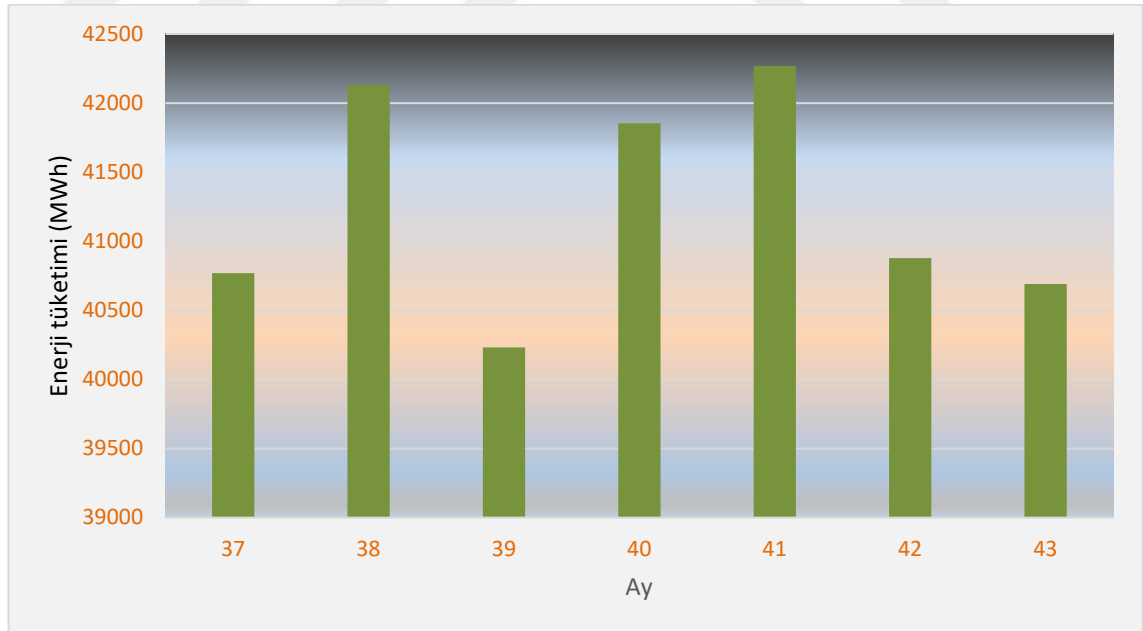
Şekil 4.40. LSTM modeli ile Herat şehri için günlük enerji tüketim tahminleri

Şekil 4.41'de LSTM modeli Herat şehrinin haftalık enerji tüketim desenlerini anlamak için güçlü zamansal analiz yeteneklerini sergileyerek hassas tahminler sunmaktadır. Bu analizde, 156 haftalık tarihsel veriye dayanarak model geliştirilmiş ve takip eden 31 hafta boyunca (157–187. haftalar) toplam haftalık enerji tüketimi tahmin edilmiştir. Bu model, haftalık döngüleri ve enerji tüketimindeki potansiyel değişimleri doğru bir şekilde modelleyerek, gelecekteki haftalık tüketim desenleri hakkında detaylı öngörüler sunmaktadır. Bu tahminler, haftalık bakım planlaması, kaynak yönetimi ve enerji dağıtımı gibi kritik operasyonlar için güvenilir bir rehber niteliğindedir.



Şekil 4.41. LSTM modeli ile Herat Şehri için haftalık enerji tüketim tahminleri

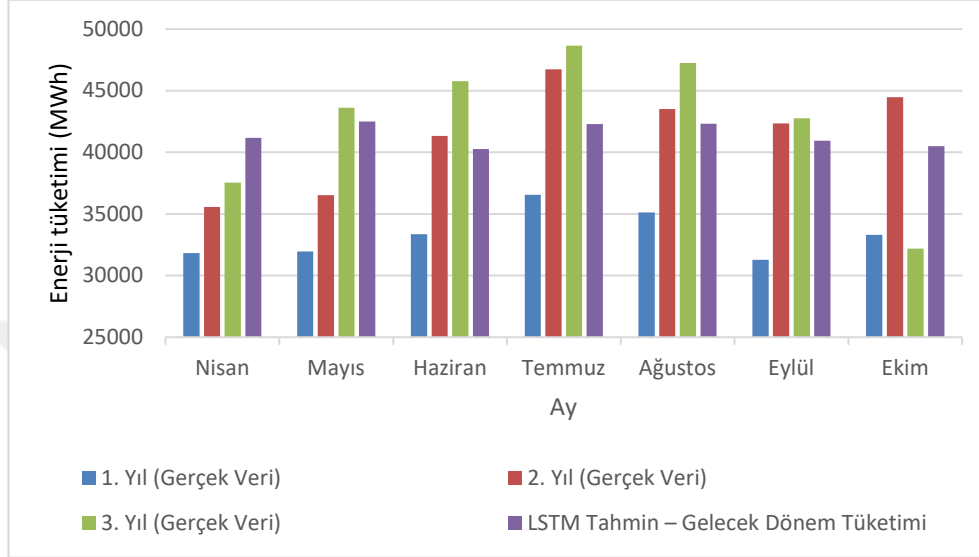
Şekil 4.42'de LSTM modeli Herat şehrinin aylık enerji tüketim eğilimlerini öngörmekte kayda değer bir başarı göstererek, uzun vadeli tahminlerdeki doğruluğu ile öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, 36 aylık tarihsel veri kullanılarak model geliştirilmiş ve ardından 7 aylık bir dönem için (37–43. aylar) toplam enerji tüketimi öngörülmüştür. Model, mevsimsel değişiklikler, tatiller ve diğer uzun vadeli faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini analiz ederek, gelecekteki aylık tüketim desenleri hakkında hassas bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 4.42. LSTM modeli ile Herat şehri için aylık enerji tüketim tahminleri

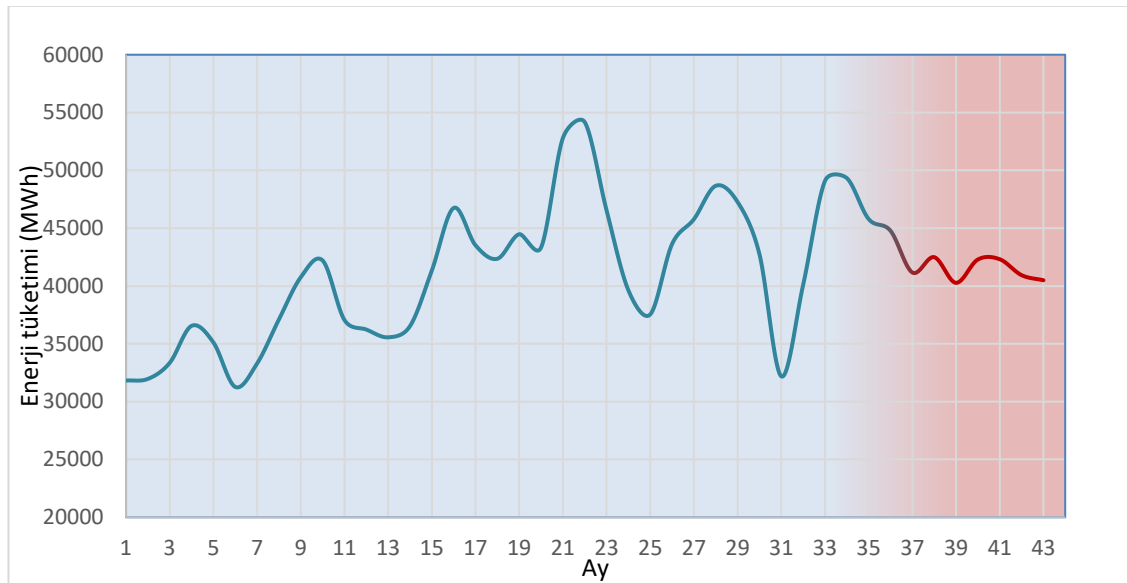
Şekil 4.43, üç yıllık tarihsel aylık ortalamalarının tahmin edilen gelecek değerleriyle karşılaştırmasını çubuk grafikte sunarak mutlak tüketim farklarını net şekilde göstermektedir. Nisan-Ekim döneminde tüketimin 50000 MWh'dan 30000 MWh'a düşen

mevsimsel bir eğilim gösterdiği görülmektedir. LSTM tahminleri, önceki yılların tüketim kalıplarıyla büyük ölçüde örtüşmekte, ancak Ağustos-Eylül aylarında daha belirgin bir düşüş öngörmektedir. Modelin bu farklı tahmini, muhtemelen iklim değişikliği veya enerji verimliliği politikaları gibi yeni gelişen faktörleri yakalama yeteneğini yansıtmaktadır. LSTM'nin tutarlı tahmin performansı, enerji planlaması için güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir.



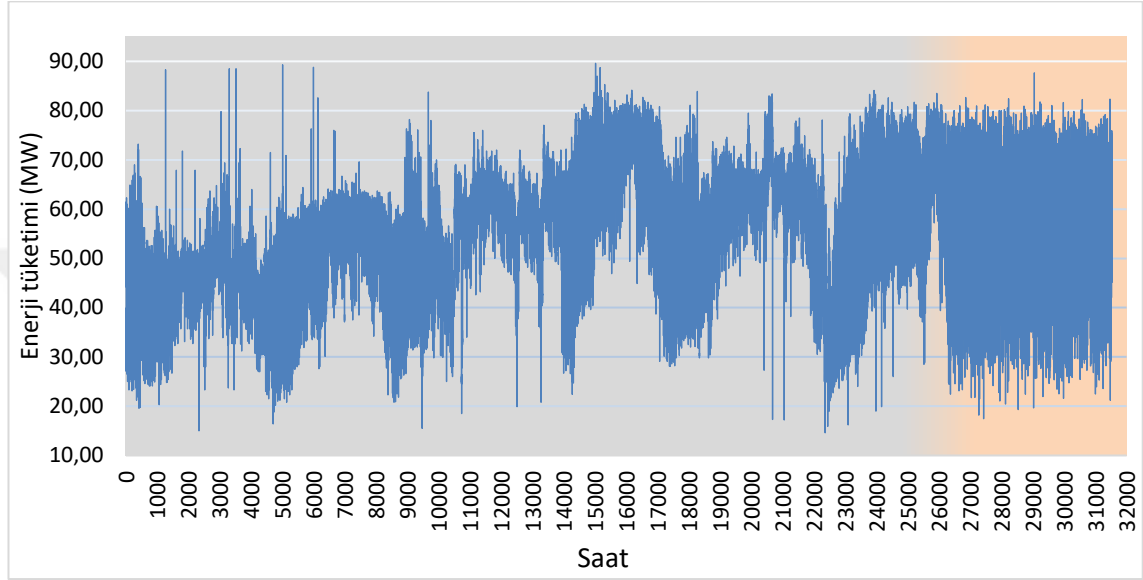
Şekil 4.43. LSTM modeli aylık enerji tüketimi karşılaştırması

Şekil 4.44, üç yıllık tarihsel enerji tüketimi ile model tarafından yapılan gelecek dönem LSTM tahminlerini karşılaştırmalı olarak sunmakta ve modelin mevsimsel döngüler ile pik tüketim anlarını ne ölçüde isabetli yakaladığını görselleştirmektedir. Geçmiş ve gelecek verilerin kesintisiz birleştirilmesiyle oluşturulan bu grafik, LSTM'nin zaman serisi bağımlılıklarını modellemedeki başarısını somut şekilde kanıtlamaktadır.



Şekil 4.44. LSTM modeli birleştirilmiş geçmiş ve tahmini aylık enerji tüketimi

LSTM modelinin gerçek tahmin yeteneği, kısa vadeli tüketim dalgalanmalarının kritik olduğu saatlik çözünürlükte netleşmektedir. Şekil 4.45, tarihsel saatlik tüketim desenlerini LSTM-tahmini değerlerle karşılaştırarak, modelin günlük döngüleri, pik tüketim ani artışlarını ve aylık verilerde kaybolan geçici anomalileri yakalama becerisini ortaya koymaktadır. Bu analizde, model 1–26280 saat aralığını kapsayan üç yıllık gözlemsel verilerle eğitilmiş ve ardından 26281–31530 saat aralığını kapsayan geleceğe dönük tahminler üretilmiştir. Bu detaylı görünüm, LSTM'nin operasyonel enerji planlaması için zamansal modelleme avantajını doğrulamaktadır.



