



FOTOVOLTAİK GÜÇ TAHMİNİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

DOKTORA TEZİ

Kübra KAYSAL

Danışman

Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2025

Bu tez çalışması 123E624 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

FOTOVOLTAİK GÜÇ TAHMİNİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

Kübra KAYSAL

Danışman

Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Kübra KAYSAL tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Güç Tahmininde Yeni Yaklaşımlar” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 23/ 10/ 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

Başkan : Prof. Dr. Ömer Nezih GEREK
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Belgin Emre TÜRKAY
İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU
Afyon Kocatepe Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Emre AKARSLAN
Afyon Kocatepe Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih SERTTAŞ
Afyon Kocatepe Üniveristesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

23 / 10 / 2025

Kübra KAYSAL

ÖZET

Doktora Tezi

FOTOVOLTAİK GÜÇ TAHMİNİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

Kübra KAYSAL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

Gelişen teknoloji, artan nüfus ve büyüyen sanayi ile birlikte dünya genelinde elektrik enerjisine olan talep hızla artmaktadır. Fosil yakıtların tükeniyor olması ve çevreye olan olumsuz etkileri enerji talebi karşısında insanoğlunu yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi temiz, kaynağı bedava ve ulaşılabilir olması ile günümüzde popüler enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Tüm bu olumlu özelliklerine karşın, yapısı gereği stokastik olan güneş enerjisi, şebeke yönetiminde belirsizlik, ani dalgalanmalar ve kararlılık sorunlarına neden olmaktadır. Dolayısı ile güneş enerjisinin yaygınlaşması ile bu enerjisinin kontrolü için gelişmiş tahmin modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, güneş enerjisi verilerinin tahmin doğruluğunu artırmak için bu enerjinin hem deterministik hem de stokastik özelliklerini ele alan yenilikçi bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Çalışmada öncelikle Mycielski modelinin ardışık sıfır değerlerinde yaşadığı problem üzerinde durulmuş ve bu problemi aşmak için üç aşamalı bir yöntem geliştirilmiştir. Güneş ışınlamı şiddeti, güneş geometrisi gibi deterministik faktörlerin yanı sıra rastgele atmosferik olaylardan kaynaklanan stokastik faktörlerden etkilenen bileşenler sergiler. Çalışmada deterministik bileşeni ele almak için, bölgeye özgü dünya dışı güneş radyasyonu verileri kullanılmıştır. Böylece gece saatleri, gün doğumu ve gün batımı saatlerindeki ani değişimler, geliştirilen model ile daha doğru tahmin sonuçları sergilemiştir. Stokastik bileşenler için, benzer desen tabanlı Mycielski modeli iyileştirilerek kullanılmış ve bu modelin ardışık sıfır veri dizilerinde yaşadığı duyarlılık problemi çözülmüştür.

Tezin ikinci aşamasında ise iyileştirilmiş Mycielski modeli kullanılarak yenilikçi çok boyutlu Mycielski tabanlı yöntem, fotovoltaik panellerinin çıkış gücünü daha doğru bir şekilde tahmin etmek için geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, Mycielski algoritmasının çok boyutlu tarihsel zaman serisi verilerindeki benzer örüntüleri belirleme yeteneğinden yararlanarak, gelişmiş tahmin için geçmişteki en benzer dizileri kullanmıştır. Ayrıca, yöntem yapay zekâ tabanlı tahmin modelleriyle hibritleşerek, deterministik-stokastik çerçeve derin öğrenme mimarileri gibi gelişmiş modellere entegre edilmiştir. Bu çok boyutlu yapıda hem elektriksel büyüklükler hem de meteorolojik veriler Afyon Kocatepe Üniversitesi'nde kurulan bir deneysel sistem aracılığıyla toplanmıştır.

Deneysel sonuçlar, tez kapsamında geliştirilen üç aşamalı Mycielski tabanlı yaklaşımın, literatürdeki geleneksel modellere kıyasla üstün tahmin performansı sağladığını ve ardışık sıfır veri yapısına takılmadığını göstermiştir. Ayrıca çok boyutlu zaman serileri için geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski yönteminin yapay zekâ tabanlı algoritmalarla hibrit entegrasyonu, fotovoltaik çıkış gücünün tahminini başarıyla artırarak güneş enerjisi sistemlerinin yönetimi ve optimizasyonu için güvenilir ve doğru bir araç sağlamıştır.

2025, xii + 84 sayfa

Anahtar Kelimeler: Üç aşamalı tahmin, Geliştirilmiş Mycielski, Çok boyutlu Mycielski model, Fotovoltaik güç çıkışı, Güneş ışıınım şiddeti.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

NEW APPROACHES TO PHOTOVOLTAIC POWER ESTIMATION

Kübra KAYSAL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Fatih Onur HOCAOĞLU

With developing technology, a growing population, and growing industries, the demand for electrical energy is rapidly increasing worldwide. The depletion of fossil fuels and their negative impact on the environment have led humanity to turn to renewable energy sources to address the demand for energy. Among renewable energy sources, solar energy is clean, free, and accessible, making it a popular energy source today. Despite all these positive features, solar energy, by its inherent stochastic nature, causes uncertainty, sudden fluctuations, and stability issues in grid management. Therefore, the widespread use of solar energy necessitates the need for advanced forecasting models to manage this energy.

In this thesis, an innovative prediction model that addresses both deterministic and stochastic properties of solar energy data was developed to improve the accuracy of solar irradiance and photovoltaic output power estimations. The study primarily addresses the problem experienced by the Mycielski model with consecutive zero values, and an innovative three-stage method was developed to overcome this problem. Solar irradiance exhibits components influenced by stochastic factors originating from random atmospheric events, as well as deterministic factors such as solar geometry. To address the deterministic component, we used region-specific extraterrestrial solar radiation data. Thus, the developed model provides more accurate predictions of sudden changes in nighttime, sunrise, and sunset times. For the stochastic component, we improved the similar pattern-based Mycielski model to capture random fluctuations, and we also solved the consecutive zero data problem experienced by the Mycielski model.

In the second phase of the thesis, an innovative multidimensional Mycielski-based method was developed using the improved Mycielski model to more accurately predict the output power of photovoltaic panels. This approach leverages the Mycielski algorithm's ability to identify similar patterns in multidimensional historical time series data, utilizing the most similar historical sequences for improved prediction. Furthermore, the method was hybridized with AI-based forecasting models and integrated into advanced models such as deterministic-stochastic deep learning architectures. In this multidimensional framework, both electrical quantities and meteorological data were collected through an experimental system established at Afyon Kocatepe University.

Experimental results demonstrate that the three-segment Mycielski-based approach developed within the scope of this thesis provides superior forecasting performance compared to traditional models in the literature and avoids the problem of consecutive zero data structures. Furthermore, the hybrid integration of the Multidimensional Mycielski method developed for multidimensional time series with AI-based algorithms successfully improves the prediction of photovoltaic output power, providing a reliable and accurate tool for managing and optimizing solar energy systems.

2025, xii + 84 pages

Keywords: Three-segment forecasting, Improved Mycielski, Multidimensional Mycielski model, Photovoltaic power output, Solar radiation.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların planlanması, yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve tez yazım sürecinin her aşamasında göstermiş olduğu özverili katkılarından dolayı değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU'na en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alan, tez çalışmam boyunca gerçekleştirdiğim sunumlar sırasında bana yapıcı ve yol gösterici geri bildirimlerde bulunan, kıymetli görüş ve deneyimleriyle araştırmamın gelişmesine önemli katkılar sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Ömer Nezih GEREK ve Doç. Dr. Emre AKARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123E624 numaralı projeyle desteklenmiştir. Projeye verdiği destek için TÜBİTAK'a ve çalışmanın belirli bir kısmında kullanılan verileri sağladıkları için Afyonkarahisar Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Tez çalışmamın her aşamasında ve akademik hayatımda bugün bulunduğum noktaya ulaşmamda en büyük desteği sağlayan, sevgisi ve sabrıyla bana güç veren, sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KAYSAL'a ve hayatıma neşe, umut ve ilham katan başta biricik kızım Melike KAYSAL'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca sevgisiyle bana cesaret aşılayan, varlığıyla yolumu aydınlatan, yokluğuyla ise azmimi ve kararlılığımı perçinleyen canım annem, güçlü kadın merhume Naile YILDIRIMKAYA'ya...

Tezimi derin sevgi, minnet ve özlemle kendisine armağan ediyorum.

Kübra KAYSAL
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ.....	i
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR BİLGİLERİ	7
2.1 Mycielski Algoritması ile Gerçekleştirilen Çalışmalar	7
2.2 Yapay Zekâ Modelleri ile Gerçekleştirilen Çalışmalar	9
3 MATERYAL ve METOT	15
3.1 Fotovoltaik Sistemler ve Veri Toplama	15
3.2 Veri Seti.....	23
3.2.1 Üç Aşamalı Tahmin Modeli için Kullanılan Veri Seti.....	24
3.2.2 GURAM'dan Elde Edilen Veri Seti.....	27
3.3 Veri Ön İşleme	31
3.4 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Üç Aşamalı Tahmin Modeli	33
3.4.1 Birinci Bölüm için Tahmin Stratejisi	35
3.4.2 İkinci Bölüm için Tahmin Stratejisi	38
3.4.3 Üçüncü Bölüm için Tahmin Stratejisi.....	40
3.5 Yapay Zekâ Tahmin Algoritmaları	45
3.5.1 Uzun-Kısa Vadeli Bellek Ağı Modeli (LSTM).....	47
3.5.2 Kapılı Tekrarlayan Birim Modeli (GRU).....	49
3.6 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski Algoritması	51
3.6.1 Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM-GRU Hibrit Modeli.....	53
3.7 Performans Değerlendirme Kriterleri.....	57
4 BULGULAR.....	58
4.1 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Üç Aşamalı Tahmin Modeli Sonuçları	58
4.2 Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/LSTM-GRU Hibrit Modellerinden Elde	

Edilen Sonuçlar.....	63
5 TARTIşMA ve SONUÇ	70
6 KAYNAKLAR	73



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Amper
°C	Santigrad derece
dk	Dakika
GW	Gigawatt
hPa	Hektopaskal
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
MW	Megawatt
m ²	Metrekare
sn	Saniye
W	Watt
V	Volt

Kısaltmalar

3B	Üç boyutlu
2B	İki boyutlu
AC	Alternatif akım
ARIMA	Otoregresif entegre hareketli ortalama
ARMA	Otoregresif hareketli ortalama
BiLSTM	Çift yönlü uzun kısa süreli bellek
BPNN	Geri yayılım sinir ağı
CIGS	Bakır indiyum galyum selenit
CNN	Evrişimsel sinir ağları
DC	Doğru akım
DT	Karar ağaçları
EİGM	Enerji işleri genel müdürlüğü
ETKB	Enerji ve tabii kaynaklar bakanlığı
ETR	Dünya dışı ışıyım radyasyonu
FFNN	İleri beslemeli sinir ağları
GRU	Kapalı tekrarlayan ünite
GURAM	Güneş ve rüzgâr enerjisi araştırma ve uygulama merkezi
IEA	Uluslararası enerji ajansı
K-means	K-ortalama kümeleme
KNN	K-en yakın komşu
LGBM	Hafif gradyan artırma makineleri
LSTM	Uzun kısa süreli bellek ağı
MAE	Ortalama mutlak hata
MLP	Çok katmanlı algılayıcı
MLR	Çoklu doğrusal regresyon
MPPT	Maksimum güç noktası takibi
PR	Tahmin değişkeni
PV	Fotovoltaik
PVSol	Fotovoltaik sistem simülasyonu
RF	Rasgele orman

RMSE	Kök ortalama kare hata
RNN	Tekrarlayan sinir ağıları
SARIMA	Mevsimsel otoregresif entegre hareketli ortalama
SE-ET	Yığılmalı extra ağaçlar
SR	Güneş ışınlm şiddeti
Stacked LSTM	Yığılmış uzun kısa süreli bellek ağı
SVM	Destek vektör makinesi
TÜBİTAK	Türkiye bilimsel ve teknolojik araştırma kurumu
YSA	Yapay sinir ağıları



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Fotovoltaik güç tahmin yaklaşımlarının ve yöntemlerinin sınıflandırılması	4
Şekil 3.1 Fotovoltaik hücre, modül, panel ve panel dizini	16
Şekil 3.2 PVSol ile kurulum yapılacak konumun azimuth açısının belirlenmesi	18
Şekil 3.3 Verilerin grafiksel gösterimi (a), Verilere ait nümerik görüntüler (b)	20
Şekil 3.4 Sensör modülüne ait devre tasarımları (a) Güç katı, (b) Akım modülü, (c) Gerilim modülü	21
Şekil 3.5 Baskılı devre tasarımı görüntüsü.....	22
Şekil 3.6 Sensör kartının (a) 3B üstten görünüşü (b) 3B alttan görünüşü (c) Devre tasarımı üstten görünüşü (d) Devre tasarımı alttan görünüşü.....	22
Şekil 3.7 Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü Afyonkarahisar Bölge İstasyonu'ndan temin edilmiş güneş ışıyım şiddeti ve hesaplanan dünya dışı ışıyım şiddeti verisi grafiksel gösterimi	26
Şekil 3.8 Afyonkarahisar Türkiye haritası konumu ve güneş ışıyım haritası	28
Şekil 3.9 Tez çalışması kapsamında Afyonkarahisar ili GURAM'da kurulan veri toplama sistemi.....	28
Şekil 3.10 Tez çalışması kapsamında toplanan gerçek zamanlı verilere ait grafikler....	30
Şekil 3.11 Afyonkarahisar ili için kullanılan verilerin korelasyon matrisi	32
Şekil 3.12 Tez çalışmasında kullanılan verilere ait histogram grafikleri	34
Şekil 3.13 Üç aşamalı tahmin modeli için genel konfigürasyon	36
Şekil 3.14(a) Bir günlük ETR ve SR verileri, (b) SR ve PR'nin, ETR'ye göre tahmin sonucu.....	37
Şekil 3.15(a) Bir günlük ETR ve SR verisi günün geçiş anı, (b) SR ve PR'nin, ETR'ye göre tahmin sonucu	39
Şekil 3.16 İkinci Alt Tahmin Stratejisi Algoritması	40
Şekil 3.17 Mycielski algoritmasının genel ifadesi	41
Şekil 3.18 Mycielski süreç akış şeması	43
Şekil 3.19 Mycielski modeli gerçek güneş ışıyım şiddeti verilerine uygulandığında arama dizisi, bulunan dizi ve tahmin edilen değer	43
Şekil 3.20 Dört uzunluğundaki benzer dizinin indeksleri ve bu dizilerden türetilen tahmini değerler.....	44

Şekil 3.21 Aynı uzunlukta birden fazla benzer dizi olduğunda tahmin ne olmalıdır? ...	44
Şekil 3.22 Üçüncü Alt Tahmin Stratejisi Algoritması	46
Şekil 3.23 Temel RNN mimari yapısı	47
Şekil 3.24 LSTM mimari yapısı	49
Şekil 3.25 GRU mimari yapısı	50
Şekil 3.26 Çok boyutlu Mycielski algoritması süreç akış şeması	53
Şekil 3.27 Çok boyutlu Mycielski algoritması örnek bir yapı	54
Şekil 3.28 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM-GRU Hibrit Modelinin genel konfigürasyonu	55
Şekil 3.29 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM-GRU Hibrit Modelinin akış şeması	56
Şekil 4.1 Afyonkarahisar ili için ölçülen güneş ışınlam verileri ile Mycielski model (a), Mycielski-Birinci Alt Tahmin modeli (b) ve Önerilen Üç Aşamalı Tahmin modeli (c) tahmin performansına ait sonuç grafikleri	61
Şekil 4.2 Afyonkarahisar ili için Mycielski model (a), Mycielski-Birinci Alt Tahmin modeli (b) ve Önerilen Üç Aşamalı Tahmin modeli (c) hata ve korelasyon grafikleri	62
Şekil 4.3 Güç-Işınım verileri için M/Mycielski-LSTM (a), M/Mycielski-GRU (b), M/Mycielski (c) modellerinin tahmin performansına ait sonuç grafikleri	65
Şekil 4.4 Güç-Sıcaklık verileri için M/Mycielski-LSTM(a), M/Mycielski-GRU(b), M/Mycielski (c) modellerinin tahmin performansına ait sonuç grafikleri	66
Şekil 4.5 Güç-Işınım verileri için M/Mycielski-LSTM (a), M/Mycielski-GRU (b), M/Mycielski (c) modellerinin hata ve korelasyon grafikleri.....	67
Şekil 4.6 Güç-Sıcaklık verileri için M/Mycielski-LSTM (a), M/Mycielski-GRU (b), M/Mycielski (c) modellerinin hata ve korelasyon grafikleri.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Verilere ait istatistiksel değerler.....	27
Çizelge 3.2 Tez çalışması kapsamında geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/LSTM-GRU hibrit modelde LSTM-GRU modellerinin yapısal özellikleri.	56
Çizelge 3.3 Tez çalışmasında kullanılan performans değerlendirme kriterleri.....	57
Çizelge 4.1 Modellerden elde edilen sonuçlar	59
Çizelge 4.2 Afyon ili için önerilen modelin ve diğer mevcut modellerin performanslarının karşılaştırılması.....	60
Çizelge 4.3 Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM/GRU modellerinden elde edilen tahmin sonuçları	65
Çizelge 4.4 M/Mycielski-LSTM modelini literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılması	69

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Kurulumu ait fotovoltaik panellerin görüntüsü.....	18
Resim 3.2 Proje kapsamında kullanılan piranometre.....	19
Resim 3.3 Davis Instrument marka hava istasyonu görüntüsü	19
Resim 3.4 Deneysel çalışmaya ait tasarım.....	23



1 GİRİŞ

Küresel boyutta artan nüfus ve enerji talebi, teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi, fosil yakıtların tükenmek üzere olması ve bu yakıtlardan kaynaklı çevresel problemler ve iklim değişikliği gibi faktörler, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır (Goliatt vd. 2023). Fosil yakıtlara aşırı bağımlılık ve bunun sonucunda artan karbon emisyonları, küresel ısınma ve çevre kirliliği son yıllarda çeşitli çalışmaların odak noktası olmuştur. Bu doğrultuda, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla çok sayıda alternatif enerji çözümleri geliştirilmiştir. Bu çözümler arasında güneş enerjisi, fosil yakıtların yerine kullanılabilir, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynağı olarak önemli bir rol oynamaktadır (Teyabeen vd. 2024, Wang vd. 2024).

Günlük yaşantımızda su ısıtmaktan elektrik üretmeye kadar farklı şekillerde güneş enerjisi kullanılmaktadır. Bu enerji, şebekeye olumlu katkısı, ekonomiyi destekleme potansiyeli ve karbon emisyonlarını azaltma özelliği açısından önemli bir rol oynamaktadır (Husain vd. 2018). Güneş enerjisi, birçok ülkede yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Dünya genelinde ise kapasitesi sürekli artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), “2050’ye kadar Net Sıfır: Küresel Enerji Sektörü İçin Bir Yol Haritası” raporunda, küresel elektrik üretiminin yaklaşık üçte ikisinin 2050 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacağını öngörüyor. Ayrıca, bu artışın önemli miktarda güneş enerjisi ile sağlanacağını belirtmektedir (IEA 2025). Güneş enerjisinin sürdürülebilir ve temiz enerji dönüşümündeki rolü, fotovoltaik (PV) sistemlerin hızla gelişmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu enerjinin yaygın olarak kullanılmasını teşvik etmektedir.

Türkiye, enerji ihtiyacının büyük bir kısmını fosil yakıtlı kaynaklardan karşılamaktadır. Bu durum sürdürülebilir bir çevre açısından önemli tehditler içermektedir. Türkiye coğrafi konumu açısından, güneş enerjisinin yüksek potansiyeline sahiptir. Ülkemizin stratejik hedefleri arasında, güneş enerjisinin etkili kullanımı ve sürdürülebilir bir enerji geleceği planı yer almaktadır. Bu amaçla, Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre, 2025 yılında Türkiye'nin toplam kurulu gücü yaklaşık 117 Megawatt'a ulaşması hedeflenmektedir. Ayrıca bu gücün %17,8'inin güneş enerjisi olması beklenmektedir (ETKB 2025). Türkiye Ulusal Enerji Planı kapsamında 2035

yılına kadar güneş enerjisinde kurulu gücün 52,9 GW düzeyine yükseltilmesi planlanmıştır (EİGM 2025).

Stokastik bir yapısı olan güneş enerjisi, şebeke yönetimi açısından büyük zorluklar doğurmaktadır. Güneş ışınlamındaki dalgalanmalar ve mevsimsel değişiklikler nedeniyle PV sistemlerinden elde edilen güç, büyük farklılıklar göstermektedir. Bu değişimler, şebeke frekansında dalgalanmalara, gerilim değişimlerine ve aşırı durumlarda elektrik kesintilerine neden olmaktadır. Sonuç olarak enerji kalitesi düşmekte ve güvenilirlik azalmaktadır (Lai vd. 2024). Değişken çıkış gücü, enerjinin sürekliliğini sağlamak amacıyla büyük ölçekli enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacı artırarak maliyetleri yükseltmektedir. Bir güneş enerjisi sisteminin etkili bir şekilde tasarlanıp uygulanabilmesi, meteorolojik ve çevresel faktörlerin iyi bir analizini gerektirir. Bu bağlamda, güneş enerjisinin verimli kullanılması ve şebeke entegrasyonunun etkili bir şekilde yönetilmesi için doğru ve güvenilir PV güç tahminlerinin yapılması önemlidir (Xiao vd. 2023).

Güneş enerjisi ile ilgili tahminler, zamana ve giriş veri tipine göre iki ana başlıkta incelenmektedir. Zamana göre tahmin modelleri çok kısa, kısa, orta ve uzun vadeli olarak sınıflandırılabilir. PV sistemlerde kritik karar sistemlerinde çok kısa vadeli tahmin modelleri dikkat çekmektedir (Gün 2023). Planlama ve bakım gibi alanlarda kısa vadeli, saatlik ve günlük tahminler kullanılmaktadır. Stratejik yönetim gibi alanlardaki tahminlerde aylık orta vadeli tahminler yapılmaktadır. Enerji politikaları, yatırımlar ve altyapı planlamaları için yıllık uzun vadeli tahmin modelleri geliştirilmektedir. Giriş veri tipine göre tahmin modelleri ise meteorolojik veri, tarihsel veri, gökyüzü görüntüleri gibi sınıflara ayrılmaktadır.