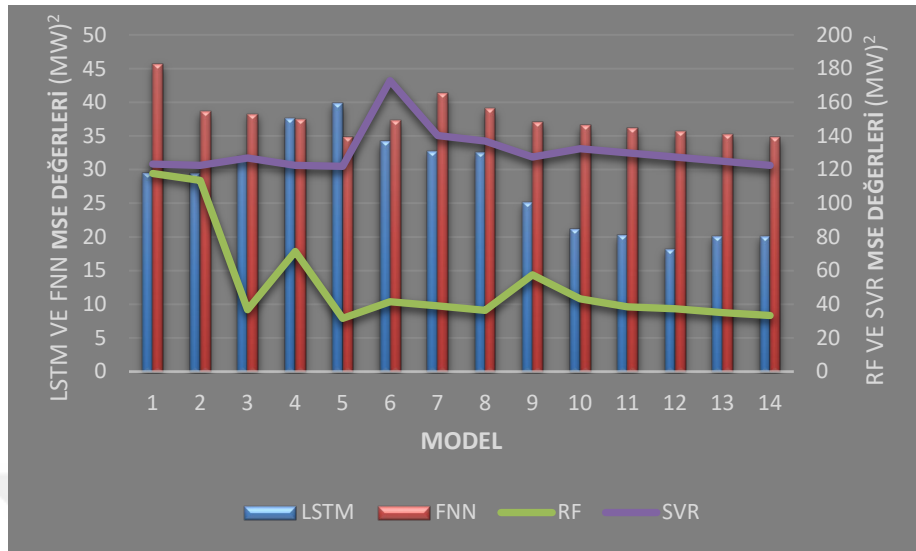
Şekil 4.45. Herat Şehri saatlik enerji tüketimi ve LSTM tahminleri

4.3. Model Performanslarının Karşılaştırılması

Bu kısımda her bir modelin çıktıları ve doğruluk değerlendirmesi ayrı ayrı sunularak modellerin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Farklı modelleme yaklaşımlarının enerji tahmini üzerindeki etkilerini daha net bir şekilde anlayabilmek ve hangi modelin incelenen veri seti için en uygun olduğunu belirlemek için modellerin R^2 Skoru ve Ortalama Karesel Hata (MSE) değerleri de karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalı analiz ile modellerin hem görsel olarak tahmin yetenekleri hem de istatistiksel metrikler üzerinden doğrulukları değerlendirilmiştir.

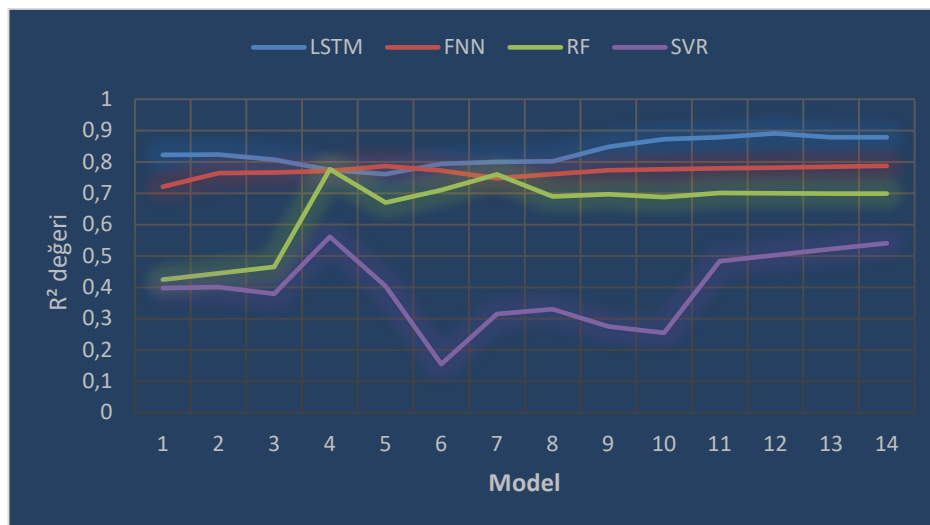
Şekil 4.46'da incelenen dört farklı enerji tahmin modeli (LSTM, FNN, RF ve SVR) için oluşturulan 14 farklı model yapısının Test MSE'si metrikleri üzerinden performans karşılaştırması sunulmuştur. Bu karşılaştırma, her bir modelleme yaklaşımı içinde farklı yapılandırmaların tahmin doğruluğunu nasıl etkilediğini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Şekilde her bir model için 14 farklı yapıya karşılık gelen MSE değerleri gösterilmiştir. Düşük MSE değerleri, daha iyi tahmin performansını işaret etmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi LSTM modellerinin çoğu yapılandırmasında en düşük MSE değerleri tutarlı şekilde sağlandığı ve dolayısıyla FNN, RF ve SVR modellerine kıyasla daha üstün tahmin stabilitesi gösterdiği tespit edilmiştir. LSTM'nin dar MSE aralığı (5-20), özellikle SVR'nin geniş performans değişkenliği (20-180) ile karşılaştırıldığında, enerji tahmin görevleri için sağlamlığını kanıtlamaktadır. Bu analiz

şeklinin her bir model türü için en uygun yapılandırmaların belirlenmesine yardımcı olacağını işaret etmektedir.



Şekil 4.46. Farklı model yapılarının test MSE'si değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.47’de gösterildiği gibi incelenen dört farklı enerji tahmin modeli (LSTM, FNN, RF ve SVR) için oluşturulan 14 farklı model yapısının Test R^2 Skoru metrikleri üzerinden performansları karşılaştırılmıştır. R^2 Skoru, modelin bağımlı değişkendeki varyansı ne kadar iyi açıkladığının bir ölçüsüdür ve 0 ile 1 arasında değerler alır. Yüksek R^2 değerleri, modelin verilere daha iyi uyum sağladığını ve tahminlerdeki varyansı daha iyi açıkladığını gösterir. LSTM modelleri, 0,7-0,9 aralığındaki yüksek R^2 değerleriyle tutarlı şekilde en iyi performansı gösterirken, diğer modeller daha düşük ve değişken sonuçlar (FNN: 0,5-0,7, RF/SVR: 0,1-0,6) üretmiştir. Bu bulgular ile LSTM'nin enerji tüketimi tahmininde diğer yöntemlere göre açıklayıcı gücünün daha yüksek olduğu kanıtlanmıştır. Bu karşılaştırma, her bir modelleme yaklaşımı içinde farklı yapılandırmaların tahmin gücünü nasıl etkilediğini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.



Şekil 4.47. Farklı model yapılarının test R^2 skoru değerlerinin karşılaştırılması

4.4 Sürdürülebilir Enerji Potansiyeli Analizi

Bu kısımda, Herat şehrinin mevcut enerji tüketim durumu ve geleceğe yönelik enerji talep tahminleri doğrultusunda sürdürülebilir enerji potansiyeli detaylı şekilde analiz edilmiştir. Önceki kısımda yapay zekâ tabanlı yöntemlerle elde edilen tüketim tahminleri, mevcut üretim kapasitesi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiş; bu veriler ışığında şehrin enerji arz güvenliği, verimlilik stratejileri ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde senaryo tabanlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Güneş ve rüzgar enerjisi başta olmak üzere yerel yenilenebilir enerji kaynaklarının, tahmin edilen enerji ihtiyacını hangi ölçüde karşılayabileceği incelenmiş, ayrıca hibrit enerji stratejilerinin uygulanabilirliği tartışılmıştır.

4.4.1. Tüketim tahminleri ve mevcut kapasiteyle karşılaştırma

Geliştirilen LSTM modelinin enerji tüketimi tahmin performansını değerlendirmek amacıyla, eğitim ve test verileri üzerinde doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, yöntemimin doğruluğunu kontrol etmek için örnek bir ay seçildi (Nisan ayı). Geliştirilen LSTM modelinin enerji tüketimi tahmin yeteneğini daha detaylı incelemek amacıyla, Nisan ayına ait geçmiş tüketim değerleri ile modelin geleceğe yönelik tahminleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde modelin kısa vadeli tahmin başarımı görselleştirilmiş ve analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma, Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.6. LSTM modeli ile Nisan ayı için gerçek ve tahmin edilen elektrik tüketim değerlerinin karşılaştırması

Tarih	1. Yıl (Gerçek Veri) Nisan (MWh)	2. Yıl (Gerçek Veri) Nisan (MWh)	3. Yıl (Gerçek Veri) Nisan (MWh)	LSTM Gelecek Tahmin Nisan (MWh)
1- Nisan	1253,2	1400,1	1130,6	1265,2
2- Nisan	1084,6	1307,0	1158,9	1312,3
3- Nisan	1154,3	1241,1	1189,1	1294,3
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
28- Nisan	1033,6	1236,7	1282,3	1279,9
29- Nisan	1050,2	1313,2	1311,2	1354,0
30- Nisan	1097,6	1365,6	1329,1	1314,7

LSTM modeli tarafından öngörülen Nisan ayı enerji tüketim değerleri, geçmiş üç yılın tarihsel verileriyle karşılaştırıldığında genel olarak ikinci tarihsel yılın tüketim düzeylerine yakınlık göstermektedir. Birinci ve üçüncü yıllarda bazı günlerde tüketim değerleri oldukça düşük seviyelerde kalırken, LSTM tahminleri bu dalgalanmaları daha dengeli bir şekilde yansıtmaktadır. Özellikle ayın ilk günlerinden son günlerine kadar olan süreçte, LSTM tahminleri 1265 MWh ile 1354 MWh aralığında değişmekte olup, bu değerler üçüncü tarihsel yıla göre daha yüksek, ikinci yıla ise oldukça yakın düzeydedir. Bu durum, modelin özellikle ikinci yılın tüketim eğilimlerine benzer bir gelecek

projeksiyonu sunduğunu ve aşırı sapmalar yerine daha stabil bir öngörü performansı sergilediğini göstermektedir.

Aylık tüketim verileri incelendiğinde, tüketimin genel olarak kış aylarında (Aralık–Şubat) zirve yaptığı, yaz aylarında ise (Haziran–Ağustos) görece yüksek seyrettiği gözlemlenmektedir. Bu dönemsel değişimler, geçmiş yıllardaki mevsimsel eğilimlerin enerji talebi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 4.44).

Ancak, mevcut enerji altyapısının kişi başına düşen kapasitesinin oldukça düşük olduğu (yıllık yaklaşık 790 kWh veya ortalama günlük yaklaşık 2,16 kWh/kişi) dikkate alındığında, geçmişteki ve tahmin edilen bu tüketim seviyeleri bile mevcut altyapı üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır. Özellikle tüketimin en yüksek olduğu kış ve yaz aylarında, bu durum enerji kesintileri ve yetersiz arz sorunlarını daha da derinleştirebilir.

Sürdürülebilir enerji planlaması yapılırken, yalnızca bu tahminlere değil, aynı zamanda Herat halkının yaşam standartlarını yükseltecek ve ekonomik kalkınmayı destekleyecek yeterli enerji arzını sağlayacak uzun vadeli bir vizyonun da benimsenmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji verimliliği önlemleri, bu artan tüketimi karşılamak ve enerji altyapısını güçlendirmek için hayati öneme sahip olacaktır.

4.4.2. Enerji tüketim tahmin sonuçlarının sürdürülebilirlik planlamasına katkısı

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yapay zekâ tabanlı enerji tüketim tahmin modelleri, Herat şehrinin gelecekteki enerji gereksinimlerinin öngörülmesi ve sürdürülebilir enerji planlaması için stratejik bir temel oluşturmaktadır. Özellikle LSTM modeli ile elde edilen yüksek doğruluk oranı (R^2 : 0,891), saatlik, günlük ve aylık zaman dilimlerinde sunulan tahminlerin güvenilirliğini teyit etmektedir. Bu bağlamda, YZ tabanlı enerji tüketim öngörülleri; enerji altyapısı yatırımlarının zamanlaması, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin entegrasyonu ve enerji politikalarının geliştirilmesi süreçlerine doğrudan ve önemli katkılar sunmaktadır.

Önemle belirtmelidir ki, bu çalışmada kullanılan geçmiş enerji tüketim verileri ve YZ tabanlı tüketim tahminleri, mevcut enerji altyapısının kapasite sınırlarına dayanmakta ve gerçekleşen enerji tüketimini yansıtmaktadır. Ancak, Herat'ta yaşanan enerji arzı yetersizlikleri, ithalat bağımlılığının getirdiği kısıtlamalar ve sıkça meydana gelen elektrik kesintileri, gerçek enerji tüketiminin büyük ölçüde karşılanamamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, modelin sunduğu tahminler, potansiyel tüketimin bir ölçüde bastırılmış halini temsil etmektedir. Sürdürülebilir enerji planlama süreçlerinde, bu durum dikkate alınarak gerçek enerji tüketiminin tahmin edilenden daha yüksek olabileceği öngörülmesi ve altyapı yatırımları ile yenilenebilir enerji entegrasyon stratejileri buna göre şekillendirilmelidir.

4.4.2.1. YZ tabanlı tüketim tahminlerinin sürdürülebilir enerji planlamasındaki rolü

Enerji tüketim tahminleri, sürdürülebilir kentsel planlamanın en kritik unsurlarından biri olan enerji altyapısı yatırımlarının zamanlamasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen LSTM modeli, gelecek döneme

ait aylık ortalama elektrik tüketimini 41400 MWh olarak öngörmektedir. Modelin çıktıları, yaz aylarında (özellikle Temmuz ve Ağustos) en yüksek seviyeye ulaşan aylık tüketim değerlerini ve kış aylarında da ikincil bir tüketim artışını göstermektedir. Saatlik bazda yapılan analizler ise, en yüksek enerji tüketiminin 18:00 - 22:00 saatleri arasında gerçekleştiğini ve bu zaman aralığında tüketimin 75-80 MWh seviyesine ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu detaylı bilgiler, özellikle enerji dağıtım ve üretim altyapısının pik tüketim zamanlarına göre optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonunun zamanlaması, bu hassas tüketim tahmin verileri sayesinde daha etkin bir şekilde planlanabilmektedir. Güneş enerjisi üretiminin yoğunlaştığı gündüz saatlerinde enerji tüketiminin nispeten daha düşük seyretmesi, enerji depolama çözümlerinin stratejik önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisinin doğrudan akşam zirve tüketimini karşılamada yetersiz kalabileceği, ancak gündüz üretilen enerjinin depolama sistemleri aracılığıyla desteklenmesiyle bu açığın kapatılabileceği anlaşılmaktadır.

Ayrıca, doğru ve güvenilir tüketim tahminleri, karar vericilere gelecekteki enerji ihtiyaçlarına yönelik önceden stratejik adımlar atma imkanı sunmaktadır. Mevsimsel ve saatlik enerji tüketim desenlerinin anlaşılması; enerji üretimi, dağıtımı ve tüketici davranışları arasında daha iyi bir senkronizasyonun sağlanmasına katkıda bulunur. Bu durum, enerji arz güvenliğini artırırken, enerji kesintilerinin ve enerji israfının önlenmesini de kolaylaştırmaktadır.

4.4.2.2. Tüketim tahmini verilerinin verimlilik ve yönetim stratejilerine entegrasyonu

Tüketim tarafı yönetimi (Demand Side Management, DSM) stratejileri, enerji verimliliğini artırma ve enerji şebekesi üzerindeki yükü dengeleme açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında geliştirilen YZ tabanlı modeller, enerji tüketim desenlerinin yüksek doğrulukla öngörülmesini sağlayarak, DSM uygulamalarının zamanlamasını optimize etme potansiyeli sunmaktadır. Özellikle akşam saatlerinde belirginleşen tüketim artışının önceden tahmin edilmesi, bu kritik saatlerde uygulanacak fiyatlandırma politikalarının, enerji tasarrufu bilinçlendirme kampanyalarının ve şebeke dengeleme stratejilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Ek olarak, elde edilen tüketim tahminleri, uzun vadeli enerji altyapısı yatırım planlamalarıyla da entegre edilebilir. Örneğin, sürekli artış gösteren yaz ayı enerji tüketimi, soğutma sistemlerinin enerji verimliliği standartlarına göre yeniden tasarlanması veya yenilenebilir enerji santrallerinin bu dönemdeki artan tüketimi karşılayacak şekilde kapasite artışıyla desteklenmesi gibi stratejik kararları gündeme getirebilir. Aynı zamanda, enerji tasarrufu politikalarının hangi dönemlerde ve hangi tür bilinçlendirme kampanyalarıyla uygulanması gerektiğine dair bilimsel ve veriye dayalı bir temel sunmaktadır.

Enerji yönetiminde öngörülebilirlik, sadece mevcut enerji tüketimini anlamakla kalmayıp, aynı zamanda olası gelecekteki tüketim senaryolarına göre proaktif hareket edebilme yeteneğini de içerir. Bu açıdan, YZ tabanlı tüketim tahmin modelleri, geleceğe yönelik esnek ve dinamik enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için güçlü bir analitik temel oluşturmaktadır.

4.4.3. Nüfus artışı, enerjiye erişim ve talep projeksiyonlarının senaryo tabanlı değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, yalnızca mevcut tüketim alışkanlıklarından değil, aynı zamanda nüfus artışı ve sosyo-ekonomik kalkınma hedefleriyle de doğrudan ilişkilidir. Herat şehri nüfusunun ilerleyen dönemde yaklaşık 753000 kişiye ulaşacağı öngörülmektedir (Review 2025). Bu demografik artış, enerji tüketiminin hem miktar hem de yapısal olarak önemli ölçüde değişeceğini göstermektedir. Geçmiş birkaç yıl boyunca şehirdeki toplam elektrik tüketimi, düzenli bir artış eğilimi göstermiştir; örneğin, bu dönemde yıllık tüketim 423000 MWh seviyesinden 482000 MWh düzeyine kadar yükselmiştir (Çizelge 4.7). LSTM modeline dayalı tahmin sonuçları ise, izleyen döneme ilişkin yıllık toplam tüketimin yaklaşık 493333 MWh seviyesine ulaşacağını göstermektedir. Bu değer, mevcut altyapı kapasitesi ve tüketim alışkanlıklarını yansıtırken, uluslararası enerji tüketim standartlarının ve bölgesel olarak daha gelişmiş ülkelerin ortalamalarının altında kalmaktadır.

Çizelge 4.7. Nüfus artışı, yıllık enerji tüketimi ve kişi başına tüketim değerleri (2021–2025)

Yıl	Nüfus (Kişi)	Toplam Yıllık Elektrik Tüketimi (MWh)	Kişi Başına Tüketim (kWh/kişi/yıl)
1. Yıl (Gerçek Veri) (2021-2022)	650000	423000	650
2. Yıl (Gerçek Veri) (2022-2023)	680000	445000	654
3. Yıl (Gerçek Veri) (2023-2024)	720000	482000	669
LSTM Gelecek Tahmin (2024-2025)	753000	493333	655

Herat Şehri'nde enerji tüketim seviyesi yalnızca nüfus artışına değil, aynı zamanda altyapı yatırımlarına, enerji erişiminin yaygınlığına ve ekonomik kalkınma hızına bağlı olarak şekillenmektedir (ESCAP 2017). Bu nedenle, enerji planlamasında sadece tarihsel verilere dayanmak yeterli değildir; şehrin gelecekteki gelişim dinamiklerini de yansıtacak senaryoların oluşturulması gereklidir.

Bu çalışma kapsamında, yalnızca Herat Şehri'nin kendi tüketim eğilimlerine ve gelişme potansiyeline dayalı dört farklı enerji talebi senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryolar; mevcut altyapının sürdüğü (Senaryo A), elektrik erişiminin iyileştiği (Senaryo B), kentleşmenin hız kazandığı (Senaryo C) ve tam sürdürülebilir dönüşümün gerçekleştiği (Senaryo D) durumları temsil etmektedir.

Senaryo A – Mevcut Durumun Devamı

- Şehirde enerjiye erişim sınırlı kalır, dışa bağımlı elektrik ithalatı devam eder.
- Her yıl yaklaşık %3 artış varsayılır.
- 2025: 493333 MWh → 2030: $\approx$ 571000 MWh

Senaryo B – Enerjiye Erişimde İyileşme

- İthal elektrik arttırılır, kesintiler azalır.
- Yenilenebilir enerji yatırımları başlar.
- Yıllık %10 büyüme varsayılır.
- 2025: 493333 MWh → 2030: $\approx$ 793000 MWh

Senaryo C – Kentsel Gelişim ve Elektrifikasyon

- Elektrifikasyon, evsel cihaz kullanımı, küçük sanayi ve ulaşım sistemleri büyür.
- Yıllık ortalama %15 artış.
- 2025: 493333 MWh → 2030: $\approx$ 991000 MWh

Senaryo D – Sürdürülebilir Kalkınma ve Yeşil Dönüşüm

- Geniş ölçekli güneş ve rüzgar yatırımları, batarya sistemleri, yeni şebeke yatırımları.
- Elektrikli araçlar, ev aletleri yaygınlaşır.
- %20 büyüme varsayılır.
- 2025: 493333 MWh → 2030: $\approx$ 1224000 MWh

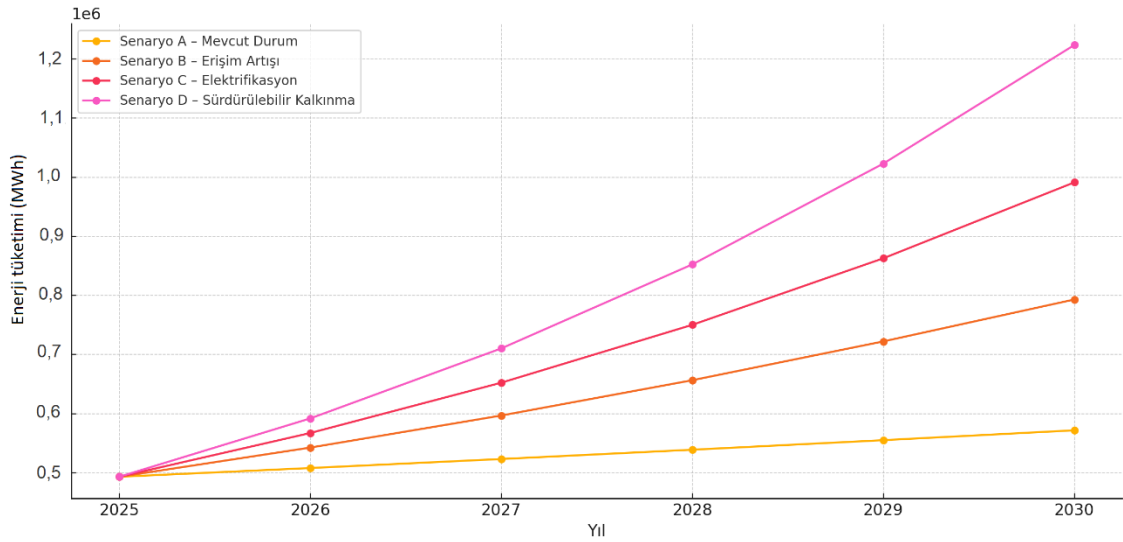
Senaryo A, düşük büyüme eğiliminde, 2030 yılında enerji ihtiyacının yaklaşık 572 bin MWh civarında olacağını öngörmektedir. Senaryo B, altyapı geliştirmeleri ve ithalat kapasitesindeki artışla, 2030 yılında 793 bin MWh civarında bir tüketime ulaşılacağını öngörmektedir. Daha agresif bir büyüme senaryosu olan Senaryo C’de, elektrikli cihaz kullanımı ve sanayi gelişiminin etkisiyle talep yaklaşık 1 milyon MWh’ye yaklaşmaktadır. En iddialı tahmin olan Senaryo D ise, yenilenebilir enerji yatırımları, şebeke dönüşümü ve sürdürülebilir kalkınma politikaları ile birlikte, 2030 yılına kadar 1,2 milyon MWh seviyesine çıkabilecek bir enerji ihtiyacını işaret etmektedir (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. Herat Şehri için 2025–2030 arası enerji talep projeksiyonları (senaryo bazlı)

Yıl	Senaryo A (BAU)	Senaryo B (Erişim Artışı)	Senaryo C (Elektrifikasyon)	Senaryo D (Sürdürülebilir Gelişim)
2025	493333 MWh	493333 MWh	493333 MWh	493333 MWh
2026	508133 MWh	542666 MWh	567333 MWh	592000 MWh
2027	523377 MWh	596933 MWh	652433 MWh	710400 MWh
2028	539078 MWh	656627 MWh	750298 MWh	852480 MWh
2029	555250 MWh	722289 MWh	862843 MWh	1022976 MWh
2030	571908 MWh	793189 MWh	991269 MWh	1223571 MWh

Herat Şehri için 2025–2030 yılları arasındaki enerji tüketim projeksiyonlarının farklı senaryolara göre (A–D) yıllık enerji talebindeki değişimleri Şekil 4.48’de gösterilmiştir. Buna göre:

- Senaryo A – Mevcut Durum: Minimum artışla, mevcut altyapı kapasitesine dayalı yavaş büyüme.
- Senaryo B – Erişim Artışı: Enerjiye erişimin genişletilmesiyle ölçülü ama sürdürülebilir artış.
- Senaryo C – Elektrifikasyon: Yeni teknolojiler ve elektrifikasyon yatırımlarıyla daha yüksek talep artışı.
- Senaryo D – Sürdürülebilir Kalkınma: Kapsayıcı kalkınma, sanayileşme ve şehirleşmenin etkisiyle agresif büyüme.



Şekil 4.48. Herat Şehri için 2025–2030 yılları arasındaki enerji tüketim projeksiyonları

Bu projeksiyonlar, enerji arz güvenliği, yatırım planlaması ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından kritik veriler sunmaktadır. Ayrıca, ilerleyen bölümlerde değerlendirilen yenilenebilir enerji potansiyeli ile bu taleplerin hangi ölçüde karşılanabileceği de analiz edilerek kapsamlı bir enerji dönüşüm yol haritası oluşturulmuştur.

4.4.4. Sürdürülebilir enerjisi ile elektrik tüketiminin karşılanabilirliği

Senaryo bazlı projeksiyonlarda ortaya konan enerji tüketimi artışı, Herat Şehri'nin mevcut enerji altyapısı açısından önemli bir kapasite artışı ihtiyacına işaret etmektedir. Bu artan enerji tüketiminin çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek zorunludur. Çizelge 4.9’da, güneş ve rüzgar enerjisi Herat özelinde en öne çıkan alternatif enerji kaynaklarıdır.