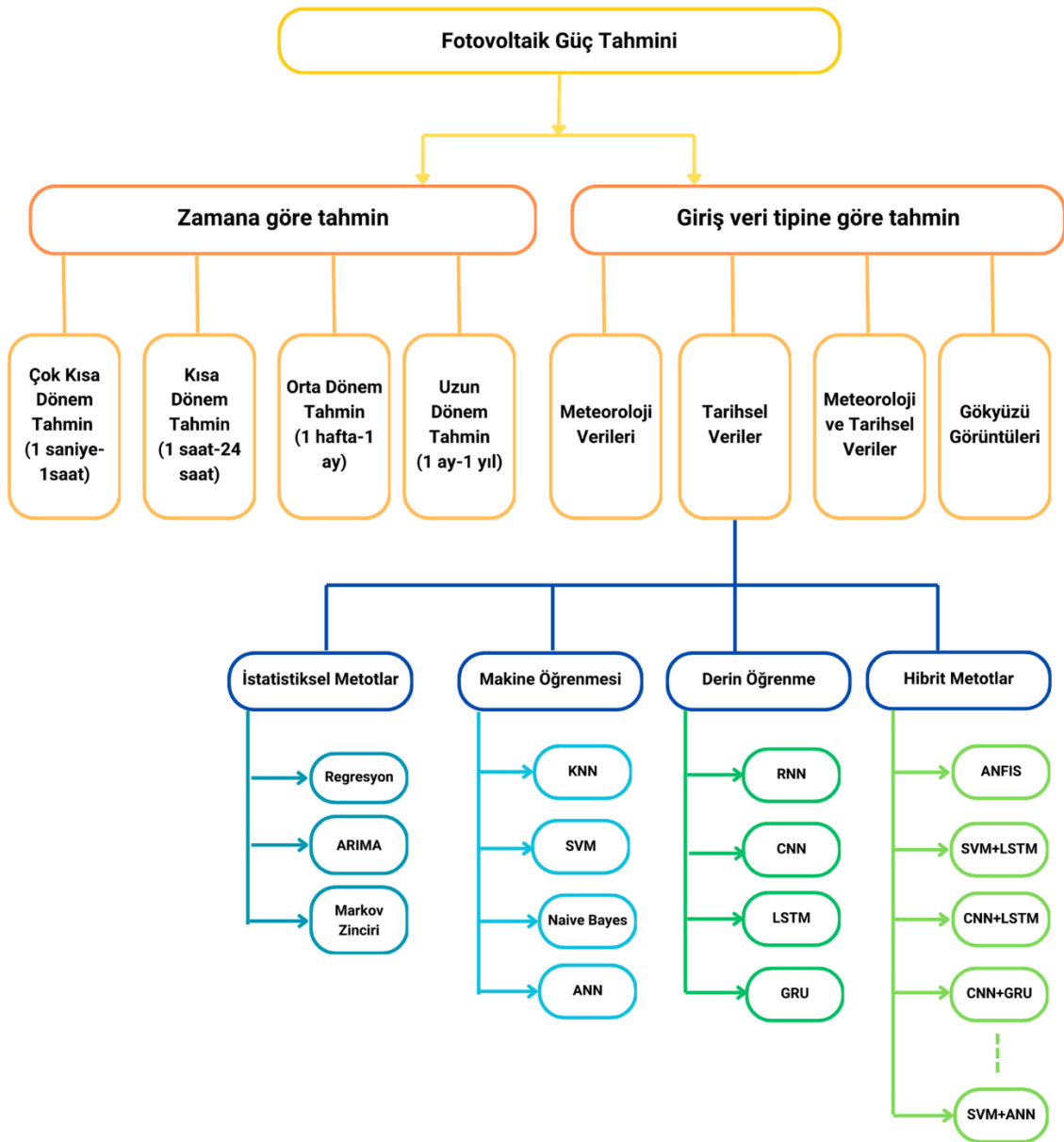
Beklenen PV çıkış gücünü makul bir doğrulukla tahmin edebilen ilk modeller arasında ampirik modeller yer almaktadır. Bu modellerin basit yapılarına rağmen temel sorunu, güneş ışınlamı ve PV güç gibi verilerin doğrusal olduğu varsayımına dayanmalarıdır. (Mirzabe vd. 2022). Ancak güneş enerjisi verileri stokastik bir yapıya sahiptir. Bu yapısı modellerin tahmin başarısını etkilemektedir. Son yıllarda, güneş enerjisi alanında geliştirilen tahmin modelleri büyük ilgi görmektedir. Bu modeller arasında istatistiksel

yöntemler, makine öğrenmesi (Zhou vd. 2021), derin öğrenme ve hibrit yöntemler öne çıkmaktadır (Kumari vd. 2021, Yahiaoui ve Assas 2024). Regresyon modelleri (Kaysal vd. 2013, Antonopoulos vd. 2019), K-Nearest Neighbors (Gürel vd. 2023), Bayesyen yöntemler (Zhang vd. 2021), Destek Vektör Regresyonu (Bhola ve Bhardwaj 2019), Ototregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA) ve Mevsimsel otoregresif entegre hareketli ortalama (SARIMA) (Shadab vd. 2020) gibi çeşitli istatistiksel yöntemlerde mevcuttur. Bu yöntemler basit yapıları ve kolay yorumlanabilir olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemlerin çoğu doğrusal varsayımlara dayanır. Bu nedenle karmaşık veya stokastik özelliklere sahip verilerin modellenmesinde yeterli olmayabilir.

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri, doğrusal olmayan yapıları öğrenme yetenekleri sayesinde daha başarılı tahminler sunmaktadır. Fakat bu modellerin yüksek hesaplama maliyeti ve büyük veri ihtiyacı, önemli sınırlarıdır (Bamisile vd. 2022, Ağbulut vd. 2021). Hibrit yöntemler ise, farklı tekniklerin güçlü yanlarını birleştirmektedir. Böylece model performansını artırmayı hedeflemektedir. Literatürde, derin öğrenme ile makine öğrenmesi, derin öğrenme ile istatistiksel modeller, makine öğrenmesi ile evrimsel algoritmalar veya bulanık mantık ile sinir ağlarının entegrasyonu gibi çeşitli hibrit modeller yaygın olarak kullanılmaktadır (Bashir vd. 2022, Kaysal vd. 2023, Lee ve Cho 2022). Tahmin modellerine ait sınıflandırma grafiği Şekil 1.1'deki gibi gösterilmiştir.

PV sistemlerin başarısı ve verimliliği çeşitli büyüklüklerden etkilenmektedir. Bu büyüklükler elektriksel olarak akım ve voltajdır. Elektriksel büyüklüklerin yanı sıra güneş ışıınım şiddeti, sıcaklık, nem ve rüzgâr hızı gibi çeşitli çevresel koşullar da PV çıkış gücünü etkilemektedir. Dolayısıyla PV sistemlerinin kurulduğu bölgesel çevre koşulları, sistemlerin işletimini doğrudan etkilemektedir. Bu doktora tez çalışmasında, ilk aşama olarak Afyonkarahisar bölgesinde gerçek zamanlı veri toplama sistemi kurulması hedeflenmiştir. Böylece, gelecekteki PV sistemler için referans teşkil edecek ve yeni tahmin modellerinin geliştirilmesine öncülük yapılacaktır. Bu amaçla Afyon Kocatepe Üniversitesi, Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (GURAM) deneysel bir veri toplama sistem kurulmuştur. Tez çalışması TÜBİTAK tarafından

123E624 numaralı proje ile desteklenmiştir. Çalışma kapsamında bir adet 85 Watt polikristal silisyum panel, iki adet monokristal silisyum panel (90 Watt ve 75 Watt) ve bir adet 80 Watt esnek yapılı bakır indiyum galyum selenit (CIGS) panel temin edilmiştir. Panellerin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlamak amacıyla, MPPT özellikli 6-36 Volt 5 Amperlik DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Panel sisteminden elde edilecek verilerin toplanması için 12 kanallı, 1 sn- 30 dk arası kayıt alabilen, PAPERLESS marka veri kaydedici temin edilmiştir. Panellerin ürettiği enerjiyi harcamak adına 100Watt'lık üç adet yük direnci sistemde kullanılmıştır.



Şekil 1.1 Fotovoltaik güç tahmin yaklaşımlarının ve yöntemlerinin sınıflandırılması

Literatürde güneş enerjisi üzerinde birçok çalışma geliştirilmiştir. Mycielski modeli örüntü tarama temelli yenilikçi tahmin modellerinden biridir. Bu model, ayrık zaman serisi verilerindeki tekrarlayan desenleri analiz ederek gelecekteki güneş ışınlamını veya PV güç çıkışını tahmin etmeye çalışır. Mycielski algoritmasının güneş enerji sistemlerinde kullanılmasındaki en büyük eksikliği ise ardışık sıfır değerlerine olan duyarlılığıdır. Bu tezin temel amacı, literatürde yalnızca tek boyutlu zaman serilerine uygulanan Mycielski modelini ilk kez çok boyutlu zaman serilerine uygulamak ve bir fotovoltaik panelin çıkış gücünü çeşitli bağımsız değişkenlerin etkisi altında tahmin edebilmektir. Fakat literatürdeki çalışmalarda (Hocaoğlu ve Serttaş 2017), özellikle tek boyutlu güneş verilerine uygulanan Mycielski modeli, ardışık sıfır değerlerinin tahmin performansını olumsuz etkilemesi nedeniyle, veri setinden gece saatlerine ait sıfır değerlerinin çıkarılması ile uygulanabilmiştir. Zaman serisi verilerinden sıfır değerlerinin çıkarılması, zamanın doğal bir parçası olan gece saatlerinin tahmin üzerindeki etkisinin göz ardı edilmesine neden olmakta ve aynı zamanda zaman serisinin bütünsel yapısını bozmaktadır. Bu doğrultuda çalışmanın ilk aşamasında, literatürdeki çalışmalarda dikkat çeken ve öncelikli bir sorun olarak görmüş olduğumuz Mycielski modelinin güneş enerjisi tahminlerindeki sıfıra duyarlılık probleminin aşılması üzerine odaklanılmıştır. Söz konusu problemin aşılabilmesi amacıyla, yeni bir üç parçalı güneş ışınlam şiddeti tahmin modeli geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında gerçek zamanlı verilerin toplanabilmesi amacıyla Afyon Kocatepe Üniversitesi, Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde deneysel bir veri toplama sistemi kurulmuş; ancak sıfıra duyarlılık probleminin çözümüne yönelik olarak yeterli veri elde edilememiştir. Bu nedenle, geliştirilen üç aşamalı modelin sağlıklı bir şekilde test edilip doğrulanabilmesi için Afyonkarahisar Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Afyon bölgesi için güneş ışınlam şiddeti verileri temin edilmiştir.

Geliştirilen üç aşamalı tahmin modelinde güneş ışınlam verileri zamanın kısmi sürekli bir fonksiyonu olarak değerlendirilir. Bu fonksiyonda, güneş ışınlamı olmayan saatlere ait veriler birinci kısım olarak, gün batımı ve gün doğumu zamanlarına ait veriler ikinci kısım olarak, geri kalan güneş ışınlam değerleri ise üçüncü kısım olarak işaretlenir. İşaretleme sırasında hesaplanan dünya dışı radyasyon değerleri dikkate alınır. Her bir kısım ayrı ayrı

ele alınır ve farklı tahmin stratejileri uygulanır. Sıfır değere sahip zaman örnekleri için, karşılık gelen hesaplanan dünya dışı değerler kullanılır. Bu şekilde sıfır değerleri, güneş geometrisi nedeniyle bu değerler deterministik olduğundan herhangi bir tahmin hatası olmaksızın doğrudan hesaplanır. Gün batımı ve gün doğumu zamanları etrafındaki verilerin aralığı dar olduğundan ve atmosferik geçirgenlik önemli bir rol oynadığından, bu zamanlara ait veriler güneş ışıınımı verilerine sabah ve akşam geçişleri için dünya dışı radyasyonun artış ve azalış miktarları eklenerek ayrı ayrı ele alınır. Son olarak, geriye kalan veriler için Mycielski tabanlı "tarihsel en uzun analog zaman serisinin aranması" tahmin algoritması geliştirilmiştir. Tez çalışmasında, Mycielski algoritmasının geliştirilmesine yönelik önemli aşamalar kaydedilmiştir. İlk olarak, algoritmanın sıfıra duyarlılık probleminin üstesinden gelinmiş ve bu temel sorun başarıyla çözümlenmiştir. Bu gelişme, algoritmanın güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini artırmıştır.

İkinci aşamada, mevcut literatürdeki Mycielski çalışmalarında algoritmanın genellikle tek boyutlu zaman serileri (örneğin, güneş ışıınımı, rüzgâr hızı) üzerinde uygulandığı görülmüştür. Ancak fotovoltaiik panellerin güç çıkışı tahmini için tek bir değişkenin yetersiz olduğu belirlenmiştir. Güç çıkışını etkileyen faktörlerin arasında güneş ışıınımı, hava sıcaklığı, nem, rüzgâr hızı gibi meteorolojik parametrelerin yanı sıra akım, gerilim gibi elektriksel büyüklükler de önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, tez çalışmasının bu aşamasında panel güç çıkışını etkileyen değişkenler tespit edilmiş ve çok boyutlu veri üzerinde en uzun ortak dizi, Mycielski algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım, algoritmanın çok boyutlu veri yapılarına adapte edilmesine olanak tanımıştır.

Üçüncü aşamada ise Mycielski algoritmasının yapay zekâ tabanlı yöntemlerle entegre edilmesi hedeflenmiştir. Bu entegrasyon, çok boyutlu veri yapılarında tahmin performansının artırılmasını sağlamıştır. Özellikle yapay zekâ algoritmaları ile hibrit bir yapı oluşturularak hem algoritmanın doğruluğu artırılmış hem de tahmin başarısında önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. Bu aşamalar, Mycielski algoritmasının geleneksel kullanımını aşarak, enerji tahmini için daha kapsamlı ve etkili bir model geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

2 LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu tez çalışmasının konusu kapsamında literatürde yer alan çalışmalar iki farklı başlıkta ele alınmıştır. İlk başlık, gelmişten günümüze Mycielski algortması ile gerçekleştirilen tahmin modelleri ve hangi alanlarda kullanıldığını içeren araştırmalardan oluşmaktadır. İkinci başlık ise fotovoltaiik panellerin analizinde yapay zekâ tabanlı modellerin kullanımını konu alan çalışmaları içermektedir.

2.1 Mycielski Algoritması ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Zaman zaman iletişim uygulamaları için kullanılan Mycielski algoritması, veri içindeki desenleri yakalayan deterministik bir tahmin modelidir. Hoccoğlu vd. (2009), kısa vadeli rüzgâr hızı tahmini için geliştirdikleri Mycielski modeli ile literatüre yenilikçi bir bakış açısı kazandırmıştır. Bir yıllık saatlik rüzgâr hızı verilerinin tüm geçmiş örneklerini kullanarak veri içerisinde bulunan en uzun benzer diziyi belirlemeye çalışmışlardır. Türkiye'nin üç farklı şehrinde (Kayseri, İzmir, Antalya) elde edilen veriler algoritmanın yapısı gereği tam sayılara yuvarlanmıştır. Mycielski modelinde en uzun benzer dizi bulunduğunda eşleşen diziyi takip eden bir sonraki örnek, tahmin değeri olarak kabul edilmiştir. Tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki hata oranı sıfıra çok yakın ölçülmüştür.

Fidan vd. (2012) bir çalışmasında, Mycielski modelini daha gerçekçi ve tutarlı yapay rüzgâr hızı verilerini üretmek için uygulamıştır. İzmir ve Kayseri illeri için üç yıllık rüzgâr hızı verileri kullanılmıştır. 2003 ve 2004 yıllarına ait veriler Mycielski modelinin eğitimi için kullanılmış, 2005 yılına ait veriler ise test için kullanılmıştır. Saatlik frekansta bir yıllık yapay veri üretilmiştir. Geliştirilen model klasik Markov modeli ile kıyaslandığında oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Gan vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kısa vadeli rüzgâr hızı tahmini için kullanılan Mycielski algoritmasının performansı, farklı rüzgâr hızı durum aralıklarına göre incelenmiştir. Çalışmada üç farklı rüzgâr çiftliğinden elde edilen veriler 25000 örnek ve 10 dakikalık zaman çözünürlüğüne sahiptir. Bu verilerden altı farklı durum aralığı kullanılarak tahminler yapılmış ve en iyi sonuçların küçük durum aralıklarında elde edildiği belirlenmiştir.

Goh vd. (2016), Malezya rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek amacıyla Mycielski-3 algoritması ve K-means kümeleme algoritması kullanılarak rüzgâr hızı tahmini yapılmış ve algoritmaların başarıları kıyaslanmıştır. Çalışmada 2002-2010 yılları arasında toplanan aylık ortalama rüzgâr hızı verileri kullanılmış ve kısa vadeli tahmin modellerine sunulmuştur. Sonuçlar kıyaslandığında K-means algoritmasının daha düşük hata oranı ile Mycielski algoritmasına göre başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Mycielski algoritmasını tek boyutlu güneş enerjisi verilerine ilk kez uygulayanlardan Hocaoglu ve Serttaş (2017), geçmiş verilerdeki örüntüleri tanıyan deterministik bir algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma, ayrık zaman serisi verilerindeki tekrarlayan desenleri analiz ederek gelecekteki güneş ışıınımını tahmin etmeye çalışır. Çalışmada, dört yıllık saatlik frekansta ölçülmüş güneş ışıınım verileri kullanılmıştır. Mycielski algoritmasının yetersiz kaldığı durumlarda olasılık geçiş ilişkilerini modellemek amacıyla Markov zincirleri ile hibrit bir yapı geliştirilmiştir. Algoritmanın geçmiş verilerdeki desenleri başarıyla yakaladığı ve güneş ışıınım tahmininde başarılı olduğu gösterilmiştir. Bu başarılı sonuç, güneş ışıınımı verilerinden gece saatlerinde kaydedilen ardışık sıfır değerlerinin çıkarılmasıyla elde edilmiştir.

Fidan vd. (2020), saatlik güneş ışıınım tahmini için yeni bir Mycielski modeli geliştirmiştir. Modelde güneş ışıınım verileri iki boyutlu bir matris gibi düşünülmüştür. Bu matris yapısında satırlar günleri, sütunlar ise saatleri temsil etmektedir. Böylece veri içerisinde hem saatlik hem de günlük desenlerdeki tekrarları tespit edip bir sonraki saat tahmini yapılmıştır. Bu çalışma ile Mycielski algoritmasının güneş ışıınımında daha zengin bilgiler kullanılarak tahmin yapılabilmesi sağlanmıştır.

Song vd. (2021), çok kısa vadeli güneş ışıınım tahmini için senaryo bazlı bir model geliştirmiştir. Çalışmada piranometre ile 1 dakikalık örnekleme frekansında küresel yatay ışıınım verisi ölçülmüştür. Rejim değiştiren, atlamalı difüzyon ve Mycielski–Markov modelleri birleştirilerek oluşturulan hibrit modelde dakikalık çözünürlükte başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Serttaş ve Hocaoglu (2025), çapraz bağlı polietilen yalıtımlı orta gerilim kablolarında

kısmi boşalma sinyallerinin tespiti ve tahmini için Mycielski tabanlı bir model önermiştir. Modelin başarısını artırmak için Wavelet dönüşümü ve Markov yöntemini kullanarak algoritmanın başarısını artırırlardır.

2.2 Yapay Zekâ Modelleri ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Artan enerji talebi, fosil kaynakların tükenme riski ve küresel olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, enerjinin doğru bir şekilde yönetilmesini zorunlu hale getirmiştir. Son yıllarda, geleneksel tahmin modellerin sınırlılıkları, fotovoltaik sistem analizlerinde yapay zekâ tabanlı tahmin modellerinin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri, yüksek doğruluk oranları, karmaşık ve doğrusal olmayan veri ilişkilerini modelleme yetenekleri sayesinde literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. Bu alanda gerçekleştirilen bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ağbulut vd. (2020) fotovoltaik güç tahmini için dört farklı yapay zekâ algoritması kullanmış ve performanslarını kıyaslamıştır. Geliştirilen modellerde giriş verileri olarak sıcaklık, güneş ışıınımı ve güneşlenme süresi tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda Destek vektör makinaları modeli, K-en yakın komşu, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve derin öğrenme modellerine göre başarılı sonuçlar vermiştir.

Sharadga vd. (2020) büyük ölçekli bir PV tesisin çıkış gücünü tahmin etmek için Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA), ARIMA ve SARIMA gibi istatistiksel modellerin performansı, YSA modellerinden Uzun Kısa Süreli Bellek Ağı (LSTM), Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (BiLSTM), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) gibi modeller ile karşılaştırılmıştır. Modellerde 3640 saatlik güç üretim verisi kullanılmış ve saatlik tahminler yapılmıştır. Sonuçlar, YSA modelinin, istatistiksel yöntemlere göre daha yüksek başarı ve daha az hesaplama süresine ihtiyaç duyduğunu göstermiştir.

Fara vd. (2021) PV sistemlerin enerji üretimini tahmin etmek için ARIMA ve YSA modellerini kullanarak kısa ve uzun vadeli tahminler yapılmasını amaçlamıştır. Tahmin modellerinde kullanılmak üzere güneş ışıınım şiddeti, sıcaklık, nem, atmosfer basıncı, rüzgâr hızı, bulutluluk, güneşlenme süresi ve üretim verileri kullanılmıştır. Çalışmada, ARIMA modeli, YSA'ya kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir.

Konstantinou vd. (2021) bir PV santralının güç çıkışını tahmin etmek için 2016-2019 yılları arasına ait 15 dakikalık ölçüm aralığında toplam 84768 adet veri kullanılmış ve 1,5 saat ilerisi için tahmin yapılmıştır. Çalışmada Yığılmış Uzun Kısa Süreli Bellek Ağı (Stacked LSTM) modelini geliştirmiştir. Sonuçlar, modelin PV güç tahmininde yüksek doğruluk sunduğunu ve özellikle mevsim geçişlerinde güvenilir performans sağladığını göstermiştir.

Agga vd. (2022) kısa vadeli PV enerji üretimini tahmin etmek için Evrimsel Sinir Ağları (CNN) ve LSTM modellerini birleştiren hibrit bir derin öğrenme modeli önermektedir. Çalışmada kullanılan veriler Fas'ın Rabat şehrinde bulunan 15 kW kapasiteli bir fotovoltaiik santralden toplanmıştır. Çok girdili model için günlük frekansta PV enerji üretim ve tüketimi, rüzgâr hızı, sıcaklık, nem bulutluluk oranı ve güneşlenme süresi kullanılmıştır. Tek başına kullanılan makine öğrenme ve derin öğrenme modelleri ile kıyaslandığında CNN-LSTM modeli, düşük hata oranı ve yüksek doğruluk sağlamıştır.

Belmahdi vd. (2022) güneş ışıınımı tahmini için çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerinin performansını kıyaslamıştır. Çalışmada Abdelmalek Fen Fakültesinden 1 Ocak 2013 – 31 Aralık 2015 tarihleri arasında, saatlik frekansta ölçülen küresel güneş ışıınımı, bulutluluk indeksi, sıcaklık farkı, dünya dışı radyasyon, maksimum ve ortalama sıcaklık verileri kullanılmıştır. Seçilen çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları içerisinde, en başarılı performans İleri Beslemeli Sinir Ağları (FFNN) ve ARIMA modelinden elde edilmiştir.

Lee ve Cho (2022) elektrik yük talep tahmini için geleneksel modeller, makine öğrenmesi modelleri ve hibrit modellerin başarımını kıyaslamıştır. Çalışmada 1 Ocak 2014 – 19 Ekim 2019 tarihleri arasında ölçülen günlük ortalama yük, sıcaklık ve nem verileri kullanılarak kısa vadeli tahminler yapılmıştır. Kıyaslama sonucu hibrit modellerin daha düşük hataya sahip olduğu gözlenmiştir.

Özdemir (2022) doktora çalışmasında amorf silisyum, polikristal silisyum ve mono kristal silisyum olmak üzere üç farklı tipteki fotovoltaiik panellerin mevsimlere ve yıllara göre verim ve performans analizlerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca meteorolojiden ve

panellerden alınan verilerle güneş ışıınım miktarını tahmin etmek amacıyla, YSA ve LSTM derin öğrenme modelleri geliştirilmiştir.

Güneş ışıınım tahmini için geliştirilen bir çalışmada, YSA ve LSTM modelleri Wentz ve arkadaşları (2022) tarafından karşılaştırılmıştır. Çalışmada, iki farklı meteorolojik veri seti kullanılmış ve üç farklı kısa vadeli tahmin ufkunda (1, 15 ve 60 dakika) modellerin performansı incelenmiştir. LSTM modeli, uzun süreli bağımlılıkları daha iyi yakalayabildiği için YSA'ya göre özellikle daha kısa vadeli tahminlerde daha başarılı olmuştur. Ancak tahmin ufkı arttıkça, iki model arasındaki fark azalmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Azizi vd. (2023) bir çalışmasında, 20 MW kapasiteli bir güneş enerjisi santralının ışıınım ve sıcaklık tahmini gerçekleştirmek amacıyla, 1984–2021 yılları arasına ait toplam 456 aylık güneş ışıınımı, sıcaklık, bağıl nem ve yüzey basıncı verileri kullanmıştır. Gelecek 10 yıllık sıcaklık ve ışıınım tahmini için derin öğrenme modellerini kullanmıştır. Çeşitli derin öğrenme modelleri test edilmiş ve CNN modeli, dört giriş parametresi ile en iyi performansı göstermiştir.