Çizelge 4.9. Herat Şehri İçin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Kaynak Türü	Potansiyel	Öne Çıkan Özellikler	Uygunluk Durumu
Güneş Enerjisi	4,5 – 6,5 kWh/m ² /gün	Yüksek güneşlenme süresi	Şebekeye bağlı ve bağımsız sistemler için uygun
	300+ güneşli gün/yıl	Geniş alanlarda uygun radyasyon düzeyleri	
Rüzgar Enerjisi	Uygun rüzgar hızları ve güç yoğunluğu (yerel değerlendirmelerle belirlenmiş)	Dağlık topoğrafya sayesinde istikrarlı rüzgar akımları	Türbin kurulumu için belirli bölgelerde yüksek potansiyel
Hidroelektrik	Afganistan genelinde ~23000 MW	Büyük orta ve küçük akarsular hidro sistemlere uygun	Dağ köyleri gibi şebeke dışı alanlar için alternatif
	(Yüksek hidroelektrik potansiyeline sahiptir.)		
Biyokütle	Belirli	Tarım ve hayvancılığa dayalı organik atıkların değerlendirilmesi	Kırsal kesimlerde biyogaz sistemleri için uygun
Jeotermal	Düşük – belirsiz	Jeolojik veriler var ancak yetersizdir	Düşük sıcaklıklı kaynaklar için potansiyel olabilir
	(araştırma gerektirir)		

4.4.4.1. Güneş enerjisi ile karşılanabilir potansiyel

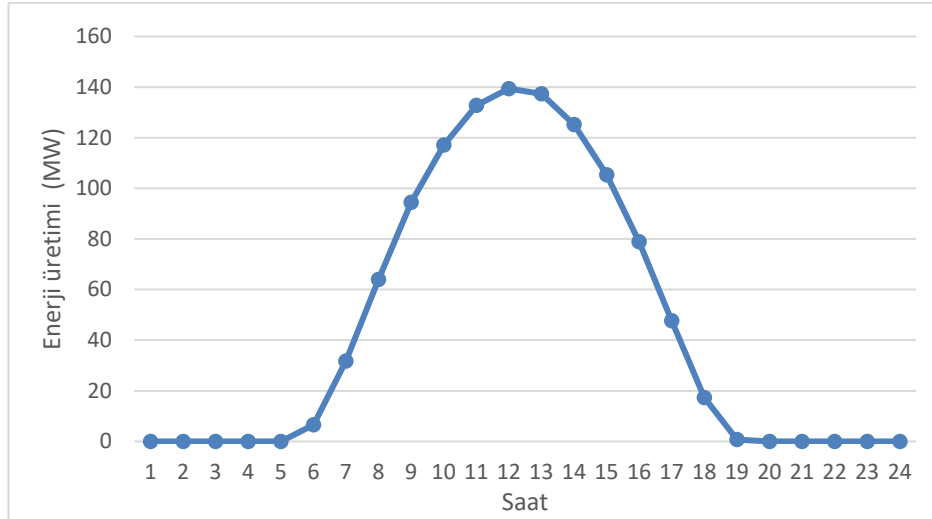
Herat'ta yıllık ortalama 300 güneşli gün ve 4,5–6,5 kWh/m²/gün arasında değişen güneş radyasyonu değerleri, güneş enerjisini en öne çıkan kaynak haline getirmektedir. Burada, Herat Şehri için tasarlanan 200 MWp kurulu güce sahip fotovoltaik (PV) sistemin saatlik bazda aylık elektrik üretimi sunulmaktadır.

Bu analizde kullanılan üretim verileri, Dünya Bankası destekli Global Solar Atlas (GSA) veritabanından elde edilmiştir. Global Solar Atlas, Solargis veri altyapısına dayanmaktadır ve yüksek çözünürlüklü uydu verileriyle, küresel çapta güneş radyasyonu ve PV üretim potansiyelini değerlendirmeye olanak tanır. Herat şehir merkezi için belirlenen koordinat noktası temel alınarak, sistemin eğimi 10°, panel yönelimi ise güney (azimut 180°) olacak şekilde varsayılmıştır. Kullanılan sistem tipolojisi sabit montajlı standart fotovoltaik sistemdir. Sistem kayıpları (inverter, sıcaklık, kablolama vb.) Global Solar Atlas varsayılan parametreleri çerçevesinde %14 olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.10'da, Herat iklim koşullarına göre her bir ay için günün saatlerine göre elde edilen üretim değerleri ayrıntılı biçimde verilmiştir. Bu veriler, sistemin yıl boyunca güneşlenme sürelerine ve mevsimsel değişimlere bağlı üretim performansını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Çizelge 4.10. Herat Şehri için 200 MWp PV sistemine ait aylık ve saatlik elektrik üretimi (MWh)

PV Sistemi: Fotovoltaik sistem PV Panellerinin Azimutu: Varsayılan (180°) PV Panellerinin Eğimi: Varsayılan (10°) Kurulu Kapasite: 200 MWp												
Saat	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
0-1												
1-2												
2-3												
3-4												
4-5												
5-6				0,9	6,5	9,0	5,7	1,8	0,2			
6-7		0,1	4,1	18,5	31,8	36,4	31,3	24,6	18,0	6,6	0,6	0,0
7-8	5,4	16,3	3,4	49,9	63,9	70,2	64,6	60,6	56,4	44,5	22,1	6,5
8-9	37,1	47,1	62,2	80,9	94,4	100,5	95,8	94,0	91,5	79,0	54,7	40,2
9-10	62,6	72,9	89,1	106,7	117,1	123,8	120,5	119,6	118,2	105,3	78,5	65,9
10-11	80,9	92,8	107,7	124,1	132,8	139,5	136,8	136,4	134,7	122,4	94,5	82,6
11-12	90,4	104,1	120,2	131,7	139,4	146,1	144,7	144,3	141,4	129,1	100,6	90,2
12-13	89,9	107,0	122,0	129,7	137,3	143,9	142,9	142,9	137,7	122,8	96,7	88,8
13-14	80,0	94,5	107,1	117,0	125,1	132,9	133,1	132,2	124,5	106,2	81,3	77,4
14-15	61,7	74,9	85,9	95,9	105,3	114,2	115,1	113,0	102,6	81,3	58,7	56,0
15-16	36,4	50,5	59,1	69,0	78,9	88,5	89,8	85,4	71,7	48,9	27,2	21,7
16-17	4,9	19,7	30,3	38,4	47,6	57,8	58,7	52,1	34,2	10,3	1,1	0,4
17-18		0,1	3,5	9,3	17,3	25,9	26,5	17,2	3,5			
18-19					0,7	3,7	3,7	0,6				
19-20												
20-21												
21-22												
22-23												
23-24												
Top (MW_Gün)	549,2	680,0	822,6	972,0	1098,1	1192,4	1169,2	1124,6	1034,5	856,4	615,9	529,7

Şekil 4.49’da Herat Şehri için tasarlanan 200 MWp kurulu güce sahip fotovoltaik güneş enerjisi sisteminin Mayıs ayına ait saatlik elektrik üretimi örnek olarak gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, enerji üretimi sabah saatlerinde (06:00’den itibaren) artış göstermekte, 11:00–13:00 saat aralığında maksimum seviyeye (~140 MWh) ulaşmakta ve akşam saatlerinde azalarak sıfıra inmektedir. Bu üretim profili, güneş ışınımının gün içindeki dağılımını ve PV sistemin buna bağlı olarak nasıl tepki verdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu eğri, Mayıs ayında güneşlenme süresinin uzunluğu ve ışınım yoğunluğunun yüksekliği sayesinde sistemin oldukça verimli çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.49. Herat Şehri için 200 MWp güneş enerjisi sisteminin mayıs ayına ait saatlik elektrik üretimi

Bu potansiyel doğrultusunda yapılacak bir tahmini analiz, aşağıdaki gibi kurgulanabilir:

- 1 m² fotovoltaik panel, ortalama günlük 5,5 kWh/m²/gün radyasyonla yılda yaklaşık 1800–2000 kWh elektrik üretebilir.
- Gelişmiş verimlilikte bir sistemin kurulumuyla, 1 MW kurulu güç, Herat koşullarında yılda yaklaşık 1600–1700 MWh üretim potansiyeline sahiptir.
- Bu bilgiler ışığında, örneğin:
 - Senaryo A (572000 MWh için) → yaklaşık 350 - 370 MW kurulu güneş enerjisi kapasitesi yeterli olabilir.
 - Senaryo B (793000 MWh için) → yaklaşık 490 - 520 MW kurulu kapasite gerekir.
 - Senaryo C (991000 MWh için) → yaklaşık 620 – 650 MW kurulu kapasite gerekir.
 - Senaryo D (1,224 milyon MWh için) → yaklaşık 750 - 800 MW kurulu kapasite gerekir (Çizelge 4.11).

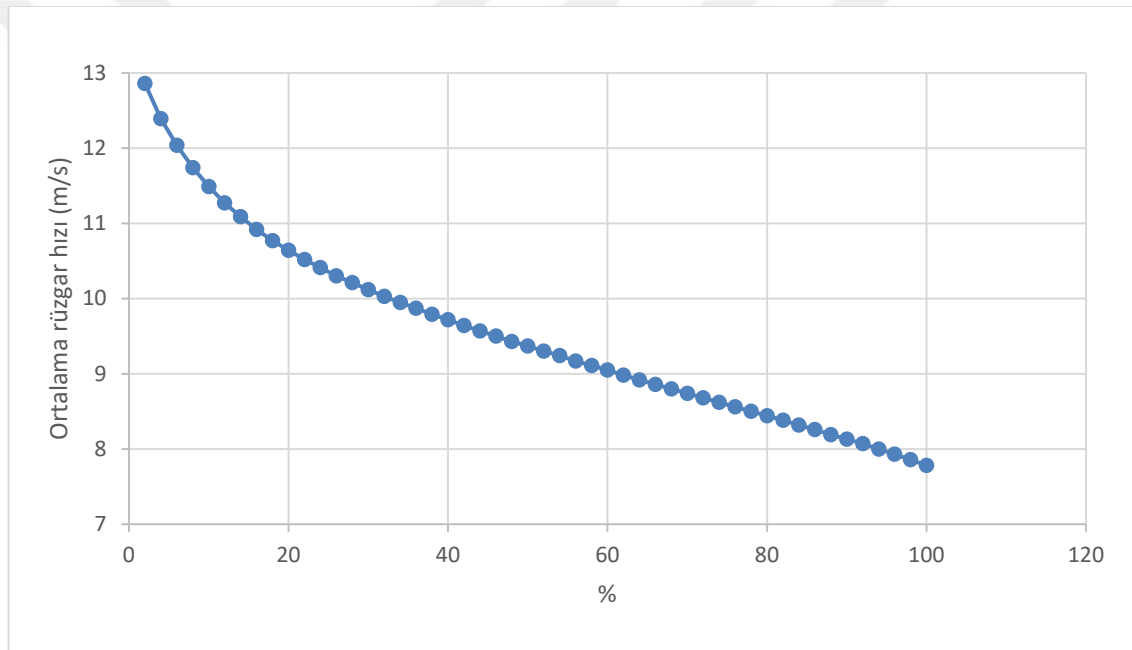
Çizelge 4.11. Farklı kurulu güç değerlerine göre Herat Şehri için yıllık güneş enerjisi üretimi ve tüketim karşılama oranı (senaryo D'ye göre)

Kurulu PV Gücü (MW)	Yıllık Üretim (MWh)	Karşılanan Tüketim (Senaryo D'ye göre)
200 MW	320000 MWh	25%
400 MW	640000 MWh	50%
600 MW	960000 MWh	75%

Bu projeksiyonlar, güneş enerjisi sistemlerinin yaygınlaştırılmasıyla Herat'ın enerji arz güvenliğinin büyük ölçüde sağlanabileceğini göstermektedir.

4.4.4.2. Rüzgar enerjisi ile destekleyici üretim potansiyeli

Herat'ın bazı bölgelerinde, özellikle 100 m yükseklikte ölçülen ortalama 11,5 m/s rüzgar hızlarına ulaşan en rüzgarlı %10'luk alanlar, ticari ölçekte rüzgar enerjisi üretimi açısından oldukça elverişlidir. Bu değerler, orta ve büyük ölçekli modern rüzgar türbinlerinin verimli çalışabileceği hız aralığında yer almaktadır. Örneğin, IEC sınıflandırmasına göre IEC Class I türbinler 10 m/s'ye kadar ortalama hızlara uygun olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle, söz konusu bölgelerde rüzgar enerjisi yatırımları teknik olarak uygulanabilir görülmektedir. Güneş enerjisinin gece saatlerinde üretim yapamaması nedeniyle, rüzgar enerjisi gece saatlerinde şebeke desteği sağlamak için stratejik öneme sahiptir. Ayrıca, Herat Şehri'nin en rüzgarlı %10'luk bölgesinin ortalama rüzgar hızı 11,5 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu veriler Şekil 4.50'de gösterilmiştir.