Dhaked vd. (2023) Brezilya'daki 9 kW kapasiteli bir güneş enerjisi santralının kısa vadeli güç çıktısını tahmin etmek için LSTM modeli kullanmıştır. Çalışmada, dört katmanlı LSTM modeli, hava durumu değişkenlerini (güneş ışıınımı, sıcaklık, nem vb.) kullanarak 15 dakikalık ileri tahminler yapmıştır. LSTM modeli, Geri Yayılım Sinir Ağı (BPNN) ile karşılaştırıldığında daha yüksek doğruluk sağlamıştır.

Kim vd. (2023) zaman serisi algoritmalarını kullanarak güneş enerjisi üretimi çıkışı için tahmini için Holt-Winters, Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon, ARIMA, SARIMA, ARIMAX, SARIMA, LSTM yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada, Ocak 2017 ile Haziran 2021 arasında Güney Kore'nin Ansan şehrinden fotovoltaik enerji üretim verileri ve Ocak 2017 ile Haziran 2021 arasında Güney Kore'nin Suwon şehrinden hava durumu verileri toplanmıştır. Güney Kore'deki 1,5 MW şebekeye bağlı PV sisteminden 40.000 saatlik çalışma verisi kullanılmıştır. PV güç üretimi tahmini, çeşitli modellerin etkinliğini test etmek için saatlik olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, LSTM modeli diğer

modellere göre daha az hata oranına sahip olmuştur.

Sahin vd. (2023) bir PV sistemin verimliliğini tahmin etmek için hava koşullarını dikkate alan bir model geliştirmeyi amaçlamıştır. Iğdır ilindeki 500 KW'lık bir santralin günlük bazda tahmini için güneş ışıınımı, modül gücü, modül sıcaklığı, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, bağıl nem ve hava basıncı kullanılmıştır. Çalışmada, YSA ve Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) modelleri karşılaştırılmıştır. YSA modelinin karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri daha iyi yakaladığı ortaya koyulmuştur.

Gupta vd. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, güneş ışıınım tahmini için Ensemble Stacking yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada, Yığılmalı Extra Ağaçlar (SE-ET) yöntemi geliştirilmiştir. Modelde, farklı makine öğrenmesi algoritmaları, Karar Ağaçları (DT), Rasgele Orman (RF), Light Gradient Boosting Machine (LGBM), Cat Boost (CB) ve Extreme Gradient Boost (XGB) gibi yöntemler önerilen modelin başarısını kıyaslamak için kullanılmıştır. SE-ET modeli, diğer yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Önerilen model başarılı sonuçlar vermiştir.

Michael vd. (2024) saatlik güneş ışıınımı tahmini için BiLSTM ve GRU derin öğrenme modellerini hibrit bir şekilde kullanmıştır. Çalışmada 15 dakikalık frekanlarda ölçülen ışıınım, dünya dışı radyasyon, nem, basınç, rüzgâr hızı ve yönü, yağış miktarı gibi çeşitli büyüklükler kullanılmıştır. Geliştirilen hibrit model, klasik derin öğrenme modellerine göre yüksek performans göstermiştir.

Saxena vd. (2024) bir çalışmasında güneş enerjisi tahmini için K-en yakın komşu (KNN) ve Destek Vektör Makineleri (SVM) algoritmalarını hibrit bir şekilde kullanmaktadır. Modelde toplam bir yıllık 8760 adet sıcaklık, güneşlenme süresi, ışıınım şiddeti ve PV üretim verisi kullanılmıştır. Sonuçlar derin öğrenme modellerinden olan LSTM modeli ile kıyaslanmış ve hibrit model daha başarılı bulunmuştur.

Perveen vd. (2025) farklı gökyüzü koşullarında PV güç tahmini için YSA modellerini kullanmıştır. Araştırmada kullanılan model için meteorolojik parametreler farklı iklim koşulları için de uygulanmıştır. Radyal Temel Fonksiyon Sinir Ağı (RBFNN) modelinin

çalışmada başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Zhang vd. (2025) kısa vadeli PV güç tahmini için hibrit yeni bir model önermiştir. Çalışmada çeşitli sinyal ayrıştırma teknikleri kullanılmıştır. BiLSTM modeli ile zaman bağımlılığı tespit edilmiştir. İnformer modeli ile de veri içerisindeki genel özellikler yakalanmıştır. Bu iki modelin birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit yöntem geleneksel derin öğrenme modelleri ile kıyaslanmıştır. Önerilen modelin değişken hava koşullarında oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

Güneş enerjisi tahmini konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde bu tez çalışmasının alt yapısını oluşturacak çeşitli çıkarımlar elde edilmiştir:

- 1- Mycielski algoritması ile gerçekleşen ilk çalışmalar rüzgâr hızı tahmini üzerine olmuştur. Algoritmanın bu veri yapısında oldukça başarılı çalıştığı görülmüştür.
- 2- Mycielski algoritması, deterministik yapıya sahip güneş ışıınımı verileriyle de kullanılmıştır. Fakat veri setinden gece saatlerine karşılık gelen ardışık sıfır değerleri çıkarılmıştır. Bu ön işleme adımı, modelin genel tahmin başarısını önemli ölçüde iyileştirmiştir.
- 3- Mycielski algortması zaman serilerinde genellikle tek boyutlu veri yapılarında kullanılmıştır.
- 4- Literatürdeki çeşitli çalışmalarda, Mycielski modelinin eksik yönlerini tamamlamak ve tahmin başarısını artırmak için genellikle Markov zincirleri ile hibrit yapılar oluşturulmuştur.
- 5- PV güç tahminlerinde yapay zekâ modellerinden yapay sinir ağlarının sık kullanıldığı görülmüştür.
- 6- Güneş ışıınım şiddeti, sıcaklık ve fotovoltaiik güç verileri, tahmin için en sık kullanılan büyüklüklerdir. Bu verilere ek olarak nem, rüzgâr hızı gibi dış faktörler

de tahmin modelleri için önemli büyüklükler olarak kabul edilmiştir. Giriş verisi olarak güneşlenme süresi, yağış miktarı ve bulutluluk indeksi gibi büyüklüklerin az da olsa kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

- 7- Ölçülen verilerin zaman aralıkları, PV güç tahmini sürecinde önemli bir role sahiptir. Belirlenen zaman aralıkları tahmin modellerinin hassasiyetini ve doğruluğunu etkilemektedir. Literatürdeki çalışmalar genellikle çok kısa, kısa ve orta vadeli tahminleri kapsamaktadır.
- 8- PV güç tahmininde kullanılan hibrit modeller, klasik tek yapıli modellere göre genellikle daha başarılı tahmin sonuçları göstermiştir. Hibrit modellerin başarısının artması, farklı tahmin modellerinin üstün yönlerinin birleştirilmesi ile sağlanmaktadır. Fakat bu modellerin elde edilmesi daha komplekstir ve hassas bir şekilde modelleme süreci gerektirir.

Tüm çıkarımlar değerlendirildiğinde bu tez çalışması literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Tahmin modelinin yüksek hassasiyeti ve doğruluğu için çalışmada kullanılan veriler 15 dakikalık zaman aralıkları ile ölçülmüştür. Ayrıca, Mycielski algoritması geliştirilerek ardışık sıfır değerlerinin neden olduğu problemler giderilmiş ve bu sayede daha başarılı tahmin sonuçları elde edilmiştir. Böylece gece saatlerindeki sıfır değerleri veri setinden çıkarılmadan zaman serilerinin yapısı bozulmamıştır. Literatür çalışmalarında Mycielski algortması tek boyutlu zaman serileri için uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında Mycielski algoritması çok boyutlu zaman serileri için ilk kez uygulanmış ve başarılı sonuçlar vermiştir. Literatürde Mycielski algortması birçok çalışmada hibrit olarak Markov zincirleri ile entegre edilerek uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında yine ilk kez yapay zekâ algoritmaları ile hibrit bir şekilde kullanılmıştır.

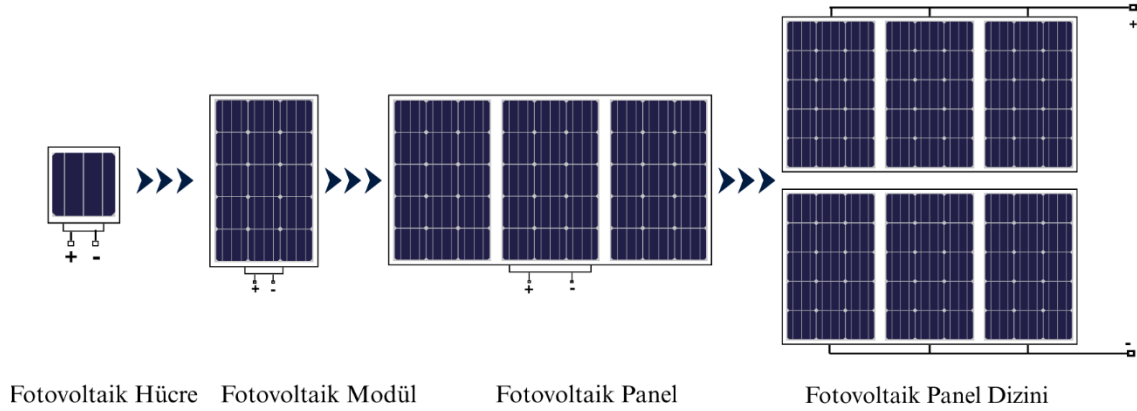
3 MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışması, Tübitak 123E624 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Deneysel uygulamalar için Afyon Kocatepe Üniversitesi, GURAM müdürlüğüne fotovoltaik panel ve veri toplama sistemi kurulmuştur. Tez kapsamında kurulan sistemin ve veri toplamak için kullanılan cihazların detaylı anlatımı Bölüm 3.1’de bahsedilmiştir. Tez çalışmasında geliştirilecek tahmin modelleri için elde edilen gerçek zamanlı veri seti, literatürde kabul görmüş yöntemler ile veri ön işleme adımlarına tabi tutulmuştur. Veri seti Bölüm 3.2’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Veri ön işleme aşamalarından Bölüm 3.3 ‘de bahsedilmiştir. Bölüm 3.4 ‘te Mycielski algoritmasından, Mycielski modelinin sıfır değerlerine duyarlılığının tahmin performansı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmayı amaçlayan tez çalışması kapsamında geliştirilen Üç Aşamalı Tahmin modelinden, Bölüm 3.5’te tez kapsamında kullanılan yapay zekâ tahmin algoritmalarından LSTM ve GRU modellerinden bahsedilmiştir. Bölüm 3.6’da tez çalışmasının özgün yöntemi ve çok boyutlu zaman serilerinde daha önce uygulanmamış olan Çok Boyutlu Mycielski algoritması ve yöntemden elde edilen enformasyonların yapay zekâ tabanlı algoritmalara entegre edilerek hibrit ileri tahmin modelleri oluşturulması anlatılmıştır. Bahsedilen yöntemlerden elde edilen sonuçlar için performans değerlendirme kriterleri Bölüm 3.7’de bahsedilmiştir. Bölüm 4’te tez kapsamında geliştirilen modellerin karşılaştırmalı sonuçları sunulmuştur.

3.1 Fotovoltaik Sistemler ve Veri Toplama

Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken yapılara fotovoltaik sistemler denir. Bu yapılarda genellikle silikon, germanyum, selenyum, bakır, arsenik ve tellür gibi saf veya katkılı maddeler kullanılır. Bu sistemler güneş ışınımını gelişmiş teknolojiler aracılığıyla elektriğe dönüştürürler. Birden fazla güneş hücresinin çeşitli şekillerde bir araya gelmesi ile fotovoltaik sistemler oluşmaktadır. Bir güneş hücresinden elde edilen gerilim 0,3-0,6 Volttur. Bu hücrelerin çıkış gücü ise 2-3 Watt değer aralığındadır. Bu sistemlerden daha yüksek güç elde edebilmek için birden fazla hücre ile modülleri elde etmek gerekir. Fotovoltaik sistemlerden elde edilen verim ve performans, hücrelerin yapımında kullanılan malzemelere ve hücrelerin bağlanma şekillerine bağlıdır. Bu sistemin paralel ve seri bağlanması ile elde edilen yapıya fotovoltaik modül denir.

Modüllerin bir araya gelmesiyle de fotovoltaik panel dizileri oluşturulur (Özdemir 2022, Husain vd. 2018). PV hücre, modül, panel ve panel dizini Şekil 3.1 'deki gibi verilmiştir.



Şekil 3.1 Fotovoltaik hücre, modül, panel ve panel dizini

PV modüllerin verimi kurulduğu bölgenin çevresel şartlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca bu modüllerin yapım aşamasında kullanılan yarı iletken malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri bölgeye göre farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, fotovoltaik sistemleri planlarken ve kurarken hem uygun hücre malzemesini hem de yerel çevre koşullarını dikkatlice göz önünde bulundurmak önemlidir (Özdemir 2022).

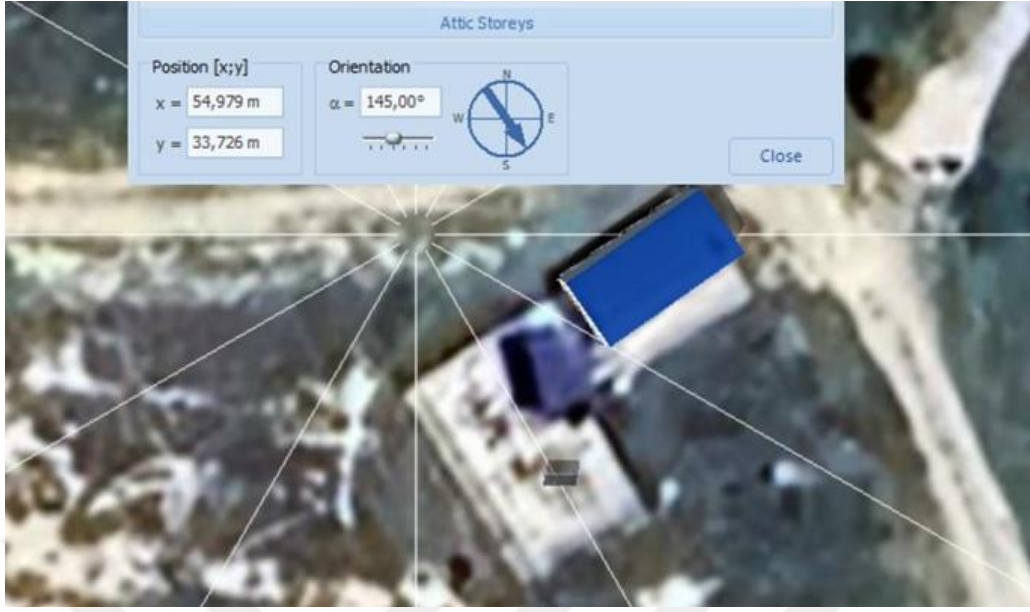
Aras (2019), tez çalışması kapsamında monokristal ve polikristal güneş panelleri kullanmıştır. Bu panellerin Erzurum'un kış aylarındaki verimleri kıyaslanmıştır. Çalışmadaki, polikristal paneller üzerinde belirtilen teorik verim aralığı %13-%16 arasındadır. Fakat ölçümler sonucunda bu verim %13,9-%18 arasında elde edilmiştir. Monokristal panellerde ise teorik verim aralığı %15 ile %18 olarak belirtilmiş, ancak gerçek ölçümlerde %13 ile %17 arasında değerlere ulaşılmıştır. Performans oranları açısından polikristal panellerin Aralık, Ocak ve Şubat aylarında sırasıyla %116, %94 ve %90; monokristal panellerin ise %110, %91 ve %90 oranlarında performans gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, Erzurum ili için kış aylarında polikristal panellerin veriminin monokristal panelden yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, kış aylarında enerji üretiminde polikristal panellerin daha avantajlı bir seçim olduğunu göstermektedir.

Çingi (2019), tarafından yapılan yüksek lisans tezinde, farklı üretici firmalar tarafından üretilen fotovoltaik panellerin enerji verimlilikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmada, fotovoltaik panellerin verimliliğini etkileyen faktörler sıralanmış ve bu faktörlerin panel üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmada Panasonic firmasına ait VBHN294SJ45 tipi fotovoltaik panel, kurulu bir santral üzerinde incelenmiş ve sıcaklık katsayısı, güç toleransı, yaşlanma faktörü gibi parametreler detaylıca ele alınmıştır. Saha verileri ve test sonuçları karşılaştırılarak, gerçek çalışma koşulları ile laboratuvar ortamındaki standart test koşulları arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Sonuçlar, fotovoltaik panellerin verimliliğinin artırılması için tasarım ve üretim aşamalarında dikkate alınması gereken önemli hususları vurgulamaktadır.

Tez çalışmasının bu aşamasında, öncelikle farklı güneş panellerinin performansları detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Tez çalışmasının hedeflerine en uygun paneller seçilmiştir. Panellerin seçimi sırasında, verimlilik, dayanıklılık ve farklı çevresel koşullara adaptasyon gibi kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca bir panelin verimliliğini etkileyen büyüklükler incelenmiştir. Güneş ışıınımı, ışıınım açısı, nem, basınç, sıcaklık, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü gibi meteorolojik değişkenlerin verim üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Literatürdeki PV panellerin performansı üzerine yapılan akademik çalışmalar incelenmiştir. Bu doğrultuda tez çalışması kapsamında iki adet farklı büyüklükte (90 W ve 75 W) monokristal panel, bir adet 85 W polikristal ve bir adet esnek yapılı 80 W CIGS panel kullanımına karar verilmiştir.

Fotovoltaik panellerin mekanik prototipi için öncelikle detaylı bir tasarım süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, panellerin boyutları, yerleşimi, bağlantı noktaları ve montaj mekanizmaları tespit edilmiştir. Panelin monte edileceği alanın detaylı bir incelemesi yapılmıştır. Güneş ışığı alma durumu, gölge alanlar, eğim, yön gibi faktörler değerlendirilmiştir. PVSol tasarım ve simülasyon programı kullanılarak, panelin yeryüzeyi ile yaptığı açı ve azimuth açısına göre optimum yerleşim planı çizdirilmiştir. Elde edilen tasarımın üç boyutlu çizimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



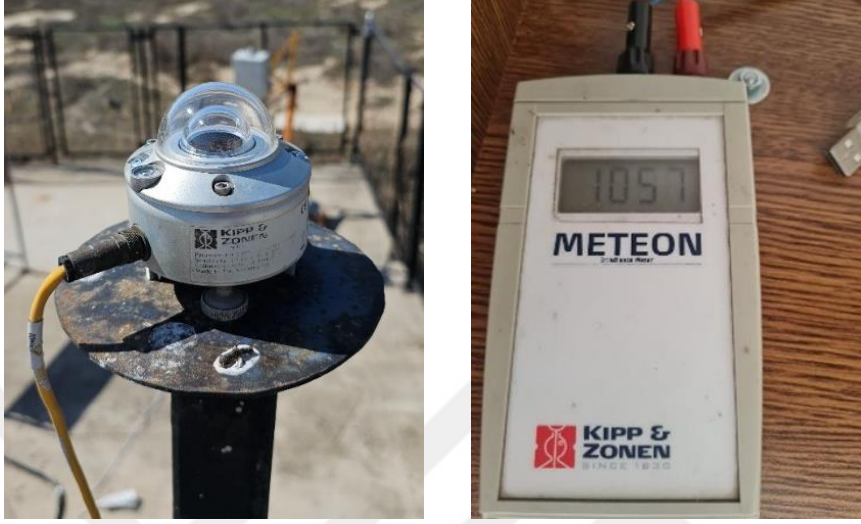
Şekil 3.2 PVSol ile kurulum yapılacak konumun azimuth açısının belirlenmesi

Panellerin sağlam bir şekilde monte edileceği platform, tasarıma uygun olarak, güneş ışınlarını en verimli şekilde alacak eğim ve yön ayarları yapılarak yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Sonraki aşamada panellerin kablo bağlantıları doğru ve güvenilir bir şekilde yapılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan fotovoltaik panellere ait görseller Resim 3.1'deki gibi verilmiştir.



Resim 3.1 Kurulumu ait fotovoltaik panellerin görüntüsü

Tesiste güneş ışınlm şiddetini ölçmek için, bir adet KIPP&ZONEN marka piranometre montajı gerekli açl ve ölçümler yapılarak çatı üzerine yerleştirilmiştir. Resim 3.2 ‘de sistemde kullanılan piranometre görseli verilmiştir.

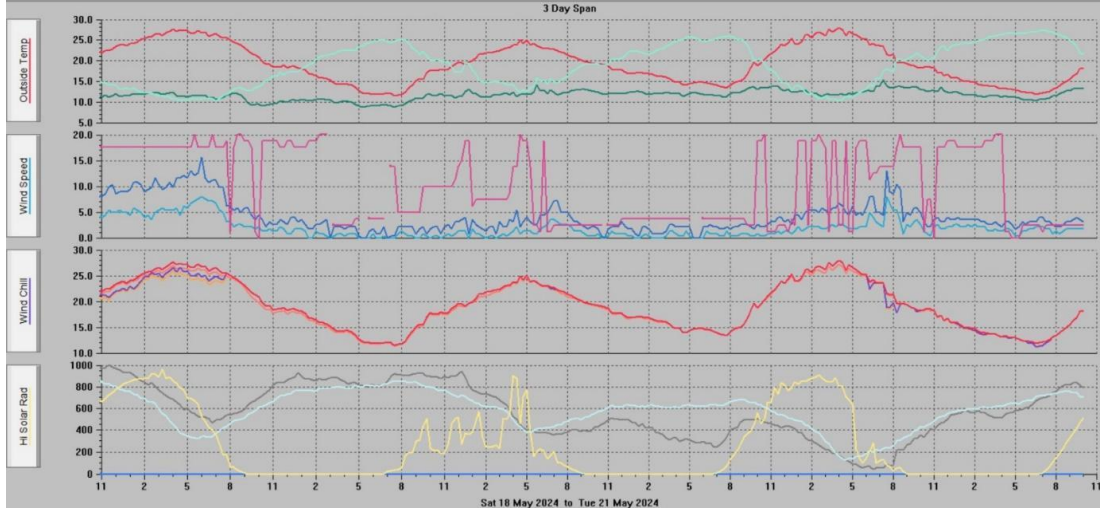


Resim 3.2 Proje kapsamında kullanılan piranometre

Davis Instrument firmasına ait hava istasyonunun bakımları yapılmış ve sıcaklık, nem, basınç, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, güneş ışınlm şiddeti büyüklüklerinin 15 dakika aralıklarla veri kayıtları alınmaya başlanmıştır. Cihaza ait görüntü Resim 3.3’te, alınan kayıtlara ait grafikler Şekil 3.3 (a)’da, verilere ait nümerik değerlerin belli bir kesiti Şekil 3.3 (b)’de verilmiştir.



Resim 3.3 Davis Instrument marka hava istasyonu görüntüsü



(a)

Date	Time	Hi Temp	Low Temp	Out Hum	Dew Pt.	Wind Speed	Wind Dir	Wind Run Speed	Hi Wind Dir	Hi Wind Chill	Heat Index	TB Index	TBSW Index	Bar	Rain Rate	Solar Rad.	Solar Energy	Hi Solar Rad.	UV Index	UV Dose	Hi UV	Heat D-D	Cool D-D	In Temp		
31.03.24	16:45	24.9	24.4	31	6.2	1.8	NW	1.61	5.8	N	24.4	23.6	23.6	28.7	764.6	0.00	0.0	502	10.78	637	2.5	0.27	2.9	0.000	0.064	27.9
31.03.24	17:00	24.4	23.6	31	5.6	4.0	N	3.62	7.2	N	23.1	22.8	22.1	27.3	764.6	0.00	0.0	516	11.10	617	2.4	0.26	2.6	0.000	0.057	27.9
31.03.24	17:15	23.8	23.4	33	6.3	4.5	N	4.02	7.2	WSW	22.4	22.6	21.4	27.0	764.5	0.00	0.0	512	11.01	585	2.1	0.22	2.4	0.000	0.054	27.9
31.03.24	17:30	23.6	23.0	33	6.1	4.0	NW	3.62	7.2	N	22.6	22.3	21.6	25.1	764.4	0.00	0.0	340	7.31	431	1.6	0.17	1.9	0.000	0.052	27.8
31.03.24	17:45	23.4	23.0	36	7.2	4.5	N	4.02	6.7	W	21.9	22.2	21.1	25.2	764.4	0.00	0.0	353	7.59	399	1.5	0.16	1.6	0.000	0.049	27.8
31.03.24	18:00	23.1	22.8	34	6.2	4.5	WSW	4.02	6.7	WSW	21.8	22.0	20.8	25.2	764.3	0.00	0.0	346	7.44	392	1.3	0.14	1.3	0.000	0.048	27.7
31.03.24	18:15	23.1	22.9	37	7.6	4.0	N	3.62	6.7	N	22.3	22.2	21.5	26.0	764.3	0.00	0.0	318	6.84	360	1.1	0.12	1.2	0.000	0.049	27.7
31.03.24	18:30	23.2	22.9	38	8.0	3.1	NW	2.92	4.9	N	23.1	22.3	22.3	26.2	764.2	0.00	0.0	254	5.46	306	0.8	0.09	1.0	0.000	0.047	27.4
31.03.24	18:45	23.1	22.7	38	7.6	3.6	NW	3.22	5.8	N	22.4	21.8	21.5	21.7	764.3	0.00	0.0	211	4.54	227	0.7	0.07	0.7	0.000	0.045	27.4
31.03.24	19:00	22.7	21.8	44	9.0	3.6	NW	3.22	4.9	NW	21.6	20.8	20.6	20.1	764.3	0.00	0.0	147	3.16	185	0.5	0.05	0.6	0.000	0.036	27.3
31.03.24	19:15	21.9	21.7	45	9.4	2.7	WNW	2.41	4.0	WNW	21.8	20.9	20.9	20.1	764.3	0.00	0.0	129	2.77	149	0.1	0.01	0.5	0.000	0.036	27.3
31.03.24	19:30	21.8	20.8	49	9.7	3.1	WNW	2.82	4.0	N	20.8	19.8	19.8	18.4	764.2	0.00	0.0	72	1.55	84	0.0	0.00	0.0	0.000	0.025	27.1
31.03.24	19:45	20.8	20.0	51	9.6	4.0	N	3.62	5.4	WNW	19.2	19.3	18.5	17.1	764.3	0.00	0.0	55	1.18	60	0.0	0.00	0.0	0.000	0.017	26.9
31.03.24	20:00	20.1	19.8	48	8.5	4.0	N	3.62	6.3	N	19.1	18.9	18.2	16.5	764.4	0.00	0.0	42	0.90	53	0.0	0.00	0.0	0.000	0.016	26.7
31.03.24	20:15	19.9	19.5	49	8.5	4.0	N	3.62	6.3	N	18.8	18.6	17.9	16.0	764.5	0.00	0.0	21	0.45	32	0.0	0.00	0.0	0.000	0.012	26.5
31.03.24	20:30	19.5	18.8	50	8.1	4.0	N	3.62	5.8	N	18.1	17.8	17.1	15.1	764.5	0.00	0.0	6	0.13	11	0.0	0.00	0.0	0.000	0.005	26.4
31.03.24	20:45	18.7	18.0	51	7.7	4.0	N	3.62	4.9	N	17.2	17.0	16.2	14.0	764.5	0.00	0.0	0	0.00	0	0.0	0.00	0.0	0.003	0.000	26.4
31.03.24	21:00	18.0	17.4	52	7.4	4.0	N	3.62	4.9	N	16.4	16.4	15.5	13.3	764.6	0.00	0.0	0	0.00	0	0.0	0.00	0.0	0.010	0.000	26.4
31.03.24	21:15	17.5	17.2	52	7.3	4.0	N	3.62	4.9	N	16.2	16.3	15.3	13.1	764.8	0.00	0.0	0	0.00	0	0.0	0.00	0.0	0.012	0.000	26.3
31.03.24	21:30	17.2	16.4	55	7.4	2.2	N	2.01	4.0	N	16.4	15.6	15.6	13.2	765.0	0.00	0.0	0	0.00	0	0.0	0.00	0.0	0.020	0.000	26.1
31.03.24	21:45	17.4	16.4	51	7.1	2.2	NW	2.01	3.6	NW	17.4	16.4	16.4	14.0	765.0	0.00	0.0	0	0.00	0	0.0	0.00	0.0	0.010	0.000	26.0
31.03.24	22:00	17.4	16.4	54	7.1	2.7	NW	2.41	4.5	NNE	16.4															

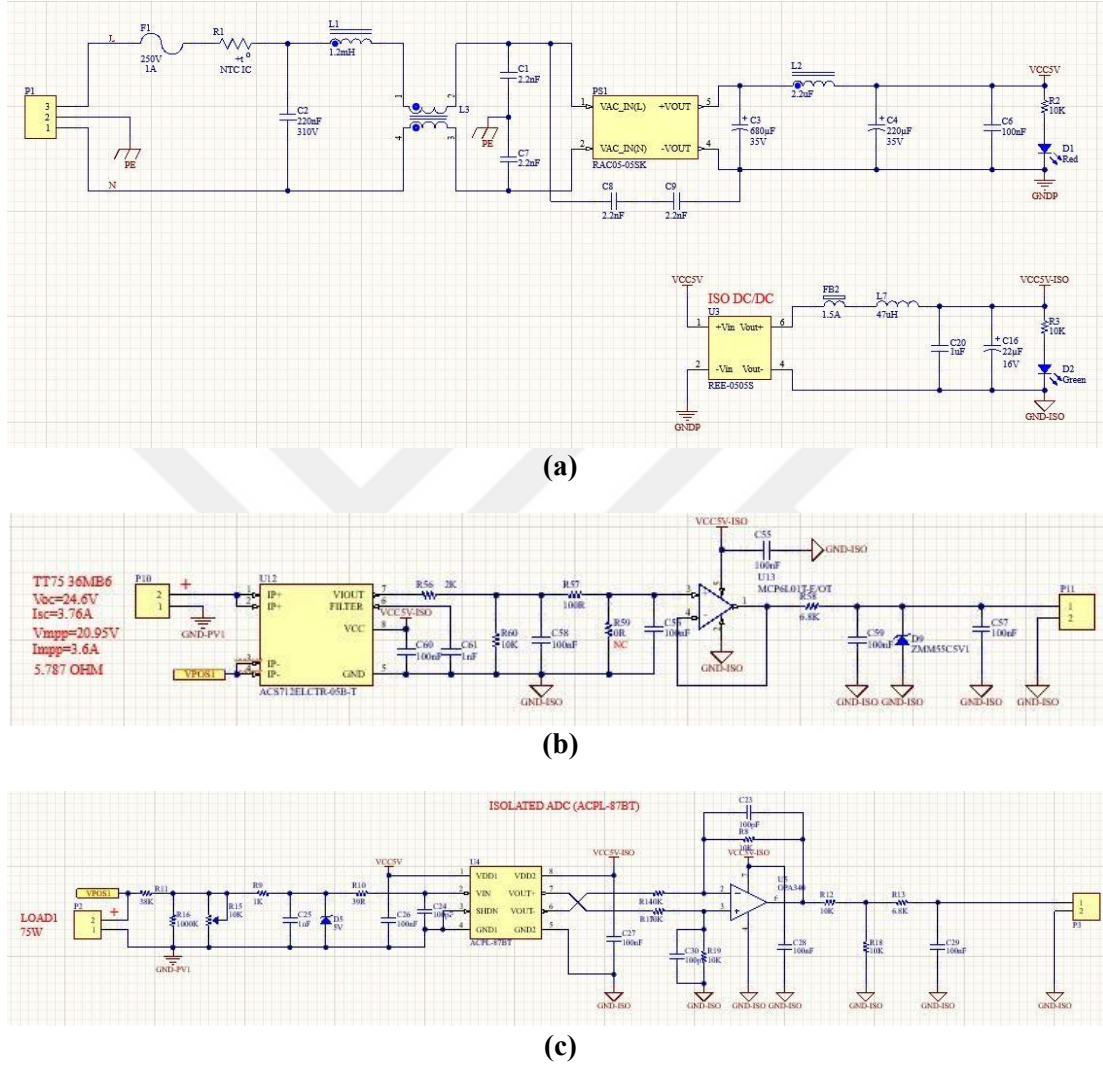
(b)

Şekil 3.3 Verilerin grafiksel gösterimi (a), Verilere ait nümerik görüntüler (b)

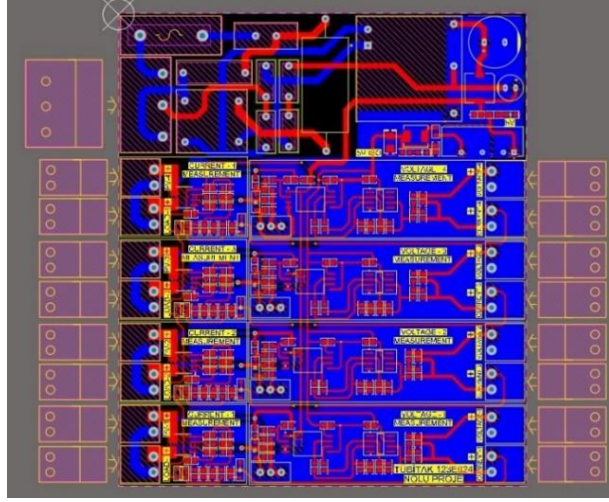
PV panel çıkışlarında gerilim ve akım büyüklüklerinin ölçülebilmesi için sensör kartı tasarlanmıştır. Şekil 3.4'te sensör kartına ait devre şeması görülmektedir. Şekil 3.4 (a)'da, devre elemanlarının beslenmesi için flyback teknolojisi kullanılmıştır. Böylece 230 Volt AC gerilim, izoleli bir şekilde 5 Volt DC gerilime dönüştürülmüştür.

Fotovoltaik modülden yüke aktarılan akımı ölçen akım sensörünün devre şeması Şekil 3.4(b)'de gösterilmiştir. Bu sensör kartında ACS-712 akım sensörü kullanılmıştır. Ayrıca, Şekil 3.4(c), PV modülünün çıkış gerilim seviyesini ölçmek için kullanılan gerilim sensörünün elektrik devre şemasını göstermektedir. Buradaki gerilim sensörü ise izoleli

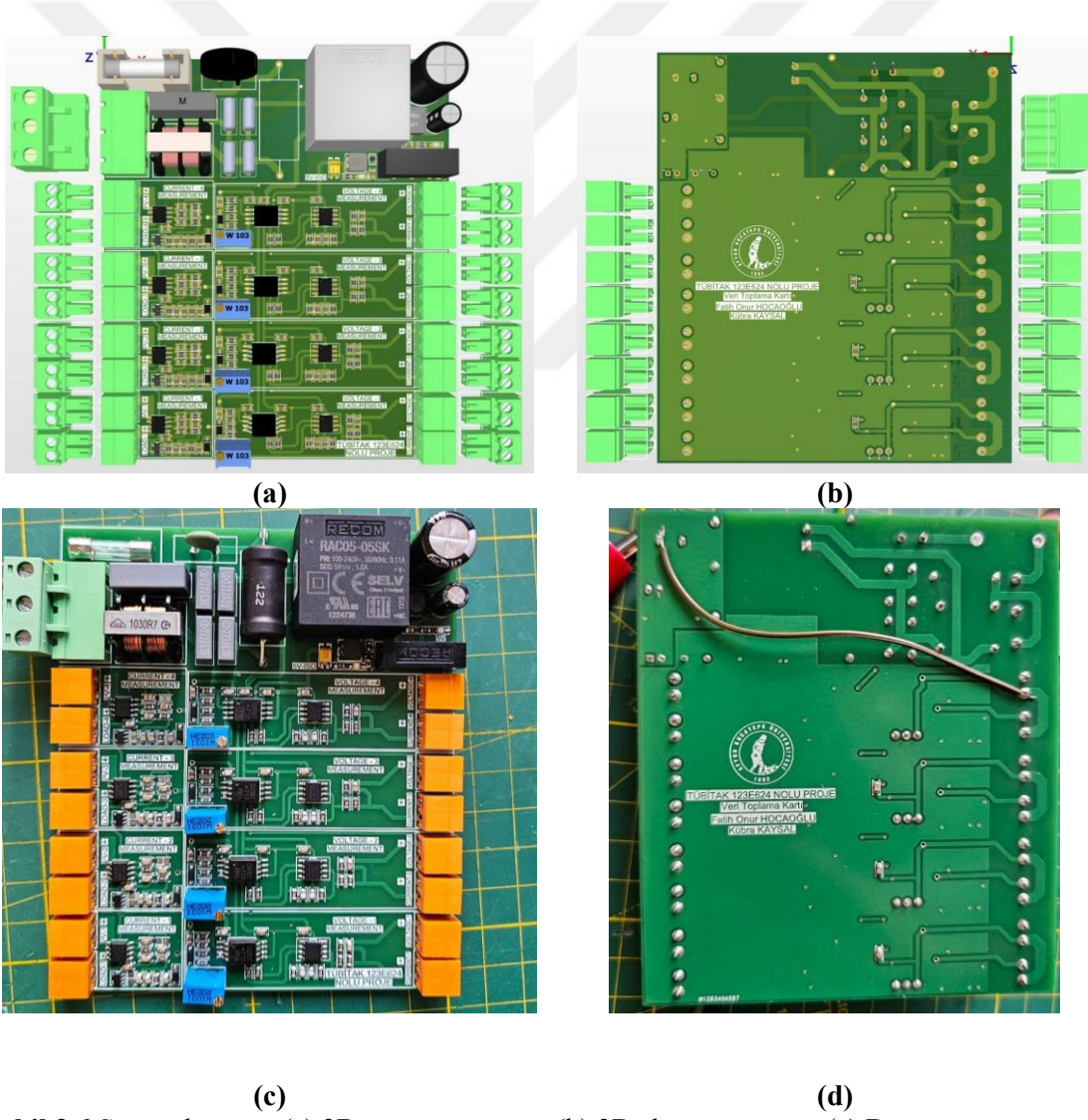
olup, devre içerisinde ACPL-C87 entegresi kullanılmıştır. Sistemde kullanılan veri kaydediciyi yıldırım düşmesi, yüksek voltaj gibi arızaya sebep olabilecek durumlardan korumak için tüm sistem izole olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3.4 Sensör modülüne ait devre tasarımları (a) Güç katı, (b) Akım modülü, (c) Gerilim modülü

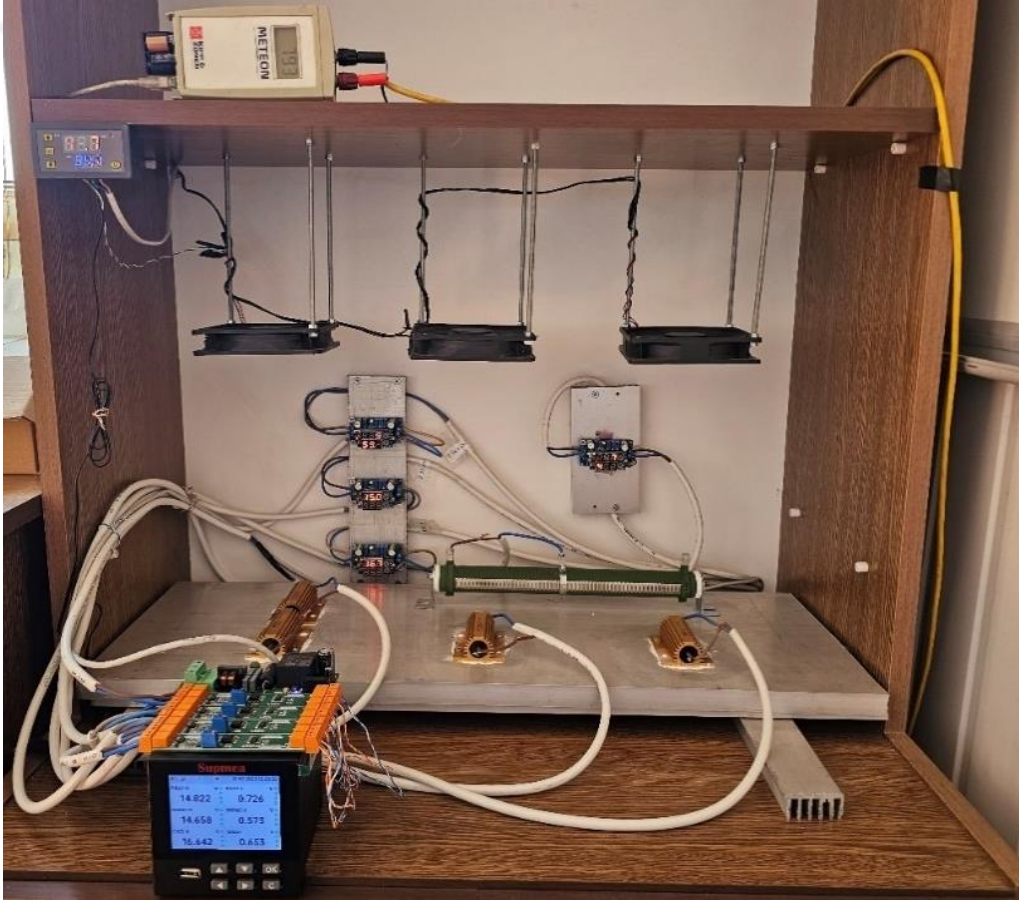


Şekil 3.5 Baskılı devre tasarımı görüntüsü



Şekil 3.6 Sensör kartının (a) 3B üstten görünüşü (b) 3B alttan görünüşü (c) Devre tasarımı üstten görünüşü (d) Devre tasarımı alttan görünüşü

Şekil 3.5'teki tasarımda Altium programında sensör kartının PCB yerleşimi ve çalışması gösterilmektedir. Şekil 3.6'da ise baskılı devre katının üç boyutlu üst ve alt görünüşü verilmiştir. Sistemin veri kaydı alabilmesi için gerekli alt yapı çalışmaları gerçekleştirildikten sonra veri kaydedici ile tasarlanan kartların entegrasyonu sağlanmıştır. Mono kristal, poli kristal ve CIGS yapılı üç adet panelden alınan enerji, panellerin maksimum güç noktasında çalışabilmesi için üç adet 6-36 Volt, 5Amper regülatör devresine bağlanmıştır. Regülatör çıkışından elde edilen enerji, sensör kartından geçtikten sonra omik yüklere bağlantısı yapılmıştır. Deneysel çalışmaya ait kurulan veri toplama sisteminin son hali Resim 3.4'te verilmiştir.



Resim 3.4 Deneysel çalışmaya ait tasarım

3.2 Veri Seti

Bu çalışmada, aynı bölgede ölçülen iki farklı veri seti kullanılmıştır. Bölüm 3.1'de açıklandığı gibi, Mycielski'nin tahmin modelinin Afyonkarahisar ilinde gerçek zamanlı veriler kullanılarak geliştirilen çok boyutlu zaman serilerine uygulanabilirliğini

değerlendirmek için bir veri toplama sistemi kurulmuştur. Ancak bu modelin uygulanabilir olması için Mycielski modelinin sıfır değerine duyarlılığı sorunu çözmek gerekmektedir. Bu amaçla, yenilikçi bir üç aşamalı tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin uygulanması ve izlenmesi için kurulan veri toplama sisteminde yeterli veri bulunmadığından, güneş ışıınım verileri 5. Bölge Meteoroloji Müdürlüğü'ne bağlı Afyonkarahisar Bölge İstasyonu'ndan temin edilmiştir. Güneş ışıınım verilerinin yapısal özellikleri, bir fotovolttaik modülün güç çıkışına benzediği için tercih edilmiştir. Bölüm 3.2.1'de, tez kapsamında geliştirilen Üç Aşamalı Tahmin modelinde kullanılan veri seti ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bölüm 3.2.2'de ise GURAM'da kurulan sistemden elde edilen ve çok boyutlu Mycielski modelinde kullanılan gerçek zamanlı verilere yer verilmiştir.

3.2.1 Üç Aşamalı Tahmin Modeli için Kullanılan Veri Seti

Türkiye, güneş enerjisine uygun önemli coğrafi bölgelere sahiptir. Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saattir. Yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1527 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Yıllık ortalama güneş ışıınım şiddeti 1557 kWh/m²'dir. Afyonkarahisar, günlük güneşlenme süresi 6-7 saat ve yıllık ortalama sıcaklık 11,3°C değerleri ile Türkiye ortalamasına oldukça yakındır (ETKB 2025, GNSSOLAR 2025). Bu koşullar, enerji yatırımcıları açısından bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin kapsamlı bir biçimde analiz edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan güneş ışıınım şiddeti veri seti Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü Afyonkarahisar Bölge İstasyonu'ndan temin edilmiştir. Veri seti 1 Ocak 2018 ile 31 Aralık 2022 tarihleri arasındaki beş yıllık dönemde saatlik frekansta ölçülen güneş ışıınımı verilerini içermektedir. 2018, 2019, 2020 ve 2021 yıllarına ait veriler modelin eğitimi için kullanılırken, 2022 yılına ait veriler ise modelin başarısını test etmek için kullanılmıştır.

Dünya'nın atmosferik bölgelerindeki güneş ışıınımının önceki değerini doğrulamak için dünya dışı radyasyon kullanılır. Bu radyasyon, yer atmosferine ulaşmadan önce herhangi bir soğurulma ya da saçılma olmaksızın doğrudan uzay boşluğunda hareket eder. Dünya dışı ışıınım, bir bölgenin yıl içindeki güneş ışıınım seviyelerini belirlemede önemli bir

parametre olarak kabul edilir. Bu değerin tespiti için yerin enlem ve boylam bilgisi, yılın günü ve saat gibi temel astronomik verilerden yararlanılır. Dünya'nın eliptik yörüngesi, yıl boyunca dünya ile güneş arasındaki mesafenin öngörülebilir şekilde değişmesine yol açar. Yatay bir düzlemde, herhangi bir W saat açısında, dünya dışı ışıyım Eşitlik 3.1'deki gibi tanımlanmıştır (Yang vd. 2023).

$$E_h = I_{sc} \left(1 + 0.33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) [\cos(\emptyset) \cos(\delta) \cos(W) + \sin(\emptyset) \sin(\delta)] \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'e göre I_{sc} güneş sabitidir. I_{sc} değeri 1367 W/m^2 olarak kabul edilir. n , yılın gününü temsil eder. 1 Ocak için n değeri 1, 31 Aralık için ise 365'tir. $\emptyset$ ise bölgenin enlem açısıdır. Afyonkarahisar için bu açı $\emptyset = 38,45^\circ$ olarak kabul edilir. Böylece herhangi bir saat açısı olan W , Eşitlik 3.2'deki gibi hesaplanır (Akarslan vd. 2014).

$$W = \left(\frac{360}{24} \right) (h - 12) \quad (3.2)$$

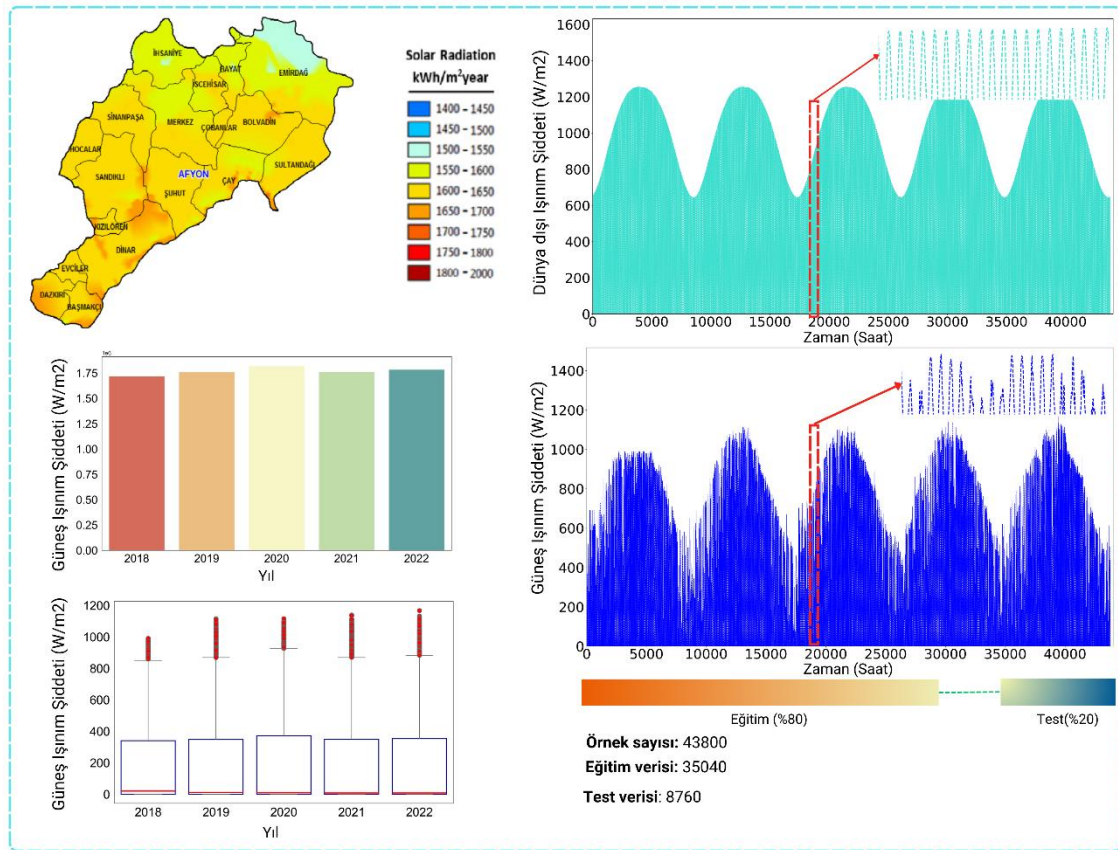
Eşitlik 3.2 'de h günün saatidir. Güneş deklinasyon açısı δ , Eşitlik 3.3'teki gibi hesaplanır.