Şekil 4.50. Herat Şehri'nin en rüzgarlı alanının yüzdesi olarak ortalama rüzgar hızı grafiği

Ortalama 1,5 MW kapasiteli bir rüzgar türbini, Herat Şehri'nin rüzgar rejimi dikkate alındığında yılda yaklaşık 3800 ile 4200 MWh arasında elektrik üretebilmektedir. Bu miktar, türbinin kurulduğu bölgedeki rüzgar hızı, türbinin yüksekliği, verimlilik oranı ve teknik özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin, Çizelge 4.12'de görüldüğü gibi Herat'ın en rüzgarlı bölgelerinde 100 adet 1,5 MW kapasiteli türbin kurularak toplamda 150 MW kurulu güç elde edilebilir.

Çizelge 4.12. Herat Şehri için rüzgar türbini sayısına göre toplam kapasite ve yıllık elektrik üretimi

Türbin Sayısı	Toplam Kapasite (MW)	Yıllık Üretim (MWh)
100	150 MW	400000
200	300 MW	800000

Bu kapasiteyle yıllık üretim 400000 ile 800000 MWh düzeyinde olur ki bu da Senaryo A kapsamında öngörülen mevcut yıllık enerji ihtiyacını neredeyse tamamen karşılayabilecek düzeydedir. Daha yüksek tüketim senaryolarında (örneğin Senaryo C ve D), rüzgar enerjisi güneş enerjisi ile birlikte hibrit sistem olarak kullanılabilir. Bu sayede hem gündüz hem de gece saatlerinde üretim sağlanarak şebeke dengelemesi kolaylaştırılabilir ve fosil yakıtlara olan bağımlılık önemli ölçüde azaltılabilir.

- 1 MW rüzgar türbini, ortalama rüzgar hızına bağlı olarak yılda yaklaşık 1500–2500 MWh üretim kapasitesine sahiptir.
- Herat'ın en rüzgarlı bölgelerinde 1000 MW düzeyinde kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi kurulması, yıllık yaklaşık 1,5–2,5 milyon MWh üretim sağlayabilir.
- Bu, özellikle Senaryo B ve C kapsamında gece saatlerindeki tüketimi karşılamak için güneş enerjisini tamamlayıcı bir sistem olarak kullanılabilir.

Bu kapsamda, güneş ve rüzgar enerjisinin entegrasyonu ile 2030 yılına kadar, Senaryo D düzeyinde (1,224 milyon MWh) bir tüketimin tamamına yakını sürdürülebilir kaynaklarla karşılanabilir hale gelebilir.

4.4.4.3. Hibrit enerji stratejisi ve sürdürülebilirlik

Güneş ve rüzgar enerjisi kaynaklarının birbirini tamamlayıcı yapısı, Herat'ın enerji güvenliğini artırmak için büyük bir avantaj sunmaktadır. Ancak, üretim ve tüketim zamanlarının tam örtüşmemesi nedeniyle enerji depolama sistemleri (batarya sistemleri) ile akıllı şebeke teknolojilerinin kullanımı kaçınılmazdır. Ayrıca, şebeke altyapısının güçlendirilmesi ve dağıtık enerji üretim sistemlerinin yaygınlaştırılması ile maksimum verimlilik sağlanabilir.

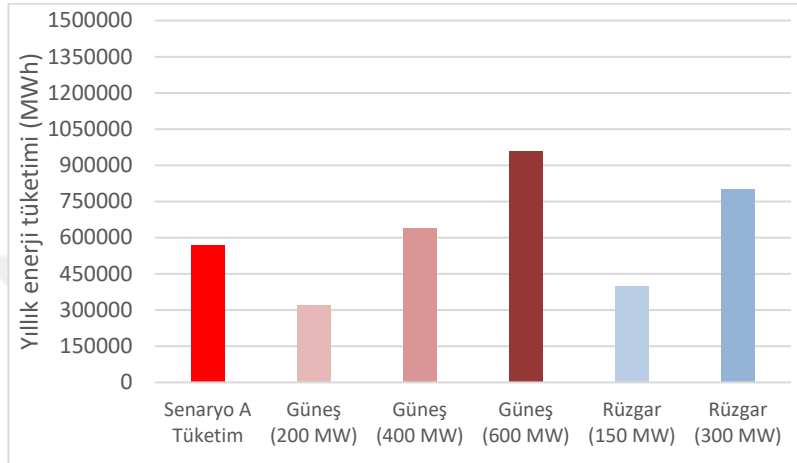
Güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinin bir arada ve hibrit şekilde kullanılması:

- Yıl boyunca kesintisiz enerji üretimi sağlar,
- Fosil yakıt bağımlılığını azaltır,
- Kırsal alanların elektrifikasyonunu destekler,
- Şebeke stabilitesini artırır.

Herat şehri için önerilen enerji dönüşüm stratejisi, güneş ve rüzgar enerjisinin entegre edilmesiyle, 2030 yılına kadar öngörülen tüketim projeksiyonlarının büyük bölümünün çevreci ve sürdürülebilir şekilde karşılanmasını mümkün kılacaktır. Aşağıdaki grafikler, Herat Şehri için Senaryo A, B, C ve D kapsamında öngörülen 2030

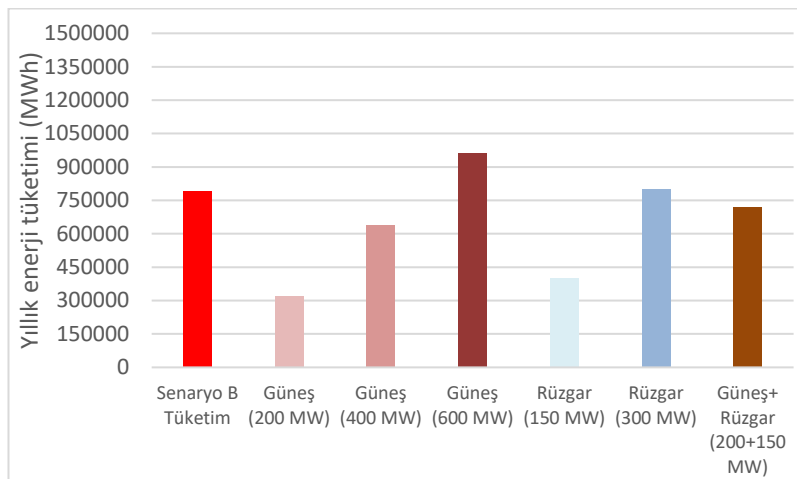
yılına ait yıllık enerji tüketimlerini ve bu tüketimlerin güneş ve rüzgar enerjisi sistemleriyle ne ölçüde karşılanabileceğini görsel olarak sunmaktadır.

Şekil 4.51'de sunulan Senaryo A (Mevcut Durumun Devamı) kapsamında, yıllık enerji tüketimi 572000 MWh olarak öngörülmektedir. Bu düzeydeki bir tüketim, yalnızca 400 MW kapasiteli güneş enerjisi santrali ya da 250 MW düzeyinde rüzgar santrali ile tam olarak karşılanabilir durumdadır. Dolayısıyla, mevcut altyapıya ek olarak orta ölçekli bir yenilenebilir enerji yatırımı yeterli olacaktır.



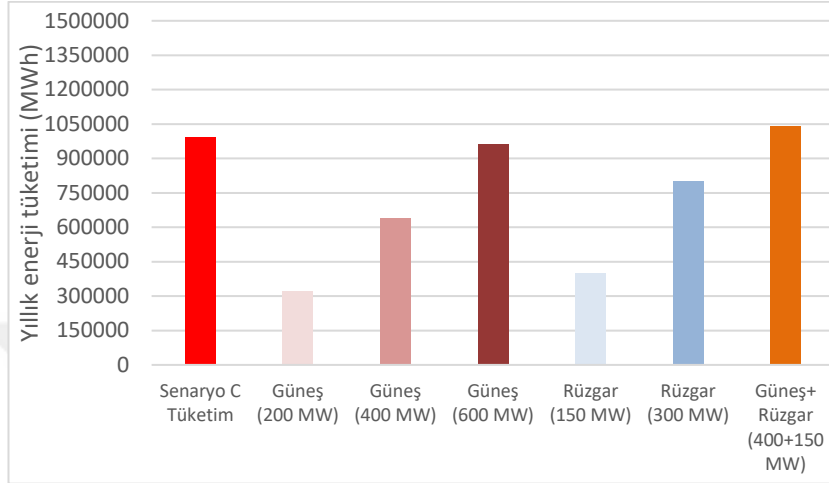
Şekil 4.51. Senaryo A (mevcut durum) için yıllık enerji tüketimi ve güneş-rüzgar enerjisi ile karşılanma potansiyeli

Şekil 4.52'de sunulan Senaryo B (Enerjiye Erişimde İyileşme) kapsamında ise enerji tüketimi yılda 793000 MWh olarak tahmin edilmiştir. Bu seviyedeki bir tüketimi karşılamak için 200 MW'lık güneş enerjisi ile birlikte 150 MW'lık rüzgar enerjisi santrallerinin entegre edilmesi gerekmektedir. Bu hibrit yapı sayesinde enerji arzının sürdürülebilir ve dengeli bir şekilde sağlanması mümkündür.



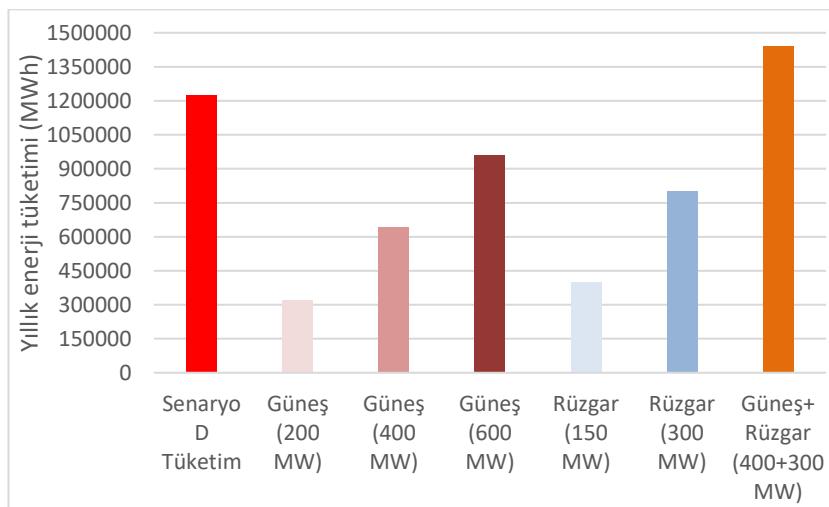
Şekil 4.52. Senaryo B (Enerjiye Erişimde İyileşme) için yıllık enerji tüketimi ve güneş-rüzgar enerjisi ile karşılanma potansiyeli

Şekil 4.53'te yer alan Senaryo C (Kentsel Gelişim ve Elektrifikasyon) ise yıllık yaklaşık 991000 MWh düzeyinde bir enerji ihtiyacını ifade etmektedir. Bu tüketim, yalnızca daha büyük ölçekli güneş ve rüzgar santralleri yatırımlarıyla karşılanabilir. 400 MW güneş + 150 MW rüzgar enerjisi santrallerinin entegre edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, üretim kapasitesinin önemli ölçüde artırılması ve enerji depolama sistemleri ile desteklenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.53. Senaryo C (Kentsel Gelişim ve Elektrifikasyon) için yıllık enerji tüketimi ve güneş-rüzgar enerjisi ile karşılama potansiyeli

Son olarak, Şekil 4.54'te verilen Senaryo D (Sürdürülebilir Kalkınma ve Yeşil Dönüşüm), 1224000 MWh'lik çok yüksek bir yıllık enerji ihtiyacına işaret etmektedir. 400 MW güneş + 300 MW rüzgar enerjisi santrallerinin entegre edilmesi gerekmektedir. Bu düzeydeki tüketim yalnızca ulusal düzeyde kapsamlı bir şebeke dönüşümü, çok büyük ölçekli yenilenebilir enerji yatırımları ve dış kaynaklı finansmanla mümkün hale gelebilir. Bu nedenle, Herat'ın böyle bir hedefe ulaşabilmesi için çok ciddi altyapı, teknoloji ve sermaye yatırımlarına ihtiyacı vardır.



Şekil 4.54. Senaryo D (Sürdürülebilir Kalkınma ve Yeşil Dönüşüm) için yıllık enerji tüketimi ve güneş-rüzgar enerjisi ile karşılama potansiyeli

5. SONUÇLAR

Bu bölümde, tez çalışmasının bulguları özetlenmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda önemli çıkarımlar yapılmıştır. Tez çalışmasının hedeflerine ulaşılabilmesi için kullanılan yöntemlerin etkinliği, model performansları ve enerji tüketimine ilişkin yapılan tahminlerin doğruluğu detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Ayrıca, Herat şehri için belirlenen gelecekteki senaryolara dayalı enerji ihtiyacı analizleri ve potansiyel yenilenebilir enerji kaynaklarının rolü de ele alınmıştır.