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \left(\frac{284+n}{365} \right) \right) \quad (3.3)$$

Tezin bu aşamasında kullanılmak üzere Afyonkarahisar İli için 1 Ocak 2018 ile 31 Aralık 2022 tarihleri arasındaki beş yıllık ve saatlik dünya dışı radyasyon değerleri (3.1-3.3) denklemlerine göre hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan veri setlerinin istatistiksel grafikleri ve çalışma alanının konum bilgileri Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Şekil 3.7'ye göre dünya dışı ışıyım şiddeti ve güneş ışıyım şiddeti toplamda 43800 örnek içermektedir. Toplam veri setinin %80'i eğitim ve %20'si test için kullanılmıştır. Çubuk grafikler, verilerdeki uzun vadeli eğilimleri belirlememize olanak tanır. Şekil 3.7'deki çubuk grafik, 2018-2022 yılları arasında yıllık ortalama güneş radyasyonu yoğunluğunda önemli bir değişiklik olmadığını göstermektedir. En yüksek ortalama ise 2020 yılında gerçekleşmiştir. Medyan değerleri

Kutu grafiği, aykırı değerleri ve veri kümesi içindeki veri dağılımını gösterir. Güneş ışınlam verilerinin en yoğun olduğu alanı belirlemek için oluşturulmuştur. Grafiğe göre ortalama güneş ışınlam şiddeti 0-300 W/m² aralığında yoğunlaşmaktadır. Kutu grafiğindeki kırmızı noktalar aykırı verileri göstermektedir. Bu noktalar oldukça yüksek ışınlam değerlerini temsil etmekte olup, yaz aylarındaki merkezi saatlere denk gelmektedir. Aykırı verilerin yıllar içinde sayı ve düzenlilik açısından benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7 Meteoroloji 5. Bölge Müdürlüğü Afyonkarahisar Bölge İstasyonu'ndan temin edilmiş güneş ışınlam şiddeti ve hesaplanan dünya dışı ışınlam şiddeti verisi grafiksel gösterimi

Çalışmada kullanılan verilere ait istatistiksel değerler ise Çizelge 3.1’de verilmiştir. Afyonkarahisar için hesaplanan dünya dışı radyasyon şiddetinin en yüksek değeri olan 1255 W/m^2 , güneşin tepeye yaklaştığı öğle vaktinde ulaşmaktadır. En düşük değerin ise gece vakti 0 W/m^2 olması beklenmektedir. $413,46 \text{ W/m}^2$ ’lik standart sapma, günlük ve

mevsimsel dalgalanmaların oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Yer seviyesindeki güneş radyasyonu yoğunluğu değerleri, atmosfer koşulları, bulut örtüsü ve çevresel etkiler nedeniyle kayıplara maruz kalmaktadır. Eğitim verileri için ortalama değerler 201,53 W/m², test verileri için ise 203,99 W/m²'dir. Maksimum değerler ise sırasıyla 1139 W/m² ve 1167 W/m² olup, teorik maksimum değerın yaklaşık %7 altındadır.

Çizelge 3.1 Verilere ait istatistiksel değerler

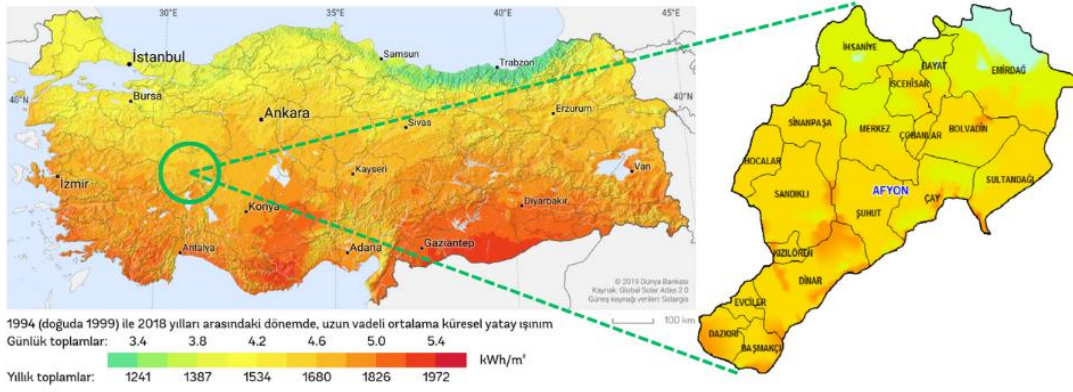
Dünyadışı Işınım Verisi		
Veri Seti	Metrikler	Değerler
Veri Seti	Veri sayısı	43800
	Ortalama (W/m ²)	331.64
	Max (W/m ²)	1255
	Min (W/m ²)	0
	Std (W/m ²)	413.46
Güneş Işınım Şiddeti Verisi		
Eğitim Verisi	Ortalama (W/m ²)	201.53
	Max (W/m ²)	1139
	Min (W/m ²)	0
	Std (W/m ²)	292.04
Test Verisi	Ortalama (W/m ²)	203.99
	Max (W/m ²)	1167
	Min (W/m ²)	0
	Std (W/m ²)	296.68

3.2.2 GURAM'dan Elde Edilen Veri Seti

Etkilenen bölgede yeni fotovoltaik sistemlerin planlanması ve yatırımcıların doğru bir şekilde hedeflenmesi için, gerçek zamanlı verilere dayalı olarak bir fotovoltaik sistemin performansının tahmin edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada kullanılan veriler gerçek zamanlı olarak toplanarak daha hassas sistem izleme imkânı sağlamaktadır. Bu aynı zamanda, hava istasyonlarındaki sensör arızalarından kaynaklanan veri boşluklarının önlenmesinde önemli bir avantaj sağlamakta ve tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Bu aşamada, Afyon Kocatepe Üniversitesi GURAM bünyesinde kurulan veri toplama sisteminden elde edilen veriler ayrıntılı olarak sunulacaktır.

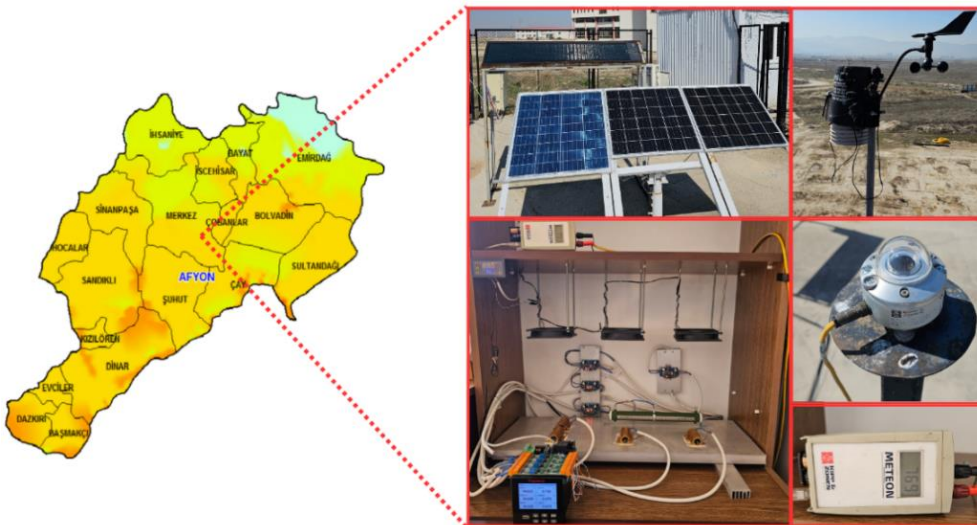
Bir PV sistemin verimli çalışması, çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler arasında meteorolojik koşullar, dünya dışı güneş ışıınımı ve sistemin elektriksel karakteristikleri önemli rol oynar. Bu nedenle, kısa vadeli PV güç tahmini için gerçek zamanlı veri

toplama sistemlerinin kurulması, o bölgedeki güneş enerjisi üretim verimliliğini artırmak ve tahmin doğruluğunu iyileştirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Tez çalışmasında PV sistemin kurulduğu Afyonkarahisar’a ait görsel Şekil 3.8 ‘de verilmiştir.



Şekil 3.8 Afyonkarahisar Türkiye haritası konumu ve güneş ışınım haritası

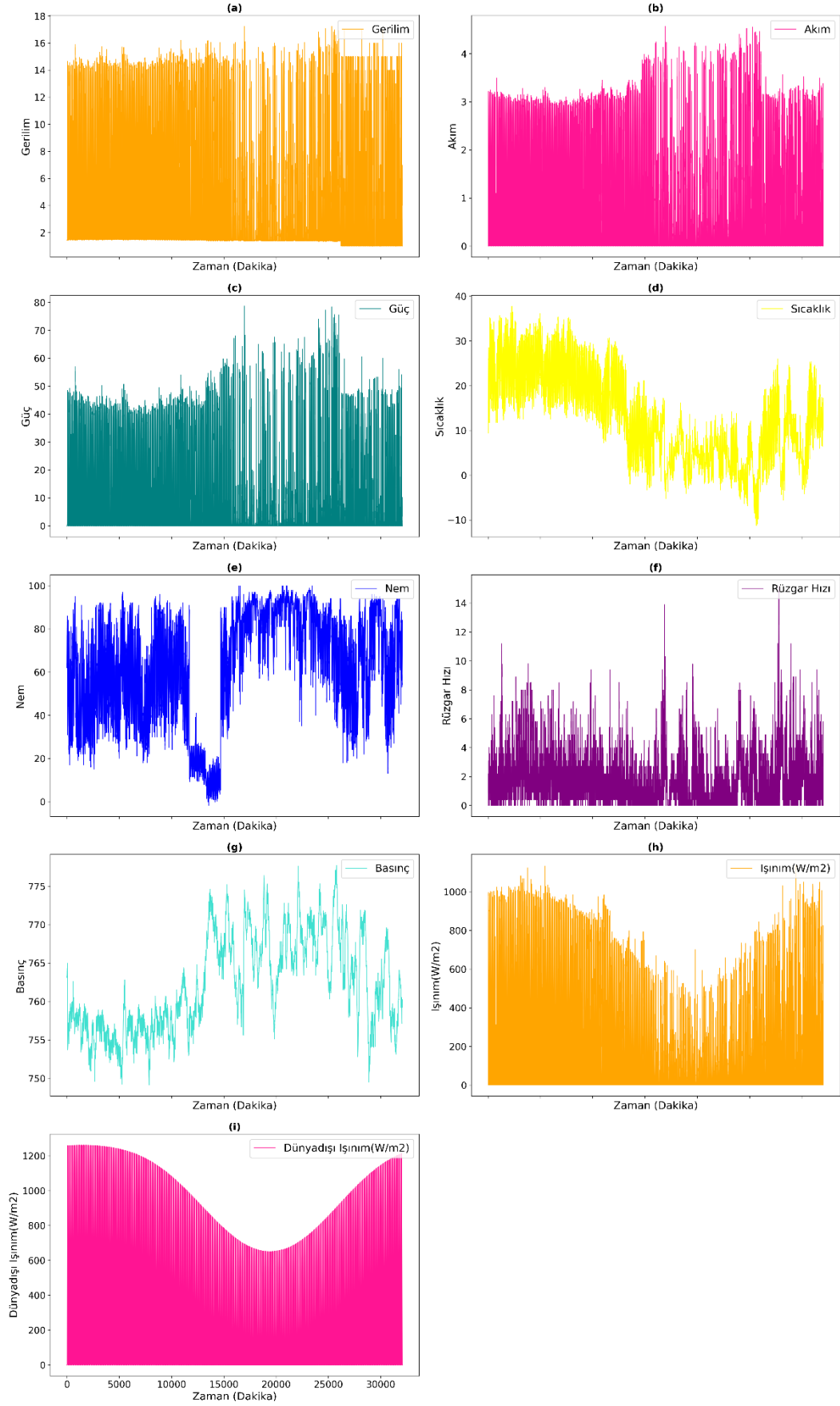
Güneş modüllerinin güç çıkışı hava koşullarına bağlı olarak değiştiğinden, şebeke kararlılığı, depolama optimizasyonu ve ekonomik verimlilik açısından çok kısa vadeli tahminler büyük önem taşımaktadır (Zhou vd. 2024, Song vd. 2025). Bu nedenle, veri toplama sistemi kısa vadeli tahminlerin doğruluğunu artırmak amacıyla 15 dakikalık ölçümlerle tasarlanmıştır. Tez çalışması kapsamında GURAM bünyesinde kurulan veri toplama sistemi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Tez çalışması kapsamında Afyonkarahisar ili GURAM’da kurulan veri toplama sistemi

Tezin bu aşamasında Mycielski modelinin çok boyutlu zaman serilerinde uygulanabilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, Afyonkarahisar ili için 1 Haziran 2024 ile 31 Nisan 2025 tarihleri arasında, 15 dakikalık frekansta dünya dışı ışıyım değerleri, Eşitlik (3.1-3.3)'teki gibi hesaplanmıştır. Çalışmada 75 W'lık monokristal silisyum panelden elde edilen büyüklükler dikkate alınmıştır. 75W'lık panelden, elektriksel büyüklükler (akım ve gerilim) ile meteorolojik veriler (sıcaklık, nem, rüzgâr hızı, basınç, güneş ışıyım şiddeti) toplanmıştır. Veri seti toplamda 32064 satır, 9 farklı sütundan oluşmaktadır. Elde edilen verilerin zamana bağlı değişimleri, Şekil 3.10 (a-i) 'de grafiksel olarak sunulmuştur.

Şekil 3.10 (a)'da gerilim değerleri genellikle 14–16 V aralığında ölçülmüştür. Bu değerlerde ara sıra ani düşüşler yaşanmaktadır. Akım değerleri ise 3–4 A aralığında yoğunlaşmaktadır. Akım değerlerinde de kısa süreli dalgalanmalar görülmüştür. Bu durum, sistem üzerindeki gölgeleme etkilerinden kaynaklanabilmektedir. Şekil 3.10 (c)'deki güç grafiği, üretim değerlerinin 20–80 W arasında değiştiğini ve dalgalı bir yapı sergilediğini göstermektedir. Şekil 3.10 (d)'de ise sıcaklık değerlerinin -10 °C ile 35 °C arasında değişmektedir. Sıcaklıkta özellikle belirli bölgelerde ani artışlar olduğunu görülmektedir. Nem grafiği (e) ise %20 ile %100 arasında değişmekte olup, belirli dönemlerde önemli düşüşler yaşanmaktadır. Rüzgâr hızı (f), 0–14 m/s arasında değişmekte olup, ani kısa süreli artışlar görülmektedir. Şekil 3.10 (g)'deki basınç verileri ise 750–775 hPa arasında değişmekte olup, genel olarak sabit bir değişim göstermektedir. Şekil (h)'deki güneş ışıyım şiddeti verileri, gün boyunca 0 ile 1000 W/m² arasında değişmekte ve gün doğumu ile gün batımı arasında önemli dalgalanmalar göstermektedir. Şekil (i)'deki dünya dışı ışıyım şiddeti verileri ise maksimum güneş enerjisini temsil etmekte ve güneşin mevsimsel geometrisinden kaynaklanan periyodik dalgalanmalar göstermektedir.



Şekil 3.10 Tez çalışması kapsamında toplanan gerçek zamanlı verilere ait grafikler

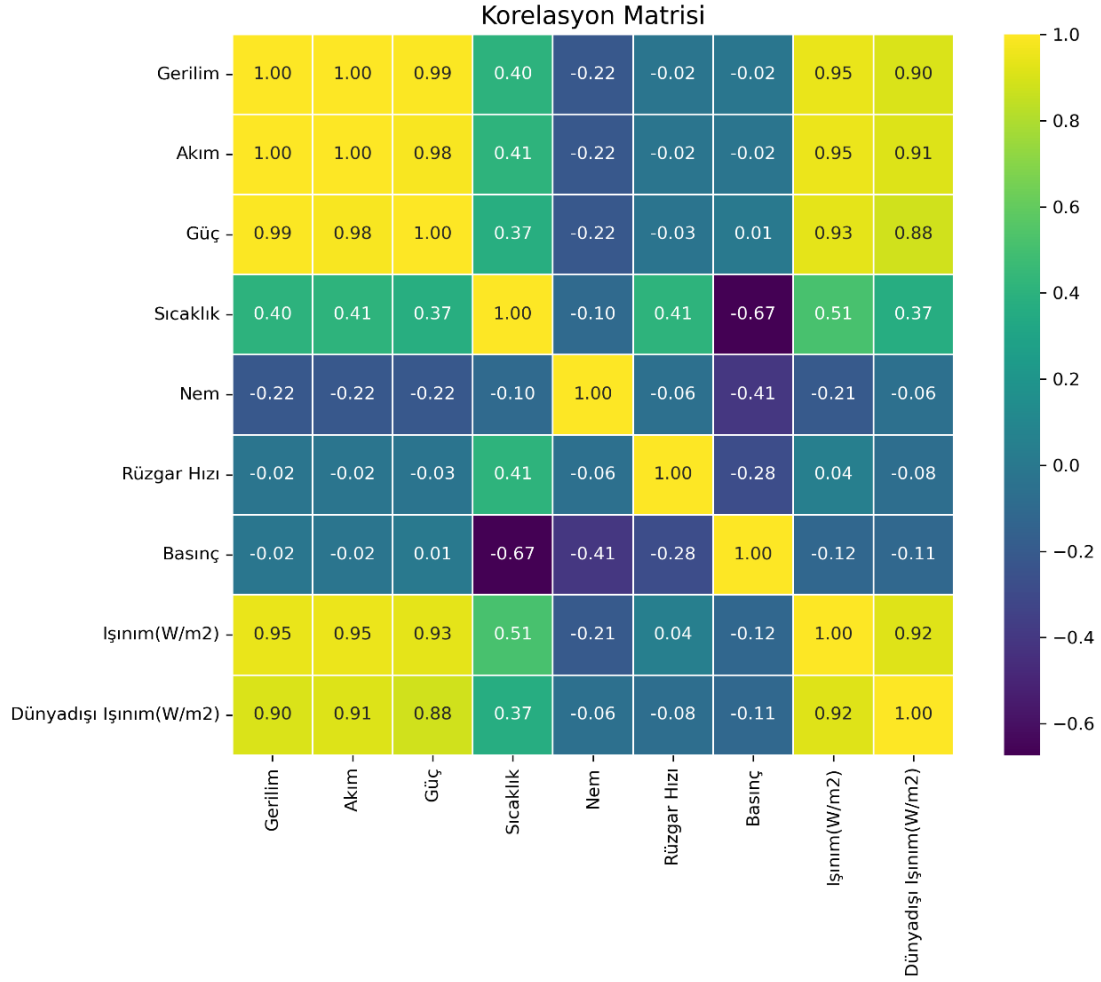
3.3 Veri Ön İşleme

Ön işleme tahmin modellerinin başarısı için önemli bir adımdır. Ön işleme yapılan veriler daha temiz girişler oluşturduğu için tahmin modellerinin daha kolay kullanılmasını sağlar. Bu sayede, modellerin doğruluğu ve sonuçları olumlu yönde etkilenir. Çalışmada kullanılan verilerin bazıları dış etmenlerden dolayı ölçülememiştir. Eksik güneş ışınlam şiddeti verileri ve PV güç çıkışı, doğrusal interpolasyon yöntemi ile tamamlanmıştır. Doğrusal interpolasyon, eksik değerin komşu iki veri noktası arasındaki doğrusal eğilimle tahmin edilmesidir. Matematiksel olarak Eşitlik 3.4'teki gibi hesaplanır.

$$y = y_1 + (x - x_1) \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'te x_1 ve x_2 eksik değerlerin bulunduğu aralıktaki komşu noktaların koordinatlarıdır. y_1 ve y_2 bu noktaların y değeridir. x eksik veri noktasının x koordinatıdır, y ise interpolasyonla bulunan tahmini değerdir.

Özellik seçimi, model doğruluğunu artırmak ve öğrenme sürecini optimize etmek için önemli bir adımdır. Doğru özellik seçimi sayesinde, alakasız bilgiler elenebilir. Böylece hesaplama yükü azaltılırken, model performansını etkileyen ilgili özellikler korunur. Bir PV sistemin güç çıkışını tahmin etmek için genellikle sıcaklık, güneş ışınlam şiddeti, nem ve basınç gibi zamansal ve meteorolojik veriler kullanılır (Kaysal vd. 2025). Aynı zamanda bu parametreler çeşitli modeller için girdi parametreleri olarak da görev yaparlar. Bir fotovoltaiik sistemin çıkış gücünü etkileyen faktörlerin kesin olarak anlaşılması esastır. Bu faktörler arasındaki ilişkiler de aynı derecede önemlidir. Bu bilgi, Mycielski modelinde çok boyutluluğu oluşturmak için kullanılacak verilerin seçilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, model için optimum özellikleri belirlemek üzere Pearson korelasyon yöntemi kullanılmıştır (Saadati vd. 2025). Seçilen özellikler, ışınlam şiddeti ve sıcaklık gibi panel çıkışını etkileyen değişkenlerle yüksek düzeyde ilişkilidir. Bu adım, yüksek başarı oranına sahip ve doğru tahminler yapabilen bir model oluşturma sürecinde önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Şekil 3.11, Afyonkarahisar ili için kullanılan verilerin korelasyon matrisini göstermektedir.