Bu tez çalışması, Herat Şehri bağlamında sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik veri temelli bir strateji geliştirerek, hem yapay zekâ tabanlı enerji tüketim tahmin modellerini hem de yenilenebilir enerji potansiyelini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Analiz süreci, ileri düzey makine öğrenimi algoritmalarıyla enerji tüketim desenlerinin modellenmesini ve elde edilen çıktılarla birlikte gelecek senaryo projeksiyonlarının karşılaştırmalı analizini içermektedir.

YZ Model Performansı ve Tüketim Tahmini Sonuçları

Yapay zekâ modelleri arasında en başarılı performans, zaman serisi verileriyle çalışan LSTM (Uzun Kısa Süreli Bellek) modeli ile elde edilmiştir. Model 12 yapılandırmasında kullanılan parametrelerle, test verisinde $R^2=0,891$, $MSE=18,16$, $MAE=2,997$ değerlerine ulaşılmıştır. Diğer modellerin en iyi sonuçları incelendiğinde, SVR modelinin en yüksek R^2 skoru 0,5613 ve MSE değeri 122,45; Random Forest modelinin R^2 skoru 0,7765 ve MSE değeri 36,67; FNN (İleri Beslemeli Sinir Ağı) modelinin ise R^2 skoru 0,7868 ve MSE değeri 34,85 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile LSTM modelinin, Herat gibi yüksek mevsimsel değişkenlik gösteren bölgelerde enerji tahmini açısından en uygun yapay zekâ aracı olduğu kanıtlanmıştır.

LSTM tahminlerine göre, gelecek döneme ait aylık ortalama elektrik tüketimini 41400 MWh olarak öngörmektedir. Bu veri, mevcut altyapının sınırları ve tarihsel tüketim düzeyleri dikkate alınarak modellenmiştir. Günlük ve saatlik tahminlerde yaz aylarında belirgin tüketim artışı gözlenmiş, en yüksek tüketim saatlerinin akşam 18:00–22:00 arasında yoğunlaştığı saptanmıştır ve bu zaman aralığında tüketimin 75-80 MWh seviyesine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum ise enerji arzında esneklik ve yük yönetimi ihtiyacını vurgulamaktadır.

Nüfus Artışı ve Enerji Talebine Etkisi

Herat Şehri'nde artan nüfus ve sosyo-ekonomik kalkınma hedefleri, enerji talebinde sürekli bir artışı zorunlu kılmaktadır. Son dört yıllık dönemde yıllık enerji tüketimi 423000 MWh'den 493333 MWh'ye yükselmiş olup bu artış, LSTM modeline dayalı tahminlerle desteklenmiştir. Nüfusun 2025 yılı itibarıyla 753000'e ulaşması beklenmekte olup, kişi başı tüketim hâlâ bölgesel ve uluslararası ortalamaların altındadır. Bu durum, yalnızca arz yönlü değil, aynı zamanda enerjiye erişim ve kullanım alışkanlıkları açısından da bir dönüşüm ihtiyacını göstermektedir.

Yenilenebilir Enerji Potansiyeli ve Üretim Kapasitesi

Bu tez çalışması kapsamında yapılan potansiyel analizler, Herat'ın yenilenebilir enerji kaynakları açısından önemli fırsatlar barındırdığını göstermiştir.

- Güneş Enerjisi: Yıllık ortalama 300'den fazla güneşli gün ve 4,5–6,5 kWh/m²/gün güneş radyasyonu ile Herat, fotovoltaik sistemler için yüksek uygunluğa sahiptir. Tasarlanan 400 MWp kapasiteli PV sistemi yıllık yaklaşık 640000 MWh üretim kapasitesine sahiptir. Bu miktar, Senaryo A'daki mevcut enerji tüketimini tamamen karşılayacak seviyededir.
- Rüzgar Enerjisi: Şehrin en rüzgarlı %10'luk alanında ortalama rüzgar hızı 11,5 m/s olarak ölçülmüştür. Bu bölgelerde kurulacak 300 MW kapasiteli rüzgar türbini sistemi, yıllık yaklaşık 800000 MWh elektrik üretebilir. Özellikle gece üretimini destekleyen rüzgar enerjisi, güneş sistemleriyle hibrit biçimde kullanıldığında enerji arzının sürekliliğini sağlamaktadır.

Senaryo Bazlı Tüketim Projeksiyonları (2025–2030)

2025–2030 yılları arasını kapsayan projeksiyonlar, dört senaryo altında değerlendirilmiştir. Buna göre 2030 yılı için:

- Senaryo A (Mevcut Durumun Sürmesi): Düşük altyapı yatırımıyla yaklaşık 572000 MWh tüketim öngörülmektedir.
- Senaryo B (Erişim Artışı): Elektrik arzında iyileşme ve kesintilerin azalmasıyla 793000 MWh seviyesine ulaşılabilir.
- Senaryo C (Kentsel Gelişim ve Elektrifikasyon): Yeni teknolojilerin yaygınlaşmasıyla 991000 MWh talep tahmini yapılmıştır.
- Senaryo D (Sürdürülebilir Kalkınma): Yenilenebilir enerji yatırımları ve yeşil dönüşüm politikalarıyla 1224000 MWh seviyesinde bir talep öngörülmektedir.

Bu senaryolar, enerji arz güvenliği, yatırım planlaması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak açısından temel karar destek mekanizmaları sunmaktadır.

Güneş ve rüzgar sistemlerinin hibrit entegrasyonu, özellikle Senaryo B ve C düzeyindeki tüketimin %80–100'ünü karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Senaryo D gibi iddialı hedeflere ulaşabilmesi için Herat'ın enerji altyapısında köklü iyileştirmelere, ileri teknoloji entegrasyonuna ve önemli düzeyde sermaye yatırımlarına gereksinimi vardır.

Bu bulgular, Herat'ın sürdürülebilir enerji dönüşümünde atacağı adımların veri temelli planlamaya dayanması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, yerel potansiyelin doğru kullanılması hâlinde, şehir yalnızca enerji ihtiyacını karşılamakla kalmayıp, bölgesel bir enerji modeli haline de gelebilecektir.

Bu tez çalışması, Herat Şehri özelinde enerji tüketimi tahmini ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının entegrasyonuna dair önemli veriler ortaya koymuş olsa da, ileride gerçekleştirilebilecek araştırmalarla daha kapsamlı ve uygulanabilir stratejiler geliştirilebilir. Bu bağlamda, aşağıdaki öneriler gelecekteki çalışmalar için yol gösterici niteliktedir:

Veri Toplama ve Bilgi Paylaşımını Geliştirmek

Herat'ta enerji planlamasına yönelik daha hassas yapay zekâ (YZ) modelleri geliştirilebilmesi için kapsamlı ve zamansal çözünürlüğü yüksek veri setlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda:

- Akıllı sayaçlar, sensör ağları ve IoT tabanlı cihazlarla enerji tüketiminin anlık takibi sağlanmalıdır.
- Uydu görüntüleme ve uzaktan algılama sistemleri ile güneş ve rüzgar potansiyeli düzenli olarak izlenmelidir.
- Tüm enerji aktörlerinin erişebileceği merkezi bir açık veri platformu kurulmalıdır.

YZ Modellerini Geliştirmek ve Genişletmek

Bu tez kapsamında LSTM algoritması öne çıkmış olsa da, farklı modellerin kullanımı daha yüksek doğruluk sağlayabilir:

- Takviyeli öğrenme (reinforcement learning), GNN (graph neural networks) ve transformer temelli modeller gibi ileri düzey yapılar test edilebilir.
- Tüketim tahminlerinde iklim değişikliği senaryoları, ekonomik büyüme verileri ve sosyal davranışsal değişkenler modele entegre edilerek daha bütüncül tahminler yapılabilir.
- Belirsizliği azaltan ve anlık veri akışına uyum sağlayan hibrit tahmin sistemleri geliştirilebilir.

YZ Tabanlı Enerji Yönetimi ve Pilot Uygulamalar

- Gerçek zamanlı tüketim tahmini, arz yönetimi ve yük dengeleme için YZ destekli enerji yönetim sistemleri pilot bölgelerde test edilmelidir.
- Kırsal alanlarda mikro-şebeke uygulamalarında YZ tabanlı enerji dağıtım algoritmaları ile verimlilik artırılabilir.
- Güneş ve rüzgar enerjisine dayalı hibrit sistemlerin uygulanacağı pilot projeler geliştirilerek farklı senaryolarda sistem tepkileri analiz edilebilir.

Tüm bu geleceğe dönük adımlar, teknik, sosyal, yönetsel ve çevresel boyutlar dikkate alınarak, benzer özellikler taşıyan şehirlerin sürdürülebilir enerji dönüşümünü etkin biçimde gerçekleştirmesini mümkün kılacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Ahmad, T., Madonski, R., Zhang, D., Huang, C. and Mujeeb, A. 2022. 'Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160: 112128.
- Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y. and Chen, H. 2021. 'Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities', *Journal of Cleaner Production*, 289: 125834.
- Ahmad, T., Zhu, H., Zhang, D., Tariq, R., Bassam, A., Ullah, F., AlGhamdi, A. S. and Alshamrani, S. S. 2022. 'Energetics Systems and artificial intelligence: Applications of industry 4.0', *Energy Reports*, 8: 334-61.
- Ahmadzai, S. and McKinna, A. 2018. "Afghanistan electrical energy and trans-boundary water systems analyses: challenges and opportunities. *Energy Reports* 4: 435–469.
- Akseer, N., Bhatti, Z., Mashal, T., Soofi, S., Moineddin, R., Black, R. E. and Bhutta, Z. A. 2018. 'Geospatial inequalities and determinants of nutritional status among women and children in Afghanistan: an observational study', *The Lancet Global Health*, 6: e447-e59.
- Al-Shetwi, A. Q. 2022. 'Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges', *Science of The Total Environment*, 822: 153645.
- Alavi, S. F. and Tanaka, T. 2023. 'Analyzing the Role of Identity Elements and Features of Housing in Historical and Modern Architecture in Shaping Architectural Identity: The Case of Herat City', *Architecture*, 3: 548-77.
- Aldarraj, M., Vega-Márquez, B., Pontes, B., Mahmood, B. and Riquelme, J. C. R. 2024. 'Addressing energy challenges in Iraq: Forecasting power supply and demand using artificial intelligence models', *Heliyon*, 10: 4-e25821
- Algarni, S., Tirth, V., Alqahtani, T., Alshehery, S. and Kshirsagar, P. 2023. 'Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56: 103098.
- Allal, Z., Noura, H. N., Salman, O. and Chahine, K. 2024. 'Leveraging the power of machine learning and data balancing techniques to evaluate stability in smart grids', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133: 108304.
- Allouhi, A. 2021. 'A novel grid-connected solar PV-thermal/wind integrated system for simultaneous electricity and heat generation in single family buildings', *Journal of Cleaner Production*, 320: 128518.
- Amin, M. 2017. 'An Institutional Analysis of the Power Sector in Afghanistan—Barriers to Achieving Universal Access to Electricity'.
- Antonopoulos, I., Robu, V., Couraud, B., Kirli, D., Norbu, S., Kiprakis, A., Flynn, D., Elizondo-Gonzalez, S. and Wattam, S. 2020. 'Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: A systematic review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130: 109899.

- Anwarzai, M. A. and Nagasaka, K. 2017. 'Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71: 150-60.
- Arent, D. J., Green, P., Abdullah, Z., Barnes, T., Bauer, S., Bernstein, A., Berry, D., Berry, J., Burrell, T. and Carpenter, B. 2022. 'Challenges and opportunities in decarbonizing the US energy system', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169: 112939. 1
- Asante, D., Ampah, J. D., Afrane, S., Adjei-Darko, P., Asante, B., Fosu, E., Dankwah, D. A. and Amoh, P. O. 2022. 'Prioritizing strategies to eliminate barriers to renewable energy adoption and development in Ghana: A CRITIC-fuzzy TOPSIS approach', *renewable energy*, 195: 47-65.
- Asim, G. M., and Ando, T. 2020. 'A study on cisterns in the Herat old city, Afghanistan', *Journal of Architecture and Planning*, 85: 781–789.
- Bakos, E. and Fishstein, P. 2018. 'Global Economic Governance and the challenge of economic sustainability in Afghanistan.' in, *Global Economic Governance and Human Development* (Routledge).
- Boute, A. 2020. 'Regulatory stability and renewable energy investment: The case of Kazakhstan', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121: 109673.
- Busco, C. and Sofra, E. 2021. 'The evolution of sustainability reporting: Integrated reporting and sustainable development challenges', *Corporate Sustainability in Practice: A Guide for Strategy Development and Implementation*: 191-206.
- Byrne, R., Hewitt, N. J., Griffiths, P. and MacArtain, P. 2021. 'A comparison of four microscale wind flow models in predicting the real-world performance of a large-scale peri-urban wind turbine, using onsite LiDAR wind measurements', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46: 101323.
- Campbell-Lendrum, D., Neville, T., Schweizer, C. and Neira, M. 2023. 'Climate change and health: three grand challenges', *Nature Medicine*, 29: 1631-38.
- Canton, H. 2021. 'International energy agency—IEA.' in, *The Europa Directory of International Organizations 2021* (Routledge).
- Carley, S. and Konisky, D. M. 2020. 'The justice and equity implications of the clean energy transition', *Nature Energy*, 5: 569-77.
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E. and Schellnhuber, H. J. 2020. 'Buildings as a global carbon sink', *Nature Sustainability*, 3: 269-76.
- Clark, G. 2016. *Global cities: A short history* (Brookings Institution Press).
- Cohen, S. 2025. 'The evolution of machine learning: Past, present, and future.' in, *Artificial Intelligence in Pathology* (Elsevier).
- Condon, P. M. 2020. *Five rules for tomorrow's cities: design in an age of urban migration, demographic change, and a disappearing middle class* (Island Press).
- DABS. 2024. 'Da Afghanistan Breshna Sherkat (DABS)', <https://main.dabs.af/Home> [Son erişim tarihi: 08.04.2024].

- Dash, R. K., Nguyen, T. N., Cengiz, K. and Sharma, A. 2023. 'Fine-tuned support vector regression model for stock predictions', *Neural Computing and Applications*, 35: 23295-309.
- Data, Our World in. 2025. 'Our World in data', <https://ourworldindata.org/grapher/modern-renewable-energy-consumption?time=earliest..2023> [Son erişim tarihi: 01.02.2025].
- Datta, U., Kalam, A. and Shi, J. 2021. 'A review of key functionalities of battery energy storage system in renewable energy integrated power systems', *Energy Storage*, 3: e224.
- Dewitte, S., Cornelis, J. P., Müller, R. and Munteanu, A. 2021. 'Artificial intelligence revolutionises weather forecast, climate monitoring and decadal prediction', *Remote Sensing*, 13: 3209.
- ESCAP, UN. 2017. 'Asia-Pacific progress in sustainable energy: a global tracking framework 2017: regional assessment report'.
- ESCAP, UN. and Asia-Pacific Economic Cooperation. 2018. 'Integrating South Asia's power grid for a sustainable and low carbon future'.
- Factbook, The World. 2025. 'The World Factbook', <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/energy-consumption-per-capita/country-comparison/> [Son erişim tarihi: 08.04.2025].
- Fahimi, A. 2024. 'International Organizations and Energy Transitions in Afghanistan', by Medien-und Informationszentrum, Leuphana Universität Lüneburg.
- Fuso Nerini, F., Tomei, J., To, L. S., Bisaga, I., Parikh, P., Black, M., Borrión, A., Spataru, C., Castán Broto, V. and Anandarajah, G. 2018. 'Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals', *Nature Energy*, 3: 10-15.
- Gajdzik, B., Wolniak, R., Nagaj, R., Grebski, W. W. and Romanyszyn, T. 2023. 'Barriers to renewable energy source (RES) installations as determinants of energy consumption in EU countries', *Energies*, 16: 7364.
- Gesim, N. A. and Okazaki, T. 2018. 'Assessment of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC model and fuzzy logic in Herat city, Afghanistan', *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9.
- Ghadami, N., Gheibi, M., Kian, Z., Faramarz, M. G., Naghedi, R., Eftekhari, M., Fathollahi-Fard, A. M., Dulebenets, M. A. and Tian, G. 2021. 'Implementation of solar energy in smart cities using an integration of artificial neural network, photovoltaic system and classical Delphi methods', *Sustainable Cities and Society*, 74: 103149.
- Ghimire, S., Nguyen-Huy, T., AL-Musaylh, M. S., Deo, R. C., Casillas-Pérez, D. and Salcedo-Sanz, S. 2023. 'A novel approach based on integration of convolutional neural networks and echo state network for daily electricity demand prediction', *Energy*, 275: 127430.
- Ghorbani, Y., Zhang, S. E., Nwaila, G. T., Bourdeau, J. E. and Rose, D. H. 2023. 'Embracing a diverse approach to a globally inclusive green energy transition: Moving beyond decarbonisation and recognising realistic carbon reduction

- strategies', *Journal of Cleaner Production*: 140414.
- Gielen, D., Gorini, R., Leme, R., Prakash, G., Wagner, N., Janeiro, L., Collins, S., Kadir, M., Asmelash, E. and Ferroukhi, R. 2021. 'World energy transitions outlook: 1.5° c pathway'.
- Gitelman, L., Kozhevnikov, M. and Visotskaya, Y. 2023. 'Diversification as a method of ensuring the sustainability of energy supply within the energy transition', *Resources*, 12: 19.
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R. and Yan, D. 2022. 'A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers', *Energy Reports*, 8: 626-37.
- Gori, M., Betti, A. and Melacci, S. 2023. Machine Learning: A constraint-based approach (Elsevier).
- Group, World Bank. 2024a. 'GLOBAL SOLAR ATLAS', <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study> [Son erişim tarihi: 15.09.2024].
- Group, World Bank. 2024b. 'GLOBAL WIND ATLAS', <https://globalwindatlas.info/en/> [Son erişim tarihi: 15.09.2024].
- Grzybowski, A., Pawlikowska-Łagód, K. and Lambert, W. C. 2024. 'A history of artificial intelligence', *Clinics in Dermatology*, 42: 221-29.
- Gugler, K., Haxhimusa, A. and Liebensteiner, M. 2021. 'Effectiveness of climate policies: Carbon pricing vs. subsidizing renewables', *Journal of Environmental Economics and Management*, 106: 102405.
- Gunnarsdóttir, I., Davidsdóttir, B., Worrell, E. and Sigurgeirsdóttir, S. 2021. 'Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2 141: 110770.
- Guo, C., Zhang, X. and Iqbal, S. 2024. 'Does oil price volatility and financial expenditures of the oil industry influence energy generation intensity? Implications for clean energy acquisition', *Journal of Cleaner Production*, 434: 139907.
- Hai, A., Bharath, G., Abdul Patah, M. F., Wan Daud, W. M. A., Show, P. L. and Banat, F. 2023. 'Machine learning models for the prediction of total yield and specific surface area of biochar derived from agricultural biomass by pyrolysis', *Environmental technology & innovation*, 30: 103071.
- Hanif, A., Khakpoor, B. A., Kharazmi, O. A. and Loodin, N. 2022. 'Identifying barriers affecting citizen participation in community-driven development projects in Afghanistan: A case study of Herat city', *International Social Science Journal*, 72: 561-76.
- Hoang, A. T. and Nguyen, X. P. 2021. 'Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process', *Journal of Cleaner Production*, 305: 127161.
- Huihui, W., Alharthi, M., Ozturk, I., Sharif, A., Hanif, I. and Dong, X. 2024. 'A strategy for the promotion of renewable energy for cleaner production in G7 economies: By means of economic and institutional progress', *Journal of Cleaner Production*,

434: 140323.

- Iceland, P., Schroeder, L., Yahya, M., Okhrin, Y. and Uddin, G. S. 2024. 'The energy transition: The behavior of renewable energy stock during the times of energy security uncertainty', *Renewable Energy*, 221: 119746.
- Jaboob, A., Durrah, O. and Chakir, A. 2024. 'Artificial intelligence: An overview', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*: 3-22.
- Joshi, G. and Yenneti, K. 2020. 'Community solar energy initiatives in India: A pathway for addressing energy poverty and sustainability?', *Energy and Buildings*, 210: 109736.
- Kalair, A., Abas, N., Saleem, M. S., Kalair, A. R. and Khan, N. 2021. 'Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables', *Energy Storage*, 3: e135.
- Karaca, A. E., Dincer, I. and Nitefor, M. 2023. 'A unique biomass based integrated energy system for cleaner production of multiple energy outputs for sustainable communities', *Sustainable Cities and Society*, 89: 104330.
- Khan, H. F., Yang, Y. C. E. and Wi, S. 2020. 'Case study on hydropolitics in Afghanistan and Pakistan: energy and water impacts of Kunar River development', *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146: 05020015.
- Kim, H. J. and Kim, M. K. 2023. 'A novel deep learning-based forecasting model optimized by heuristic algorithm for energy management of microgrid', *Applied Energy*, 332: 120525.
- Korkovelos, A., Mentis, D., Bazilian, M., Howells, M., Saraj, A., Hotaki, S. F. and Missfeldt-Ringius, F. 2020. 'Supporting electrification policy in Fragile states: a conflict-adjusted geospatial least cost approach for Afghanistan', *Sustainability*, 12: 777.
- Kumar, D. and Tewary, T. 2023. 'Investigating the sustainability of urban energy generation with techno-economic analysis from hybrid energy systems', *Energy Strategy Reviews*, 50: 101250.
- Kumar, P. 2022. 'Failure prediction using artificial intelligence for heavy duty equipment', *Materials Today: Proceedings*, 66: 3154-61.
- Kwok, K.C.S. and Hu, G. 2023. 'Wind energy system for buildings in an urban environment', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 234: 105349.
- Lamb, W.F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J.G.J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Al Khourdajie, A. and House, J. 2021. 'A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018', *Environmental research letters*, 16: 073005.
- Langsetmo, L., Schousboe, J.T., Taylor, B.C., Cauley, J.A., Fink, H.A., Cawthon, P.M., Kado, D.M., Ensrud, K.E. and Osteoporotic Fractures in Men Research Group. 2023. 'Advantages and disadvantages of random forest models for prediction of hip fracture risk versus mortality risk in the oldest old', *Journal of Bone and Mineral Research Plus*, 7: e10757.

- Leao, I., Ahmed, M. and Kar, A. 2018. Jobs from agriculture in Afghanistan (World Bank Publications).
- Lee, J.L. 2022. Afghanistan: A History from 1260 to the Present (Reaktion books).
- Lee, K., Im, S. and Lee, B. 2023. 'Prediction of renewable energy hosting capacity using multiple linear regression in KEPCO system', *Energy Reports*, 9: 343-47.
- Letcher, T.M. 2022. 'Global warming, greenhouse gases, renewable energy, and storing energy.' In: Storing Energy (Elsevier).
- Li, Q., Cui, Z., Cai, Y., Su, Y. and Wang, B. 2023. 'Renewable-based microgrids' energy management using smart deep learning techniques: Realistic digital twin case', *Solar Energy*, 250: 128-38.
- Long, L.D. 2023. 'An AI-driven model for predicting and optimizing energy-efficient building envelopes', *Alexandria Engineering Journal*, 79: 480-501.
- Lu, Y., Khan, Z.A., Alvarez-Alvarado, M.S., Zhang, Y., Huang, Z. and Imran, M. 2020. 'A critical review of sustainable energy policies for the promotion of renewable energy sources', *Sustainability*, 12: 5078.
- Mahmood, H., Alkhateeb, T.T.Y. and Furqan, M. 2020. 'Industrialization, urbanization and CO2 emissions in Saudi Arabia: Asymmetry analysis', *Energy Reports*, 6: 1553-60.
- Majid, M. A. 2020. 'Renewable energy for sustainable development in India: current status, future prospects, challenges, employment, and investment opportunities', *Energy, Sustainability and Society*, 10: 1-36.
- Malik, N. 2011. 'ENERGY RESOURCES IN AFGHANISTAN AND MEASURES TO IMPROVE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT', *Journal of sustainable energy*, 2.
- Marler, J.H. 2024. 'Artificial intelligence, algorithms, and compensation strategy: Challenges and opportunities', *Organizational Dynamics*: 101039.
- Mehrish, A., Majumder, N., Bharadwaj, R., Mihalcea, R. and Poria, S. 2023. 'A review of deep learning techniques for speech processing', *Information Fusion*, 99: 101869.
- Melnyk, L., Sommer, H., Kubatko, O., Rabe, M. and Fedyna, S. 2021. 'The economic and social drivers of renewable energy development in OECD countries', *Problems and Perspectives in Management*, 18: 37.
- Mishra, P., and Singh, G. 2023. 'Energy management systems in sustainable smart cities based on the internet of energy: A technical review', *Energies*, 16: 6903.
- Moret, S., Peduzzi, E., Gerber, L. and Maréchal, F. 2016. 'Integration of deep geothermal energy and woody biomass conversion pathways in urban systems', *Energy Conversion and Management*, 129: 305-18.
- Morteza, A., Yahyaeian, A.A., Mirzaeibonehkhater, M., Sadeghi, S., Mohaimeni, A. and Taheri, S. 2023. 'Deep learning hyperparameter optimization: Application to electricity and heat demand prediction for buildings', *Energy and Buildings*, 289: 113036.