Şekil 3.11 Afyonkarahisar ili için kullanılan verilerin korelasyon matrisi

Şekil 3.11'e göre, güç çıkışını etkileyen büyüklükler, Mycielski algoritmasının çok boyutlu zaman serileri üzerinde uygulanması için uygun bir temel sağlamaktadır. Güç ile ışıınım şiddeti, gerilim ve akım arasında yüksek dereceli pozitif ilişkiler gözlemlenmiştir. Bu güçlü ilişkiler, bu değişkenlerin güç tahmini ve modellemede kritik birer giriş parametresi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, güç ile sıcaklık arasında nispeten düşük bir pozitif ilişki gözlemlenmiştir. Bu, sıcaklığın güce etkisinin daha sınırlı olduğunu, ancak göz ardı edilmemesi gerektiğini işaret etmektedir. Nem, rüzgâr hızı ve basınç ile güç arasındaki zayıf veya negatif ilişkiler, bu parametrelerin modelde daha az belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Mycielski algoritması, zaman serilerindeki çok boyutluluğu analiz etmek ve önemli özellikler arasında ilişki kurmak için kullanıldığında, bu güçlü korelasyon gösteren parametreler (ışıınım, sıcaklık) anlamlı bir veri kümesi oluşturabilir. Dolayısıyla, güç çıkışını etkileyen bu büyüklüklerin doğru bir şekilde

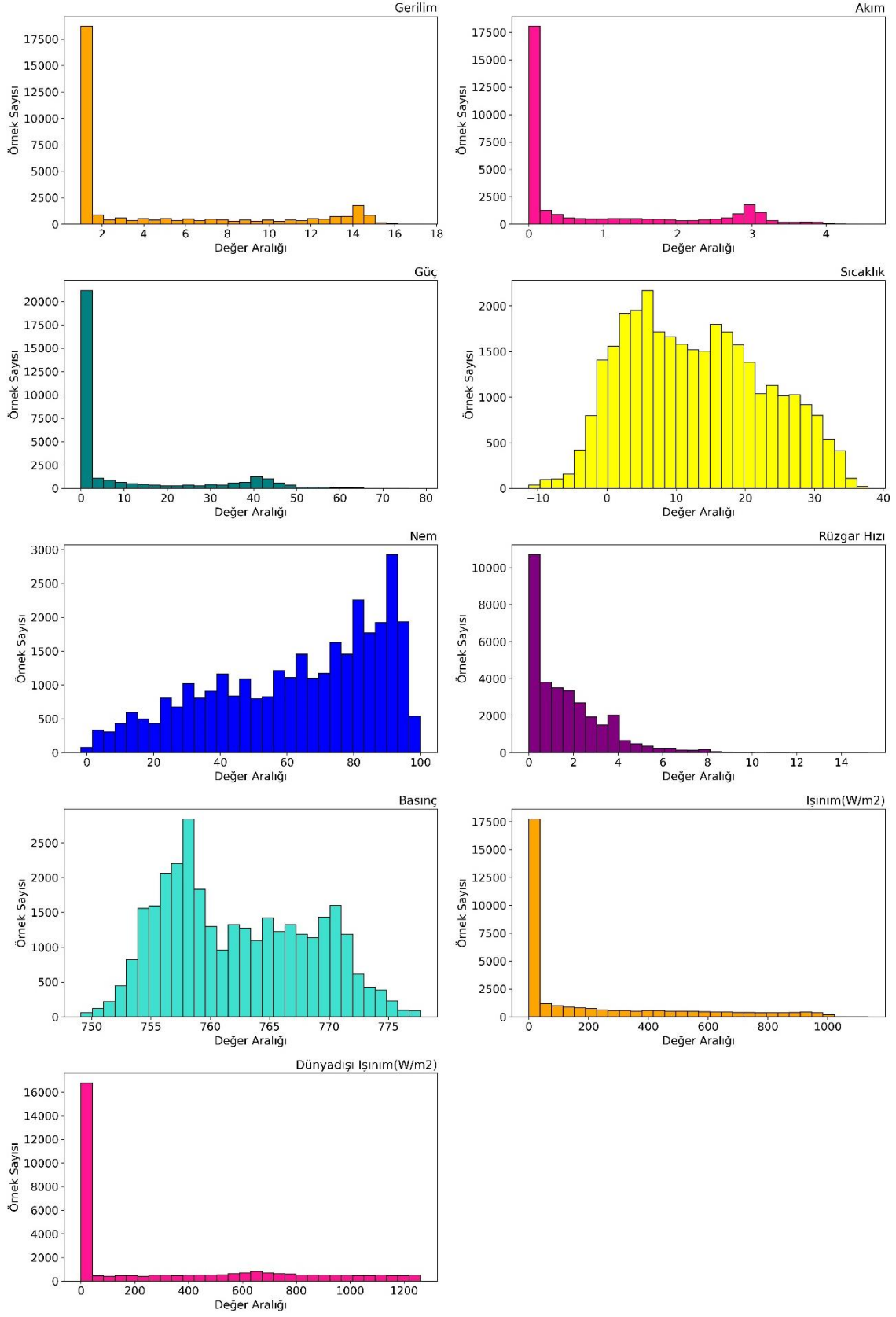
seçilmesi, algoritmanın performansını artırabilir ve daha isabetli tahmin modelleri geliştirilmesine olanak tanıyabilir.

Korelasyon matrisi grafiğine göre çok boyutlu Mycielski tahmin modeli için öncelikle “ışınım-güç” ve sonrasında “sıcaklık-güç” olmak üzere iki boyutlu veri yapıları ile geçmişe dönük en uzun benzer örüntü yapısı bulunup güç tahmini yapılmasına karar verilmiştir. Dünya dışı ışınım verileri de yine Mycielski algoritmasının sıfır ve gün doğumu/batımı sürecindeki zaman dilimleri için kullanılmıştır.

Veri ölçekleme Mycielski ve yapay zekâ algoritmalarının daha doğru çalışması için önemli bir adımdır. Mycielski yaklaşımı tam sayı değerleri gerektirdiğinden algoritma için kullanılacak veriler durumlara dönüştürülür. Verilerin ölçekleme aralıklarına karar verebilmek için Şekil 3.12’deki gibi histogram grafikleri elde edilmiştir. Buna göre ışınım şiddeti verileri 0-1132 W/m² aralığında veri içerdiği için toplamda 120 duruma dönüştürülmüştür. Veri içerisindeki sıfır ve gün doğumu/gün batımı geçişleri için kullanılan dünya dışı ışınım verilerinde ise 0-1261,2 W/m² aralığında veri bulunduğundan benzer şekilde 120 duruma dönüştürülmüştür. Sıcaklık verileri 11,3 ile 37,8 °C aralığında değişim göstermektedir. Bu veriler ise en yakın tam sayı değerlerine yuvarlanmıştır. Güç verileri de 0-73,86 W arasında değişim göstermiştir. Yine sıcaklık verilerinde olduğu gibi en yakın değerine yuvarlanarak Mycielski algoritmasının kullanımına hazır hale getirilmiştir.

3.4 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Üç Aşamalı Tahmin Modeli

Bu bölümde, Mycielski algoritmasının güneş enerjisi verilerinde yaşadığı ardışık “sıfır” problemini çözmek için geliştirilen üç aşamalı tahmin modelinin temel yapısı ve çalışma prensipleri açıklanmaktadır. Geliştirilen tahmin modelinde farklı zaman dilimlerine özgü üç alt tahmin yöntemi kullanılmıştır. İlk alt tahmin yöntemi, sıfır değerlerinin doğal bir süreç olarak kabul edilmesini sağlamak için dünya dışı radyasyona dayalı bir yaklaşımdır. İkinci alt tahmin yöntemi, gün doğumu ve gün batımı sırasında meydana gelen hızlı ışınım değişimlerini hassas bir şekilde yakalamayı amaçlamaktadır.



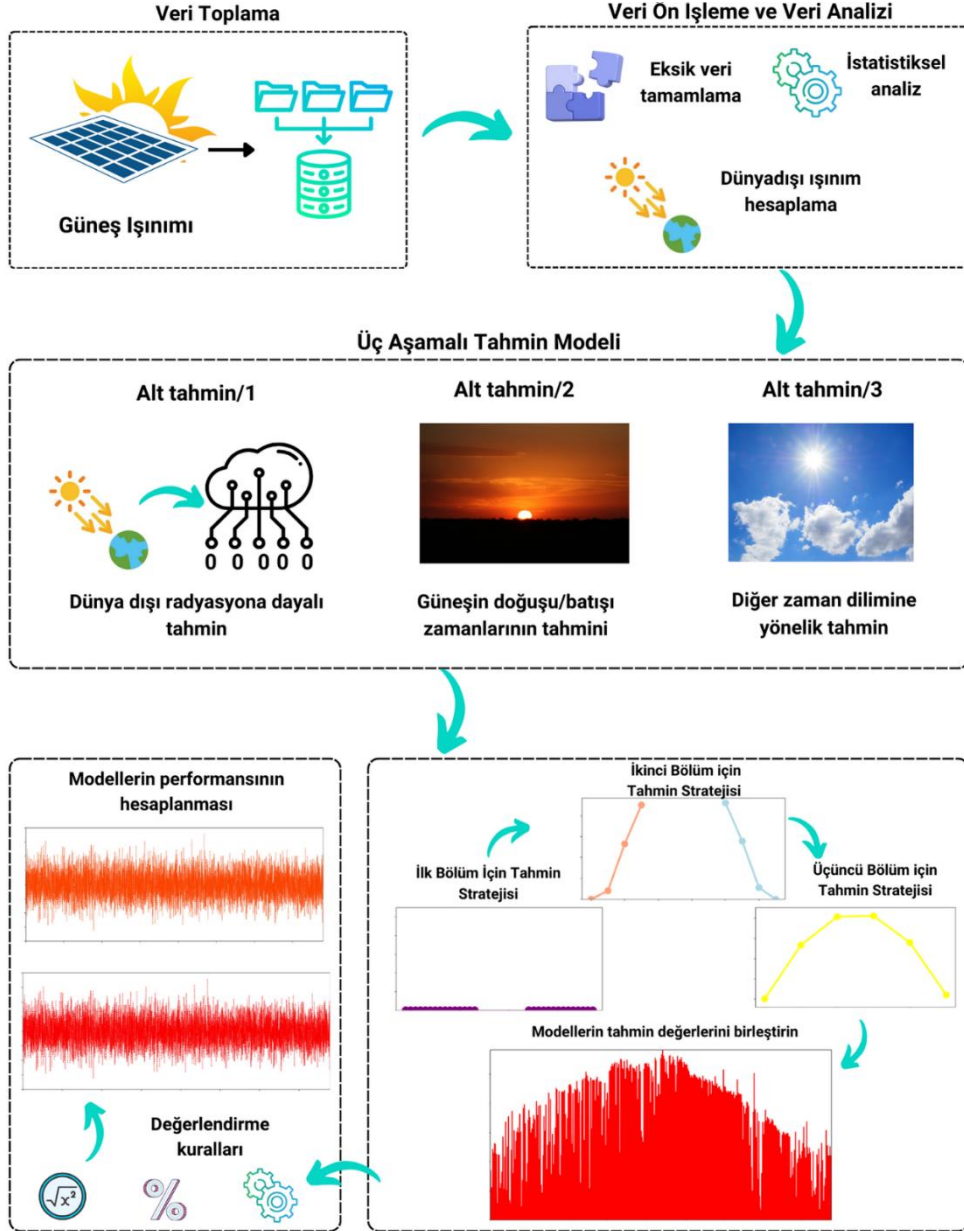
Şekil 3.12 Tez çalışmasında kullanılan verilere ait histogram grafikleri

Üçüncü alt tahmin yöntemi, Mycielski yaklaşımına dayalı "tarihin en uzun benzer analog zaman serisinin aranması" tahmin algoritmasıdır. Bu alt tahmin yöntemleri, genel model yapısı içinde entegre bir şekilde çalışarak yüksek performanslı tahminler sunar. Bu üç aşamalı tahmin modelinin temel amacı, Mycielski algoritmasının sıfır duyarlılığı sorununu aşarak, literatürde sıkça bahsedilen ardışık sıfır değerleri içeren güneş ışıınımı ve PV güç verileri gibi veri setlerinde, sıfırların çıkarılmasına ihtiyaç duymadan başarılı tahmin sonuçları elde etmektir. Tez kapsamında geliştirilen üç aşamalı tahmin modeli için genel konfigürasyon Şekil 3.13'teki gibi verilmiştir.

Tez çalışmasının literatüre katkı sağladığı bir diğer önemli adım Mycielski algoritmasının ilk kez çok boyutlu zaman serileri üzerinde uygulanmasıdır. Bu aşamada geliştirilen üç aşamalı tahmin yöntemi ise Çok Boyutlu Mycielski Algoritmasının uygulanabilmesi için önemli bir temel oluşturmuştur. Tez çalışmasında geliştirilen üç aşamalı tahmin modelinin her model için tahmin stratejileri ayrıntılı olarak alt başlıklarda açıklanmaktadır.

3.4.1 Birinci Bölüm için Tahmin Stratejisi

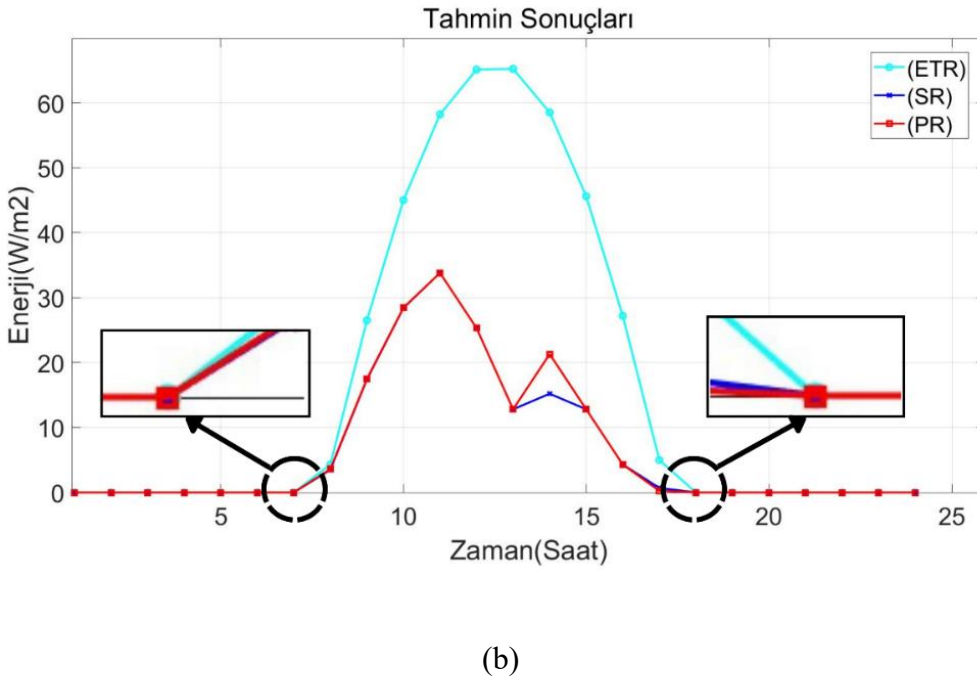
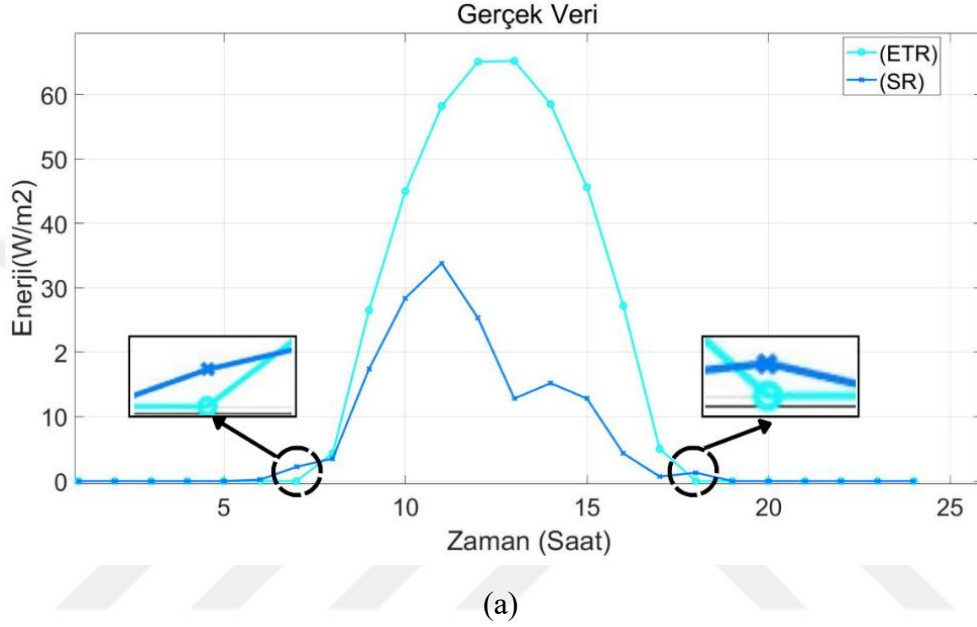
Önerilen modelin ilk alt tahmin aşaması, gece saatlerinde doğal olarak gözlemlenen ardışık sıfır değerlerini ele almak üzere tasarlanmıştır. Gece saatlerindeki sıfır değerlerin doğru bir şekilde tespit edilmesi, özellikle güneş ışıınının panel üzerine ne kadar süre boyunca yansıdığı bilgisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu bilgi, Mycielski algoritmasının benzerlik arama işlemleri sırasında referans alacağı arama değerlerini doğrudan etkilemektedir. Bu yöntem, düşük veya sıfır ışıınının beklendiği dönemler için bir temel sağlamakta ve bu değerlerin modelin yapısı içinde öğrenilmesine imkân tanımaktadır. Gündüz ve gece arasındaki doğal geçişleri modelleyen bu adım, algoritmanın veri setinden sıfır değerlerini çıkarmadan çalışmasını sağlıyor ve tahmin performansını artırıyor.



Şekil 3.13 Üç aşamalı tahmin modeli için genel konfigürasyon

Bu aşamada, dünya dışı ışıınım (ETR) değeri dikkate alınmıştır. Geceleyin, dünya dışı radyasyon (ETR) sıfır olduğunda, güneş ışıınımı (SR) da sıfır olacaktır. Modelin bu aşamasında, bu fizik kuralları temel alınarak bir kural oluşturulmuştur. Bu kurala göre, ETR'nin sıfır olduğu durumlarda SR doğrudan sıfır olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde, tahmin değışkeni (PR)'nin de o andaki değeri sıfır olarak işlemiştir. Bu yaklaşım, tahmin sürecini basitleştirir ve fiziksel gerçeklikle tutarlı bir tahmin çerçevesi sunar. Bu sayede model, gereksiz hesaplamalardan kaçınır ve gece verilerini işlerken yüksek doğruluk elde eder.

Bir günlük veri için ETR ve SR değerleri Şekil 3.14(a)'da sunulmaktadır. Şekil 3.14 (a)'ya göre, günün 7. ve 18. saatlerinde dünya dışı ışıınım değeri sıfır olmasına rağmen, güneş ışıınımı küçük de olsa pozitif bir değeri göstermiştir. Bu durumda algoritma, dünya dışı ışıınım (ETR) değeri sıfır olduğunda, güneş ışıınımı (SR) ve tahmin edilen radyasyon (PR) değerlerini de sıfır olarak işlemiştir. Elde edilen sonuç Şekil 3.14 (b)'de verilmiştir.



Şekil 3.14(a) Bir günlük ETR ve SR verileri, (b) SR ve PR'nin, ETR'ye göre tahmin sonucu

3.4.2 İkinci Bölüm için Tahmin Stratejisi

Modelin ikinci alt aşaması, gün doğumu ve gün batımı sırasında meydana gelen hızlı değişimleri modellemeye odaklanmaktadır. Bu dönemler, güneş ışınlam seviyelerinin hızla değiştiği ancak sifıra ulaşmadığı kritik geçiş dönemlerini temsil eder. Güneş sabahleyin hızla doğarken, akşamları gün batımıyla birlikte ışınlam da aynı oranda azalır. Sensör hassasiyeti veya atmosferik etkiler nedeniyle, bu geçiş, güneş ışınlam şiddeti ve PV çıkış gücü verilerinde doğru bir şekilde yakalanamayabilir. Sabah ve akşam geçişlerindeki dünya dışı radyasyonun artış ve azalış oranlarının güneş radyasyonu veya PV çıkış verilerine eklenmesi, bu geçişlerin daha doğru ve doğal bir temsilini sağlar. Bu adımın temel amacı, bu geçişleri doğru bir şekilde tahmin ederek modelin genel doğruluğunu artırmaktır. Algoritmada dünya dışı ışınlamındaki artış ve azalış oranları sıfırdan sonraki ilk üç ve sıfırdan önceki son üç değeri için Eşitlik (3.5-3.8)'deki gibi hesaplanır.

$$artış_{oranı} = \frac{((ETR_t) - (ETR_{t-1}))}{ETR_t} \quad (3.5)$$

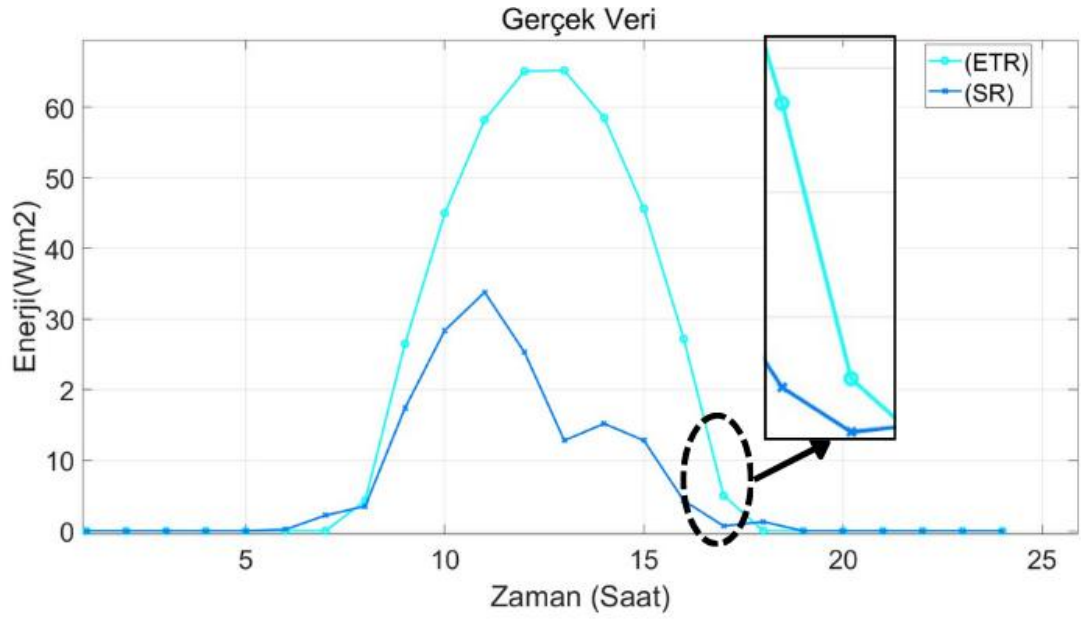
$$SR_t = SR_{t-1} + (SR_{t-1})(artış_{oranı}) \quad (3.6)$$

$$azalış_{oranı} = \frac{((ETR_i) - (ETR_{i-1}))}{ETR_i} \quad (3.7)$$

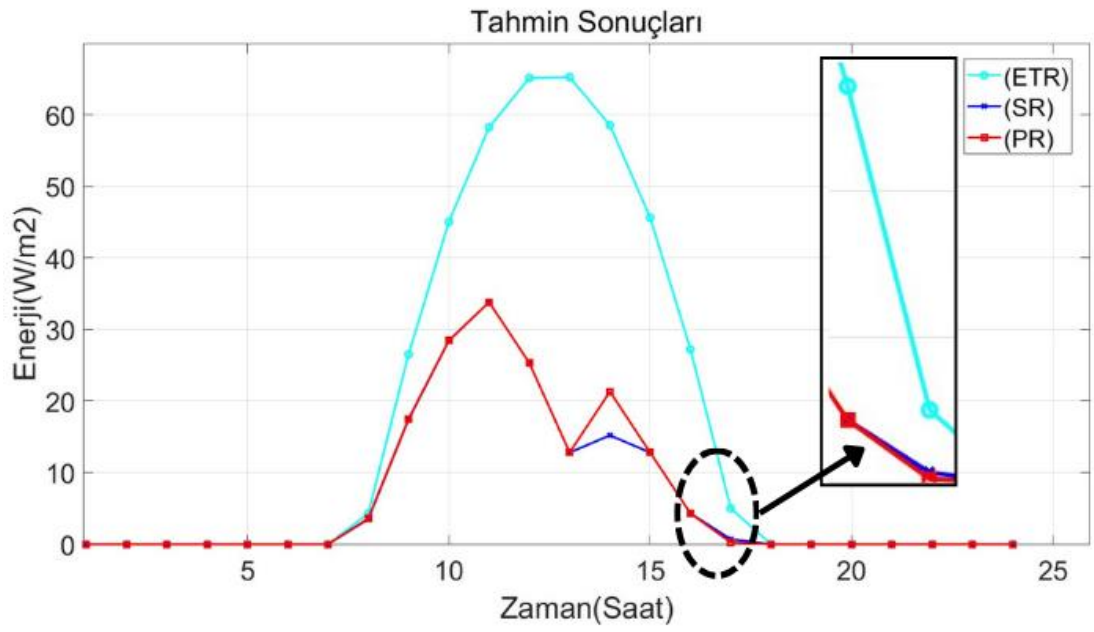
$$SR_i = SR_{i-1} + (SR_{i-1})(azalış_{oranı}) \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.5-3.8) için ETR dünya dışı ışınlam, SR güneş ışınlam şiddetidir.