- Mustafa, M., Ghazali, F. and Yuniza, M.E. 2022. 'Governance interventions in providing affordable, reliable, sustainable, and modern energy in the ASEAN region (Goal 7).' In: *Good Governance and the Sustainable Development Goals in Southeast Asia* (Routledge).
- Naseri, E., Altan, B.D. and Güngör, A. 2024. 'Investigating Solar Energy Potential in Afghanistan under Certain Climatic and Geometrical Parameters of Cities and Buildings', *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16: 179-94.
- Nasery, S., Matci, D.K. and Avdan, U. 2021. 'GIS-based wind farm suitability assessment using fuzzy AHP multi-criteria approach: the case of Herat, Afghanistan', *Arabian Journal of Geosciences*, 14: 1091.
- Noorzad, N. 2018. 'Renewable energy: Power generation and opportunities for a sustainable future in Afghanistan', *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Nutakki, M. and Mandava, S. 2023. 'Review on optimization techniques and role of Artificial Intelligence in home energy management systems', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 119: 105721.
- Oral, H.V., Kakar, A.E. and Saygin, H. 2021. 'Feasible industrial sustainable development strategies for the Herat Province of Afghanistan', *Technology in society*, 65: 101603.
- Palka, E.J. 2001. *Afghanistan: A Regional Geography*.
- Perera, A.T.D., Javanroodi, K., Mauree, D., Nik, V.M., Florio, P., Hong, T. and Chen, D. 2023. 'Challenges resulting from urban density and climate change for the EU energy transition', *Nature Energy*, 8: 397-412.
- Poggi, F., Firmino, A. and Amado, M. 2018. 'Planning renewable energy in rural areas: Impacts on occupation and land use', *Energy*, 155: 630-40.
- Prince, S.J.D. 2023. *Understanding deep learning* (MIT press).
- Qiao, Q., Yunusa-Kaltungo, A. and Edwards, R.E. 2021. 'Towards developing a systematic knowledge trend for building energy consumption prediction', *Journal of Building Engineering*, 35: 101967.
- Qin, M., Hu, W., Qi, X. and Chang, T. 2024. 'Do the benefits outweigh the disadvantages? Exploring the role of artificial intelligence in renewable energy', *Energy Economics*: 107403.
- Rath, K.C., Khang, A. and Roy, D. 2024. 'The Role of Internet of Things (IoT) Technology in Industry 4.0 Economy.' In: *Advanced IoT Technologies and Applications in the Industry 4.0 Digital Economy* (CRC Press).
- Rehman, A.U., Wadud, Z., Elavarasan, R.M., Hafeez, G., Khan, I., Shafiq, Z. and Alhelou, H.H. 2021. 'An optimal power usage scheduling in smart grid integrated with renewable energy sources for energy management', *IEEE Access*, 9: 84619-38.
- Rekioua, D. 2023. 'Energy storage systems for photovoltaic and wind systems: A review', *Energies*, 16: 3893.
- Ren, H., Ma, Z., Chan, A.B. and Sun, Y. 2023. 'Optimal planning of municipal-scale

- distributed rooftop photovoltaic systems with maximized solar energy generation under constraints in high-density cities', *Energy*, 263: 125686.
- Review, World Population. 2025. 'World Population Review', <https://worldpopulationreview.com/cities/afghanistan/herat> [Son erişim tarihi: 07.04.2025].
- Ribeiro, R. and Fanzeres, B. 2024. 'Identifying representative days of solar irradiance and wind speed in Brazil using machine learning techniques', *Energy and AI*, 15: 100320.
- Rojek, I., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Piechowski, M. and Mikołajewski, D. 2023. 'An artificial intelligence approach for improving maintenance to supervise machine failures and support their repair', *Applied Sciences*, 13: 4971.
- Rostami, R., Khoshnava, S.M., Lamit, H., Streimikiene, D. and Mardani, A. 2017. 'An overview of Afghanistan's trends toward renewable and sustainable energies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 1440-64.
- Runge, J. and Saloux, E. 2023. 'A comparison of prediction and forecasting artificial intelligence models to estimate the future energy demand in a district heating system', *Energy*, 269: 126661.
- Safi, L., Mujeeb, M., Sahak, K., Mushwani, H. and Hashmi, S.K. 2024. 'Climate change impacts and threats on basic livelihood resources, food security and social stability in Afghanistan', *GeoJournal*, 89: 85.
- Saleem, M.U., Shakir, M., Usman, M.R., Bajwa, M.H.T., Shabbir, N., Ghahfarokhi, P.S. and Daniel, K. 2023. 'Integrating smart energy management system with internet of things and cloud computing for efficient demand side management in smart grids', *Energies*, 16: 4835.
- Sankarananth, S., Karthiga, M., Suganya, E., Sountharajan, S. and Bavirisetti, D.P. 2023. 'AI-enabled metaheuristic optimization for predictive management of renewable energy production in smart grids', *Energy Reports*, 10: 1299-312.
- Sapnken, F.E., Hamed, M.M., Soldo, B. and Tamba, J.G. 2023. 'Modeling energy-efficient building loads using machine-learning algorithms for the design phase', *Energy and Buildings*, 283: 112807.
- Schappert, M. and von Hauff, M. 2020. 'Sustainable consumption in the smart grid: From key points to eco-routine', *Journal of Cleaner Production*, 267: 121585.
- Segreto, M., Principe, L., Desormeaux, A., Torre, M., Tomassetti, L., Tratzi, P., Paolini, V. and Petracchini, F. 2020. 'Trends in social acceptance of renewable energy across Europe—a literature review', *International journal of environmental research and public health*, 17: 9161.
- Shah, I.A. 2017. 'Area Study Centre (Russia, China & Central Asia) University Of Peshawar, Pakistan June 2017'.
- Sharma, G.D., Tiwari, A.K., Erkut, B. and Mundi, H.S. 2021. 'Exploring the nexus between non-renewable and renewable energy consumptions and economic development: Evidence from panel estimations', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146: 111152.

- Shen, N., Wang, Y., Peng, H. and Hou, Z. 2020. 'Renewable energy green innovation, fossil energy consumption, and air pollution—spatial empirical analysis based on China', *Sustainability*, 12: 6397.
- Shi, B. and Wang, H. 2023. 'Policy effectiveness and environmental policy Assessment: A model of the environmental benefits of renewable energy for sustainable development', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57: 103153.
- Shi, Z., Yao, W., Li, Z., Zeng, L., Zhao, Y., Zhang, R., Tang, Y. and Wen, J. 2020. 'Artificial intelligence techniques for stability analysis and control in smart grids: Methodologies, applications, challenges and future directions', *Applied Energy*, 278: 115733.
- Shiri, F.M., Perumal, T., Mustapha, N. and Mohamed, R. 2023. 'A comprehensive overview and comparative analysis on deep learning models: CNN, RNN, LSTM, GRU', *arXiv:2305.17473*.
- Sinsel, S.R., Riemke, R.L. and Hoffmann, V.H. 2020. 'Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review', *Renewable Energy*, 145: 2271-85.
- Sirotkin, I. 'Electrical Supply A Critical Need For Afghanistan's Development', *Managing Afghanistan's Mineral Wealth*: 35.
- Son, T.H., Weedon, Z., Yigitcanlar, T., Sanchez, T., Corchado, J.M. and Mehmood, R. 2023. 'Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature', *Sustainable Cities and Society*: 104562.
- Srivastava, R.K., Shetti, N.P., Reddy, K.R. and Aminabhavi, T.M. 2020. 'Sustainable energy from waste organic matters via efficient microbial processes', *science of the total environment*, 722: 137927.
- Statista, OPEC. "Primary Energy Demand Worldwide in 2020, with a Forecast until 2045, by Fuel Type."
- Surianarayanan, C., Lawrence, J.J., Chelliah, P.R., Prakash, E. and Hewage, C. 2023. 'A survey on optimization techniques for edge artificial intelligence (ai)', *Sensors*, 23: 1279.
- Talaat, M., Elkholy, M.H., Alblawi, A. and Said, T. 2023. 'Artificial intelligence applications for microgrids integration and management of hybrid renewable energy sources', *Artificial Intelligence Review*, 56: 10557-611.
- Tasneem, Z., Noman, A.A., Das, S.K., Saha, D.K., Islam, M.R., Ali, M.F., Badal, M.F.R., Ahamed, M.H., Moyeen, S.I. and Alam, F. 2020. 'An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges', *Developments in the Built Environment*, 4: 100033.
- Todeschini, G., Coles, D., Lewis, M., Popov, I., Angeloudis, A., Fairley, I., Johnson, F., Williams, A.J., Robins, P. and Masters, I. 2022. 'Medium-term variability of the UK's combined tidal energy resource for a net-zero carbon grid', *Energy*, 238: 121990.
- Tomazzoli, C., Scannapieco, S. and Cristani, M. 2023. 'Internet of things and artificial intelligence enable energy efficiency', *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14: 4933-54.

- Tran, H.M., Tsai, F.J., Lee, Y.L., Chang, J.H., Chang, L.T., Chang, T.Y., Chung, K.F., Kuo, H.P., Lee, K.Y. and Chuang, K.J. 2023. 'The impact of air pollution on respiratory diseases in an era of climate change: A review of the current evidence', *Science of the Total Environment*: 166340.
- Tyagi, A., Kumar, M., Bhan, S.C., Magotra, R. and Sharma, Y. 2021. 'Review of urban heat Islands: monitoring, forecast and impacts', *VayuMandal*, 47: 1-29.
- Van de Meene, S., Bettini, Y. and Head, B.W. 2020. 'Transitioning toward sustainable cities—Challenges of collaboration and integration', *Sustainability*, 12: 4509.
- Veniaminovich, L.E. 2023. 'The revolution in artificial intelligence systems of the 20s of the XXI century and systems with the Soul-computer interface as the next nearest stage in the development of intelligent technologies', *Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*: 93-128.
- Visual Crossing. 2024. 'Visual Crossing – Weather Data & API', <https://www.visualcrossing.com> [Son erişim tarihi: 08.06.2024].
- Vollset, S.E., Goren, E., Yuan, C.W., Cao, J., Smith, A.E., Hsiao, T., Bisignano, C., Azhar, G.S., Castro, E. and Chalek, J. 2020. 'Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study', *The Lancet*, 396: 1285-306.
- Von Eschenbach, W.J. 2021. 'Transparency and the black box problem: Why we do not trust AI', *Philosophy & Technology*, 34: 1607-22.
- Wani, N.U.H., Khan, F.N. and Naderi, F. 2024. 'Electricity consumption and economic growth nexus in Afghanistan: impact, causality, projections, and policy implications', *SN Business & Economics*, 4: 113.
- Wazirali, R., Yaghoubi, E., Abujazar, M.S.S., Ahmad, R. and Vakili, A.H. 2023. 'State-of-the-art review on energy and load forecasting in microgrids using artificial neural networks, machine learning, and deep learning techniques', *Electric power systems research*, 225: 109792.
- Wu, L. and Chen, C. 2023. 'Does pattern matter? Exploring the pathways and effects of urban green space on promoting life satisfaction through reducing air pollution', *Urban Forestry & Urban Greening*, 1 82: 127890.
- Yaïci, W., Krishnamurthy, K., Entchev, E. and Longo, M. 2021. 'Recent advances in Internet of Things (IoT) infrastructures for building energy systems: A review', *Sensors*, 21: 2152.
- Yao, Z., Lum, Y., Johnston, A., Mejia-Mendoza, L.M., Zhou, X., Wen, Y., Aspuru-Guzik, A., Sargent, E.H. and Seh, Z.W. 2023. 'Machine learning for a sustainable energy future', *Nature Reviews Materials*, 8: 202-15.
- Zebra, E.I.C., van der Windt, H.J., Nhumaio, G. and Faaij, A.P.C. 2021. 'A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144: 111036.
- Zhang, A., Lipton, Z.C., Li, M. and Smola, A.J. 2023. Dive into deep learning (Cambridge University Press).

- Zhang, M., Zhang, D. and Xie, T. 2024. 'Balancing urban energy considering economic growth and environmental sustainability through integration of renewable energy', *Sustainable Cities and Society*, 101: 105178.
- Zheng, J., Du, J., Wang, B., Klemesš, J.J., Liao, Q. and Liang, Y. 2023. 'A hybrid framework for forecasting power generation of multiple renewable energy sources', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172: 113046.
- Zhou, Z., Qiu, C. and Zhang, Y. 2023. 'A comparative analysis of linear regression, neural networks and random forest regression for predicting air ozone employing soft sensor models', *Scientific reports*, 13: 22420.



ÖZGEÇMİŞ

Edris NASERI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2019-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	University of Hartford
2008-2011	Mühendislik Fakültesi, Mekanik Anabilim Dalı, CT, ABD
Lisans	Herat University
2002-2006	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Anabilim Dalı, Herat, Afganistan

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Teaching Assistant	Herat University
2011-2021	Mühendislik Fakültesi, Mekatronik & İnşaat Anabilim Dalı, Herat, Afganistan
Tasarım Mühendisi	Afghanistan Rehabilitation & Architecture Organized Co.
2011-2017	İnşaat firması, Yapısal ve Mekanik Bölümü, Afganistan

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Naseri E., Altan B.D., and Güngör A. (2024). 'Investigating Solar Energy Potential in Afghanistan under Certain Climatic and Geometrical Parameters of Cities and Buildings', *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16: 179-94. <https://doi.org/10.24107/ijeas.1564584>