Günün geçiş saatlerini gösteren grafik Şekil 3.15 (a)'da ve tahmin sonu elde edilen grafik Şekil 3.15 (b)'de verilmiştir. Şekil 3.16'da verilen akış şeması ve Eşitlik (3.5-3.8)'e göre hesaplanan, sabah ve akşam geçişlerine ait artış ve azalış oranları tahmin sonucuna eklenmiştir.

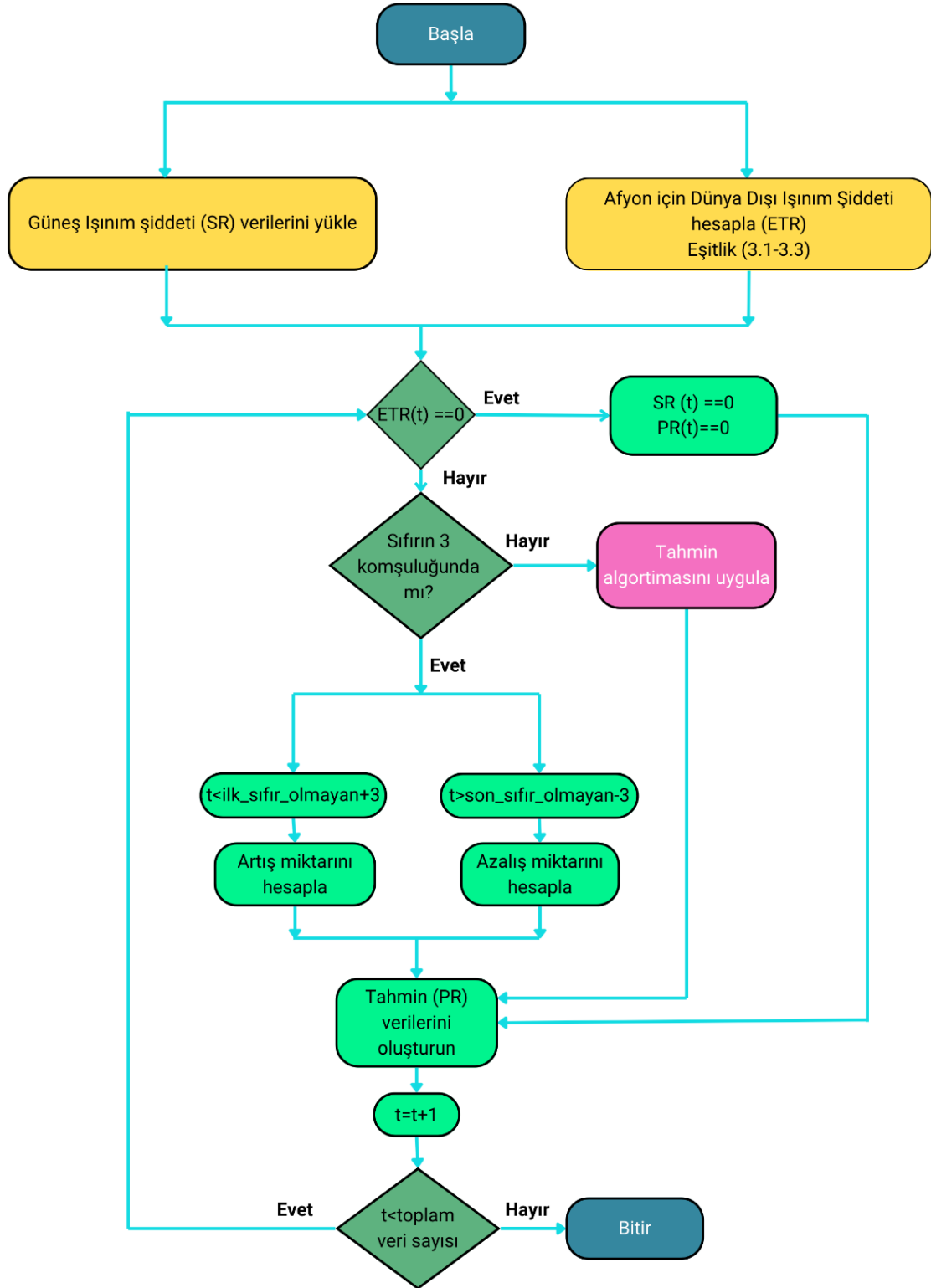


(a)



(b)

Şekil 3.15(a) Bir günlük ETR ve SR verisi günün geçiş anı, (b) SR ve PR'nin, ETR'ye göre tahmin sonucu

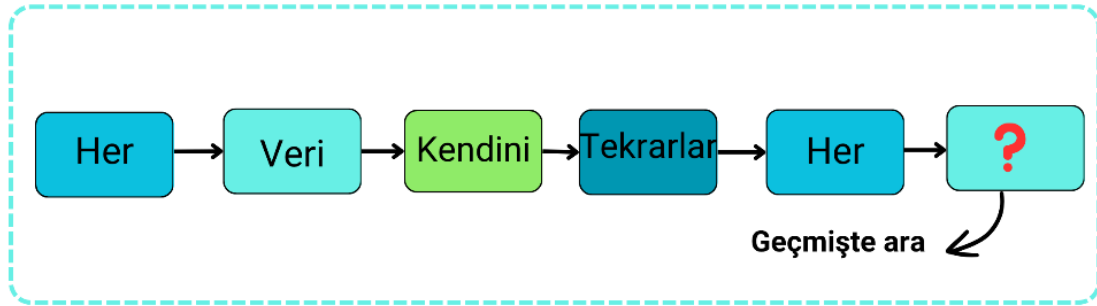


Şekil 3.16 İkinci Alt Tahmin Stratejisi Algoritması

3.4.3 Üçüncü Bölüm için Tahmin Stratejisi

Desen tanıma tahmin modellerinden biri olan Mycielski algoritması, ayırık zaman serisi

verilerine dayanarak tahminler yapan deterministik bir algoritmadır. Temel amacı, mevcut veri serisi ile geçmiş veri serisi arasında en uzun eşleşen alt diziyi bulmaktır. Bu yöntem, sinyal içinde benzer alt yapıların tespit edilmesiyle, bu yapıların sonraki davranışlarının da benzer olacağı varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayıma dayanarak, algoritma geçmiş veri dizileri içinde istenen alt diziyi bulursa, alt dizinin bir sonraki ögesini bir tahmin değeri olarak belirler. Algoritma, veri kümesinde aramasına en kısa geçmiş verilerden başlayarak başlar. Tahmin edilen değerler mevcutsa, arama veri kümesini genişleterek devam eder. Algoritma, geçmiş verilerde bulunmayan bir veri dizisi bulunana kadar veya sinyalin daha uzun bir dizisi elde edilene kadar devam eder. Bu şekilde elde edilen son dizinin öncesindeki sinyal elemanı, bir sonraki değer için en "olası" tahmindir. Geçmişteki veriler taranarak, aranan son değer birden fazla yerde karşılığı olabilir. Bu durumda, veriye bir değer daha ekleyerek tekrar taranır ve en uzun karşılıklı dizi tespit edilir. Bu diziden sonra gelen eleman, tahmin verisi olarak kullanılır. Algoritmanın genel olarak ifadesi Şekil 3.17'deki gibi gösterilmiştir (Hocaoğlu ve Serttaş 2017).



Şekil 3.17 Mycielski algoritmasının genel ifadesi

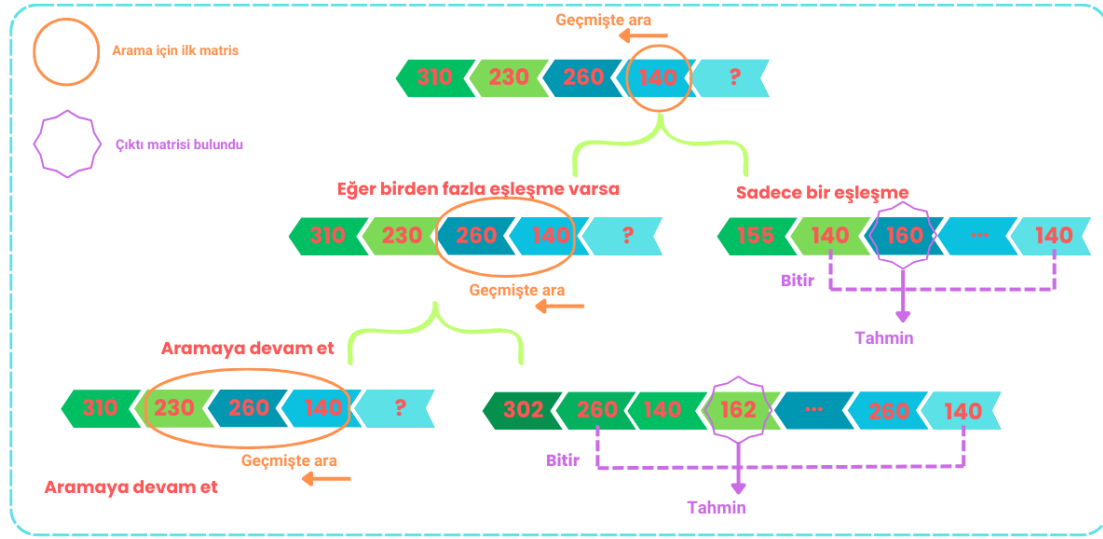
Teknik olarak algoritma, geçmişteki en uzun tekrar dizisini bulan bir arama algoritmasıdır. Arama küçük bir desenle başlar ve geçmişte eşleşmeler bulundukça sürekli olarak genişler. En uzun tekrar dizisi bulunduğunda, bir sonraki veri noktası tahmin edilen değer olarak saklanır. Bu algoritmanın matematiksel ifadesi Eşitlik 3.9'da verilmiştir (Serttaş ve Hocaoğlu 2025).

$$\hat{x}[n + 1] = f_{n+1}(x[1], \dots, x[n]) \quad (3.9)$$

$f(.)$ fonksiyonu, sondaki en kısa veri parçasından başlayarak, birer birer sola kayarak veri içindeki benzerlikleri bulmaya çalışır. Sonrasında en kısa veri parçasını bir artırıp yinelemeli olarak en uzun benzer diziyi bulana kadar tekrar eder. Arama $x[n]$ ile başlar ve sonra veri uzunluğu $(x[n-1], x[n]), (x[n-2], x[n-1], x[n])$ şeklinde sol tarafa doğru tek tek artırılır. Böylece arama bitiş noktasından başlangıç noktasına kadar gerçekleştirilir. Algoritma çalışırken birden fazla yerde eşleşme bulabilir. "Eşleşme yok" noktasında ise, daha geniş bir parçaya geçilmiş ve dizide bulunmamış demektir. Bu durumda, son eşleşen desenin bir sonraki örneği için tahmin yapılır. Önerilen algoritma, her tahmin adımında veriyi tekrar taradığı için yüksek hesaplama gerektirir. İşlem genel olarak Eşitlik 3.10'daki gibi ifade edilir (Serttaş ve Hocaoglu 2025).

$$m = \underset{L}{\operatorname{argmax}} \left\{ \begin{array}{l} x[k] = x[n], x[k-1] = x[n-1] \\ \dots, x[k-L+1] = x[n-L+1] \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

Bu bölümde, güneş enerjisi tahmini için bir çözüm geliştirmek amacıyla desen tabanlı bir Mycielski algoritması kullanılmıştır. Güneş enerjisi verilerinin doğası gereği tekrarlanabilir olması, bu algoritmaların bir avantajıdır. Bu tür çalışmalara örnek olarak Hocaoglu ve ark. gösterilebilir (Hocaoglu ve Serttaş 2017). Belirtilen çalışmada Mycielski algoritması ve onun hibrit versiyonları güneş ışıınımı verileri üzerinde uygulanmıştır. Güneş ışıınımı verileri gece saatlerinden dolayı birçok ardışık sıfır değeri içermektedir. Mycielski algoritması, sıfır değerlerine oldukça duyarlı olup, sıfır verileri tahmin modelini olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle, çalışmada sıfır güneş ışıınımı değerleri veri setinden çıkarılmış ve algoritmanın başarısı bu şekilde kanıtlanmıştır. Ancak gece güneş ışıınımı verilerinde gözlenen sıfır değerleri doğal bir olgudur ve zaman serisinin sürekliliğinin bir parçasıdır. Bu çalışmanın temel amacı, Mycielski algoritmasının sıfır değerlerini kaldırmadan ve zaman serisi veri yapısını bozmadan başarılı sonuçlar üretmesini sağlamaktır. Tez çalışmasında geliştirilen Mycielski algoritması ile zaman serilerinin bütünlüğü korunarak, algoritmanın performansı iyileştirilmiştir. Mycielski algoritmasına ait süreç akış şeması Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 Mycielski süreç akış şeması

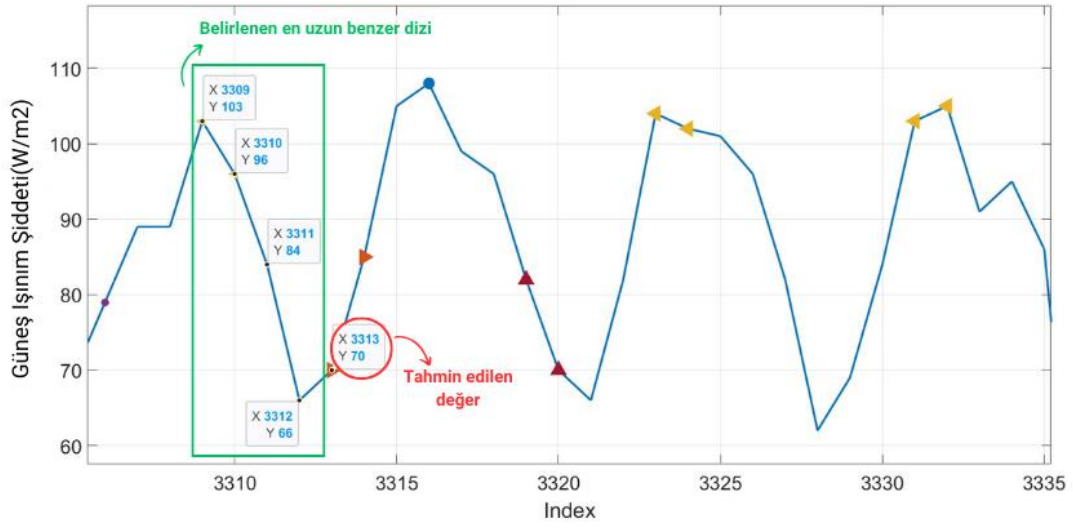
Çalışmada, güneş enerjisi verilerindeki sıfırların ve gün doğumu ve gün batımı saatlerindeki ani değişikliklerin etkilerini azaltmak için ilk tahmin ve ikinci tahmin stratejileri kullanılmıştır. Diğer zaman dilimlerini tahmin etmek için Mycielski ve hibrit versiyonları kullanılmıştır. Gerçek güneş ışıınımı verileri üzerinde yapılan analizde, Şekil 3.19'da bir arama dizisi örneği gösterilmiştir. Bu analizde, dizi uzunluğu 4 olarak belirlenmiştir. 3309 ve 3312 indeks aralığında aynı uzunluğa sahip tek bir benzer dizinin bulunduğu belirlenmiştir. Bu durumda, bir sonraki en uzun benzer dizi olan "70" tahmini değer olarak kabul edilmiştir.

Aranan en uzun benzer dizi	Index [9729 9728 9727 9726]	Değer [66 84 96 103]
En uzun benzer dizi bulundu	Index [3309 3310 3311 3312]	Değer [103 96 84 66]
	[3313]	[70]

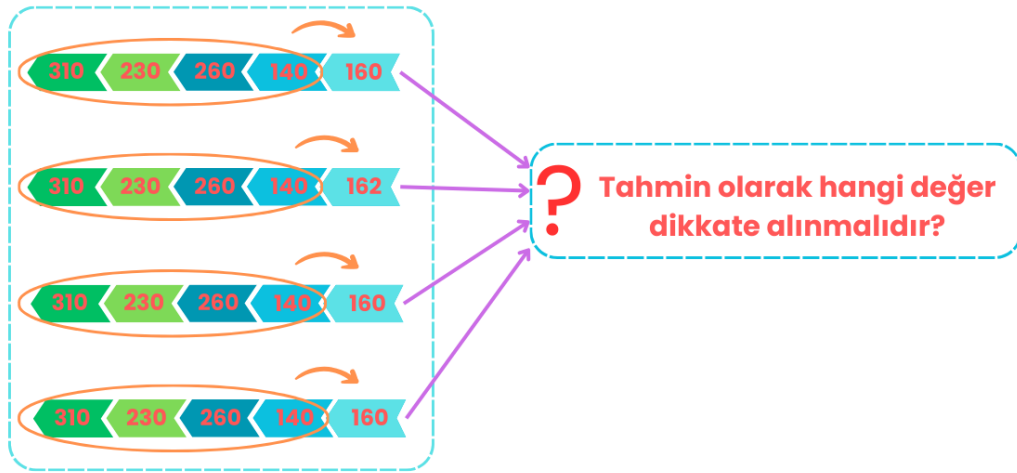
Tahmin Değeri

Şekil 3.19 Mycielski modeli gerçek güneş ışıınım şiddeti verilerine uygulandığında arama dizisi, bulunan dizi ve tahmin edilen değer

Ayrıca, uzunluğu 4 olan benzer dizinin bulunduğu indeksler ve bu dizilere dayalı olarak yapılan tahminlerin değerlerini içeren grafik Şekil 3.20'teki gibi sunulmuştur.



Şekil 3.20 Dört uzunluğundaki benzer dizinin indeksleri ve bu dizilerden türetilen tahmini değerler



Şekil 3.21 Aynı uzunlukta birden fazla benzer dizi olduğunda tahmin ne olmalıdır?

Şekil 3.21’de görüldüğü gibi Mycielski algoritmasında, her zaman tek bir uzun benzerlik dizisi bulunamayabilir veya aynı uzunlukta birden fazla benzerlik dizisi tespit edilebilir. Bu durumu çözmek için algoritmaya hibrit bir yaklaşım eklenmiştir. Eğer birden fazla eşit uzunlukta benzerlik dizisi bulunursa, algoritma veri setinin tamamında bu dizilerden sonraki olasılıkları analiz ederek en olası değeri tahmin olarak kabul etmektedir. Bu yöntem, tahminlerin daha kararlı ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlamıştır. Yöntem matematiksel olarak Eşitlik 3.11 ‘deki gibi ifade edilir.

$$SR = \{SR_1, SR_2, \dots, SR_n\} \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.11’de SR veri dizisini ifade etmektedir. Eşitlik 3.12’de L_i uzunluğu l olan benzerlik dizilerini göstermektedir. Bu durumda L Eşitlik 3.13’teki gibi ifade edilir.

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\} \quad (3.12)$$

$$L_i = \{x | x = SR[i:j]\} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13’te x benzerlik dizisi ve $|x| = l$, $SR[i:j]$ ise x ’in alt dizileridir. Eşit uzunluktaki diziler için eğer $|L| > 1$ ise aynı uzunlukta birde fazla benzerlik dizisi vardır. Her L_i için diziden sonra gelen elemanların dağılımı analiz edilir. Bu olasılık dağılımı $P(x|L_i)$ ile ifade edilir ve Eşitlik 3.14’teki gibi gösterilir.

$$P(x|L_i) = \frac{\text{Frekans}(x, \text{diziden sonra gelen elemanlar})}{\text{Toplam frekans}} \quad (3.14)$$

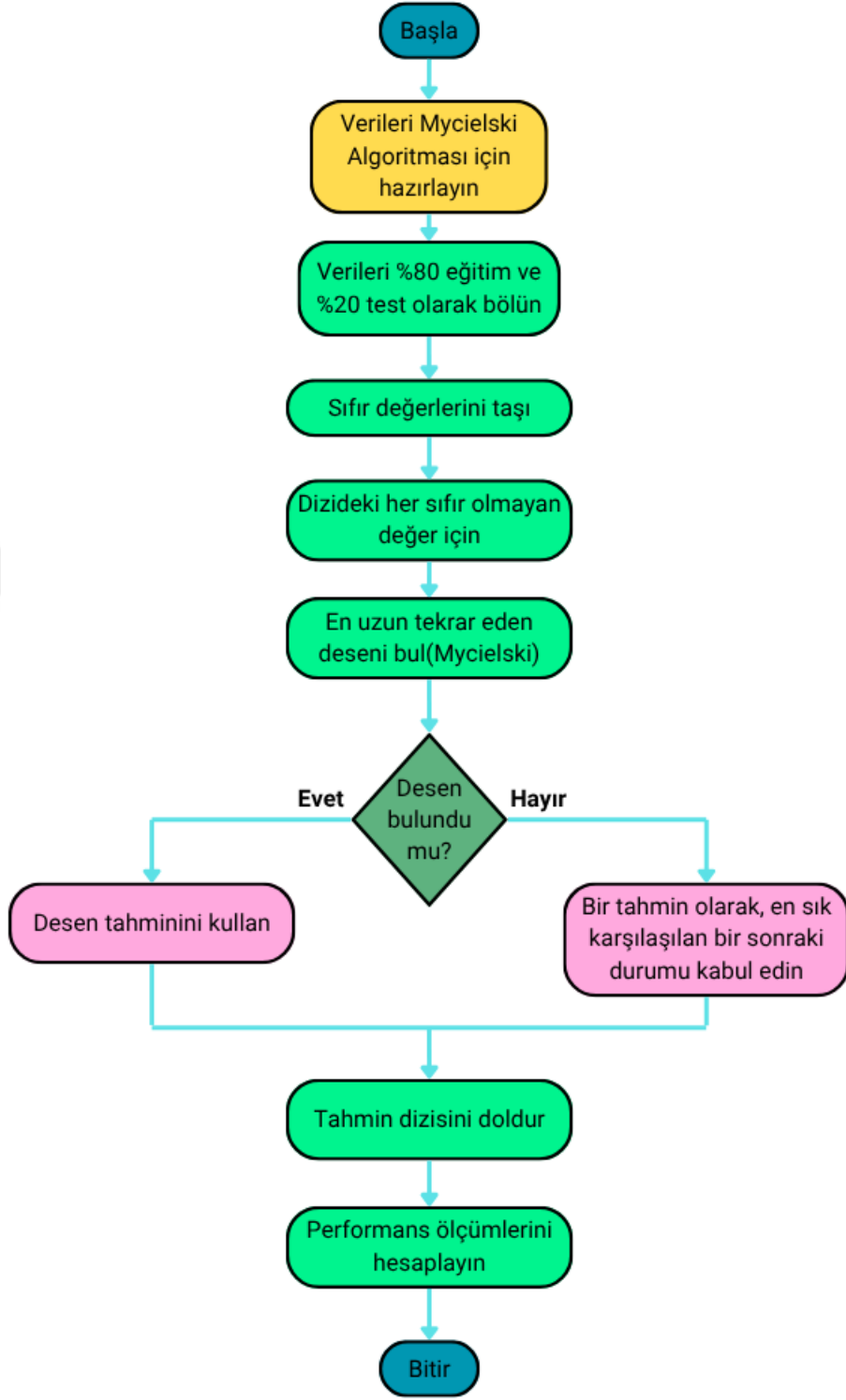
Olasılık dağılımından, en çok tekrar eden değer tahmin olarak seçilir. Genel olarak Eşitlik 3.15’teki gibi gösterilir.

$$\hat{x} = \arg \max_x P(x|L_i), \quad \forall L_i \in L \quad (3.15)$$

Eğer $\hat{x}$ aynı değeri birden fazla dizide temsil ediyorsa, bu değer tahmin olarak kabul edilir. Geliştirilen modele ait akış şeması Şekil 3.22’de verilmiştir.

3.5 Yapay Zekâ Tahmin Algoritmaları

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımların artması ve fosil yakıtlı kaynakların tükeniyor olması özellikle güneş enerjisi gibi kaynağı bedava, sınırsız ve temiz enerji kaynaklarına yönelimi artırmaktadır. Bir fotovoltaiik panel çıktısını tahmin etmek, güneş enerjisinin elektrik şebekelerine entegrasyonunu iyileştirmek ve elektrik arzı ile talebi arasında bir denge sağlamak için çok önemlidir.



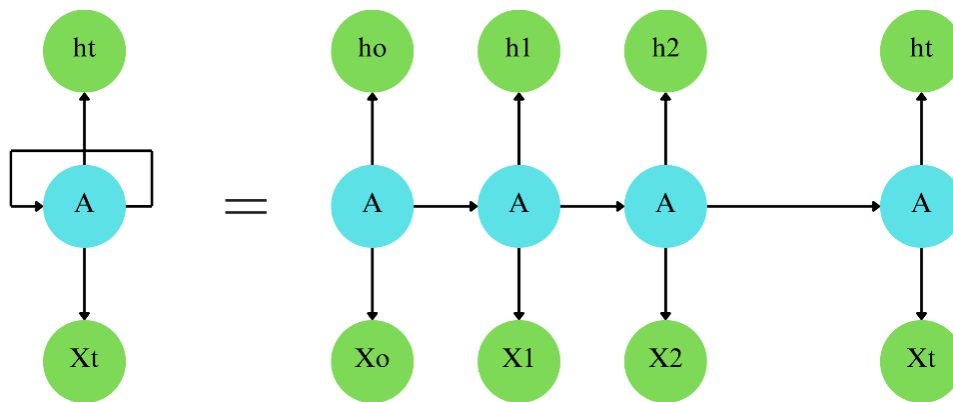
Şekil 3.22 Üçüncü Alt Tahmin Stratejisi Algoritması

Doğru güneş enerjisi tahminleri şebeke yönetimini iyileştirir ve fosil yakıt bağımlılığını azaltarak düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi kolaylaştırır (Jathar vd. 2024). Güneşten elde edilen elektrik enerjisinin etkili bir şekilde hazırlanmasını, tahmin edilmesini,

özümsemesini ve yürütülmesini sağlamak için bilim insanları literatürde belirtilen çeşitli modellerle ilişkili zorlukların uygulanması ve üstesinden gelinmesi konusunda aktif olarak çalışmaktadırlar (Bedi ve Toshniwal 2019). Bu çalışmalar sonucu, geleneksel tahmin yöntemlerinin büyük hesaplama süreleri ve düşük genelleme kabiliyetleri, tahmin modellerinin başarısını düşürdüğü belirlenmiştir. Literatürde kullanımı yaygın tahmin yöntemlerinden istatistiksel modellerin iyi genelleme kabiliyetlerine sahip olduğu, ancak doğrusal olmayan verileri tahmin etmede yetersiz olduğu çeşitli çalışmalarda belirtilmiştir. Ayrıca bu modellerin yüksek karmaşıklıkları ve parametre optimizasyonunda yaşadıkları zorluklar da büyük bir dezavantaj oluşturmuştur (Bedi ve Toshniwal 2019). Söz konusu problemlerin aşılmasında yapay zekâ tabanlı çeşitli modeller geliştirilmiş ve bu modellerin başarısını artıran hibrit çalışmalar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Artan enerji talebi ile güneş enerjisine olan yönelim ve bu enerjinin doğru ve verimli kullanımı ihtiyacı ile hızla ilerleyen yapay zekâ çağı, güneş enerji tahmin modellerinde yenilikçi, doğru ve yapay zekaya entegre edilmiş modellere ihtiyaç duymaktadır. Tez çalışmasının bu aşamasında yapay zekâ tabanlı derin öğrenme modellerinden olan ve Mycielski algortiması ile de hibrit bir şekilde kullanılan, LSTM ve GRU algoritmalarından bahsedilecektir.

3.5.1 Uzun-Kısa Vadeli Bellek Ağı Modeli (LSTM)

Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN), sıralı zaman serisi veri yapılarını işlemek için Rumelhart vd. (1986) tarafından geliştirilmiş yapay sinir ağı modelidir. Klasik yapay sinir ağlarından en büyük farkı girdilerin birbiri ile ilişkili olmasıdır. Basit bir RNN model mimarisi Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23 Temel RNN mimari yapısı

RNN modeller, bir sonraki durumu tahmin edebilmek için önceki girdi verileri arasında ilişki kurar ve eğitim aşamasında tüm bu veri yapıları arasındaki ilişkileri hatırlar. Kısaca bir önceki nörondan aldığı bilgiyi bir sonraki nörona girdi olarak sunar. Şekil 3.23 'de başlangıçta ağa girdi olarak x_0 değişkeni girer ve model içerisinde işlemler tamamlandığında h_0 adında bir çıktı elde edilir. Bir sonraki adımda, yeni bilgi olarak x_1 ve bir önceki adımdan elde edilen h_0 bilgisi model içerisinde yeni girdi değerleri olarak kullanılır. Bu süreç, model içerisinde her katman için uygulanır (Çolak 2025, Suwadana vd. 2025). Böylece, RNN modeli veri yapısı içerisindeki zamansal bağımlılıkları ve kalıpları öğrenmiş olur. Bu avantajlarının aksine RNN'ler, geri yayılım sırasında aktivasyon fonksiyonlarının türevlerinin küçük olması nedeniyle optimizasyon problemleri yaşamaktadır. Ayrıca uzun verileri işlemekte sınırlılıklara sahiptir (Hu vd. 2024).

LSTM mimarileri, RNN'lerdeki uzun vadeli bağımlılık probleminde bir çözüm olarak geliştirilmiştir. LSTM üst düzey bir RNN hücresine benzer şekilde çalışır. Fotovoltaik güç çıkışı, güneş ışınım şiddeti gibi zaman serisi verileri, kronolojik sırayla indekslenen belli bir dizi yapısından oluşmaktadır. LSTM modeli ise dizi problemlerinde sıralı değişkenleri işleyebilme yeteneğine sahiptir (Wang vd. 2023). Bu özellikleri onları zaman serileri problemlerinin çözümünde avantajlı hale getirir. Temel RNN yapısı ile kıyaslandığında LSTM mimarileri daha karmaşıktır. Bir LSTM yapısı hücre durumu, unutma kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısı olmak üzere dört farklı sinir ağı katmanından oluşur. Unutma kapısının işlevi, hangi bilginin atılacağına veya tutulacağına karar vermektir. Giriş kapısı i_t , hücre durumunu güncellemek ve hangi yeni bilginin eklenmesi gerektiğini belirlemek için kullanılır. Unutma kapısı f_t ise hücre durumunda hangi bilgilerin tutulup hangilerinin atılacağını kontrol eder. Bu iki kapının matematiksel ifadesi Eşitlik (3.16) ve (3.17)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$i_t = \sigma(W_i [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (3.16)$$

$$f_t = \sigma(W_f [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (3.17)$$

Hücre durumu güncellemesi c_t , önceki hücre durumu ile yeni bilgi adaylarının birleşimiyle oluşur ve Eşitlik (3.18) ile ifade edilir.

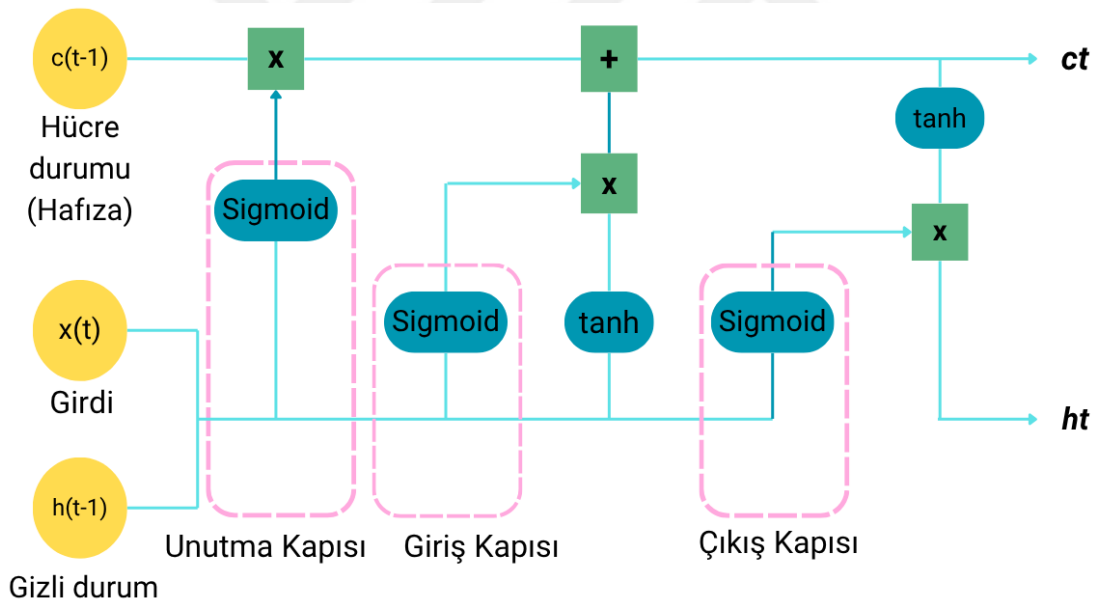
$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tanh(W_c [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (3.18)$$

Çıkış kapısı o_t , bir sonraki gizli durumun değerini belirlemek için kullanılır, gizli durum h_t ise daha önce girilen bilgileri içerir [68]. Bu yapı Eşitlik (3.19) ve (3.20) ile ifade edilir.

$$o_t = \sigma(W_o [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (3.19)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (3.20)$$

Eşitliklerde, W_i, W_f, W_c, W_o ağırlık matrisleri, σ sigmoid aktivasyon fonksiyonu, b_i, b_f, b_c ve b_o her bir kapının bias ağırlıklarıdır. f_t unutma kapısı, o_t çıkış kapısı, C_t ise hücre çıkışlarını temsil eder. LSTM algoritmasının mimari yapısı grafiksel olarak Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24 LSTM mimari yapısı

3.5.2 Kapılı Tekrarlayan Birim Modeli (GRU)

Cho ve arkadaşları (2014) tarafından sunulan GRU, LSTM hücresinin basitleştirilmiş bir sürümüdür. LSTM'deki üç kapıya kıyasla sadece iki kapı içerdiğinden, genel olarak daha az hesaplama gerektirir. Bu özellikleri sayesinde daha hızlı eğitilirler. Hücre durumu,

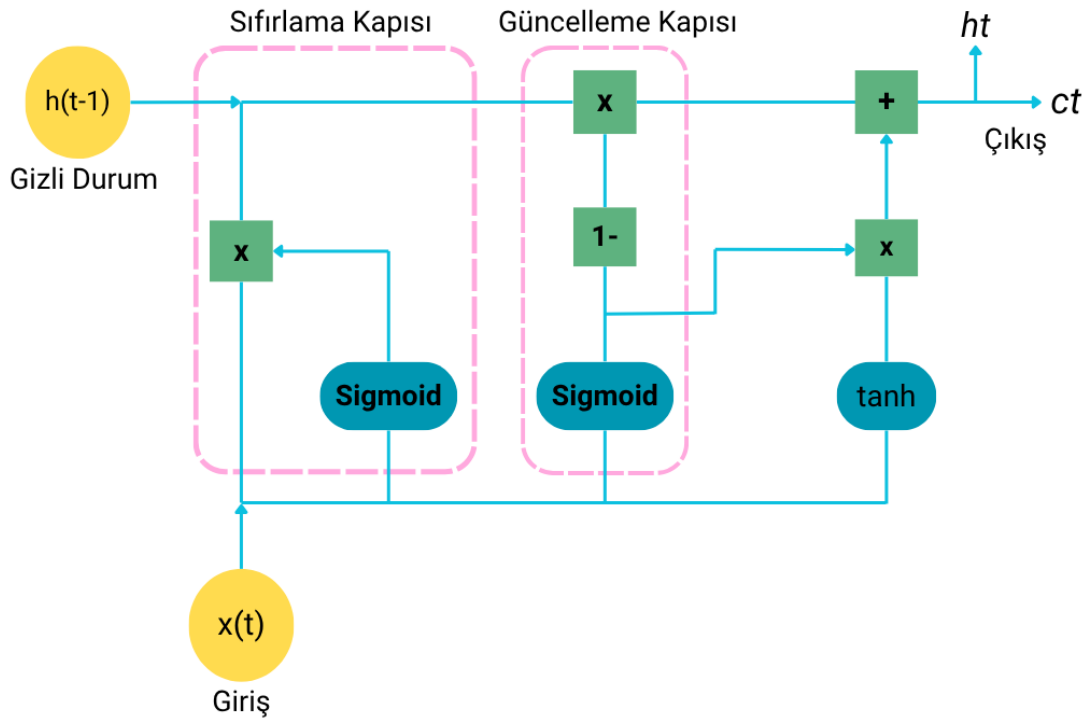
sıfırlama kapısı ve güncelleme kapısı içerir. Bir GRU mimarisinin katmanlarının hesaplanması Eşitlik (3.21) ile (3.23) arasında gösterilmiştir. Verilen eşitliklerde x_t giriş değeri, h_t çıkış, z_t güncelleme kapısı, r_t sıfırlama kapısı, W , U , b ise öğrenme parametreleridir.

$$Z_t = \sigma_g (W_z x_t + U_z h_{t-1} + b_z) \quad (3.21)$$

$$r_t = \sigma_g (W_r x_t + U_r h_{t-1} + b_r) \quad (3.22)$$

$$h_t = z_t * h_{t-1} + (1 - z_t) * \tanh(W_h x_t + U_h(r_t * h_{t-1}) + b_h) \quad (3.23)$$

GRU modelinin ileri yayılım özelliği, t zamanındaki gizli birimin aktivasyonu, önceki birimden gelen bilgiyi ve mevcut giriş değerini içerir. GRU'lar bilgiyi depolama ve işleme, veri içerisindeki doğrusal olmayan ilişkileri yakalama yeteneği sayesinde sıralı veriler için oldukça uygun bir modeldir. GRU algoritmasının mimari yapısı grafiksel olarak Şekil 3.25'de verilmiştir.



Şekil 3.25 GRU mimari yapısı

3.6 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski Algoritması

Tek boyutlu Mycielski algoritması, ayrık zaman serisi verilerinde desen tanıma için geliştirilmiş deterministik bir yöntemdir. Temel amacı, tarihsel verilerde halihazırda mevcut olan bir diziyle eşleşen en uzun alt diziyi belirlemektir. Altta yatan varsayım, geçmişteki benzer örüntülerin gelecekte de benzer olaylara işaret ettiğidir. Algoritma, bir sonraki değeri tahmin etmek için, geçerli veri dizisiyle eşleşen bir alt diziyi bulmaya çalışır. Arama, mevcut en kısa alt dizilerden başlayarak adım adım daha uzun dizilere doğru devam eder. Eğer bir eşleşme bulunursa, tarihsel dizinin bir sonraki elemanı tahmin değeri olarak kullanılır. İşlem, hiçbir eşleşme bulunamayana kadar veya söz konusu dizi çıktı sinyalinin daha uzun oluncaya kadar devam eder. Algoritma geçmiş verilerde birden fazla eşleşme bulursa, en uzun tekrar eden yapıyı belirlemek için arama genişletilmiş bir diziyle devam eder. Bu en uzun tanımlanmış diziden sonraki ilk eleman tahmin edilen değer olarak seçilir. Bu algoritmanın matematiksel ifadesi Bölüm 3.4.3’de Eşitlik (3.19) ve Eşitlik (3.20)’deki gibi verilmiştir.

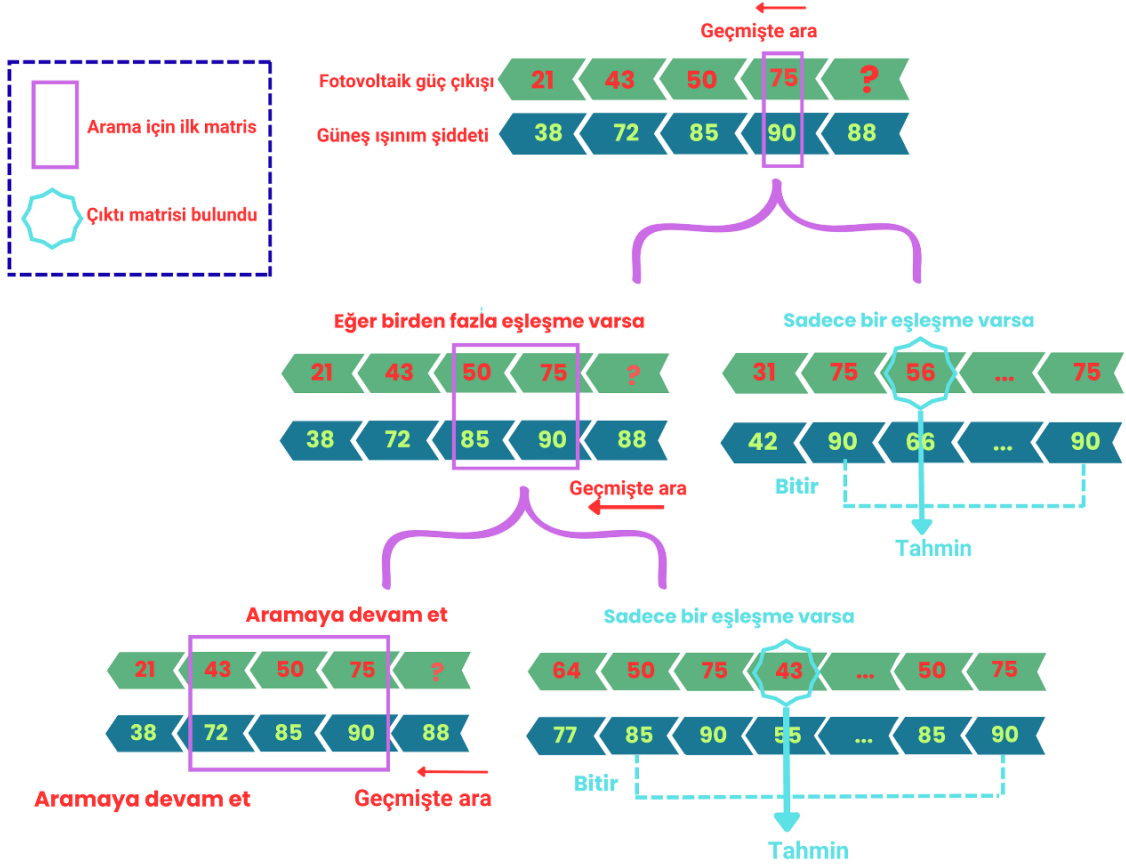
Literatürde Mycielski algoritmasıyla yapılan çalışmaların genellikle tek bir değişken (güneş ışıınımı, rüzgâr hızı vb.) üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Tez çalışmasının bu aşamasındaki amaç ise, Mycielski algoritmasının bir fotovoltaiik sistemi etkileyen birden fazla değişken ile çok boyutlu çalışmasını sağlayabilmektir. Tek boyutlu Mycielski algoritması, tek bir değişkene odaklanarak bir zaman serisindeki örüntüleri ve ilişkileri analiz eder. Fakat, fotovoltaiik panellerin güç çıkışının tahmin edilmesi için tek bir değişkenin kullanılması modelin başarısı açısından yeterli değildir. Tek boyutlu Mycielski algoritması, düşük hesaplama gücü ve basit yapısı sayesinde hızlı analiz imkânı sağlar. Ancak bu yaklaşım, çok boyutlu sistemlerdeki karmaşık etkileşimleri kapsayamaz, çünkü yalnızca tek bir etki faktörü dikkate alınır. Buna karşılık, çok boyutlu Mycielski algoritması, birden fazla değişken arasındaki ilişkileri inceleyerek analizi genişletir. Bu çok boyutlu yapı, değişkenler arasındaki hem doğrusal hem de doğrusal olmayan bağımlılıkları ortaya çıkarma avantajı sunarak, sistemdeki örüntülerin daha hassas bir şekilde belirlenmesine ve tahmin modellerinin doğruluğunun artırılmasına olanak tanır. Bu yaklaşımın uygulanmasına örnek olarak fotovoltaiik modülün performansının incelenmesi verilebilir. Tek boyutlu algoritma yalnızca güneş ışıınım şiddeti gibi tek bir etki faktörünü dikkate alırken, çok boyutlu algoritma sıcaklık ve diğer çevresel koşullar

gibi farklı faktörlerin eş zamanlı analizine olanak tanır. Bu, sistem performansının optimize edilmesine yardımcı olan daha kapsamlı modellerin tanımlanmasına olanak tanır. Çok boyutlu Mycielski algoritmasının matematiksel tanımı Eşitlik (3.24)'te gösterilmiştir (Kaysal ve Hocaoglu 2025).

$$m = \underset{L}{\operatorname{argmax}} \left\{ \begin{array}{l} x_1[k] = x_1[n], x_1[k-1] = x_1[n-1], \dots, x_1[k-L+1] = x_1[n-L+1] \\ x_2[k] = x_2[n], x_2[k-1] = x_2[n-1], \dots, x_2[k-L+1] = x_2[n-L+1] \end{array} \right\} \quad (3.24)$$

Eşitlik (3.24)'te $x_1[k]$ ve $x_2[k]$, iki farklı zaman serisini temsil etmektedir. Örneğin; $x_1[k]$ ışınım verisini, $x_2[k]$ ise güç verisini temsil edebilir. İki boyutlu aramada hem x_1 hem de x_2 zaman serilerindeki örüntülerin aynı anda eşleşmesi gerekmektedir. Algoritma, en kısa ikili veri parçasından başlayarak birer birer sola kayarak veri içindeki benzerlikleri bulmaya çalışır. Benzerlik bulunduğunda en kısa ikili veri parçası artırılarak aramaya devam edilir. Arama $x_1[n]$ ve $x_2[n]$ ikilisinden başlar ve sonra veri uzunluğu $(x_1[n-1], x_1[n])$ ve $(x_2[n-1], x_2[n])$, $(x_1[n-2], x_1[n-1], x_1[n])$ ve $(x_2[n-2], x_2[n-1], x_2[n])$ ikili şeklinde sol tarafa doğru tek tek artırılır. Algoritma çalışırken birden fazla yerde eşleşme bulabilir. "Eşleşme yok" noktasında ise, daha geniş bir parçaya geçilmiş ve dizide bulunmamış demektir. Bu durumda, son eşleşen desenin bir sonraki örneği için tahmin yapılır. Çok boyutlu Mycielski algoritmasına ait süreç akış şeması Şekil 3.26'da verilmiştir.

Çok boyutlu zaman serileri ile geliştirilen Mycielski algoritması için örnek bir yapı Şekil 3.27'de verilmiştir. Mycielski algoritmasında her zaman bir eşleşme bulunamayabilir veya birden fazla yerde aynı uzunlukta benzer dizi bulunmuş olabilir. Çok boyutlu Mycielski algoritmasında da bu problem aynı tek boyutlu Mycielski algoritmasında olduğu gibi algoritma veri setinin tamamında bu dizilerden sonraki olasılıkları analiz ederek en çok tekrar eden değeri tahmin olarak kabul eder. Matematiksel olarak Bölüm 3.4.3 ve Eşitlik (3.11-3.15)'te gösterildiği gibi hesaplanır.

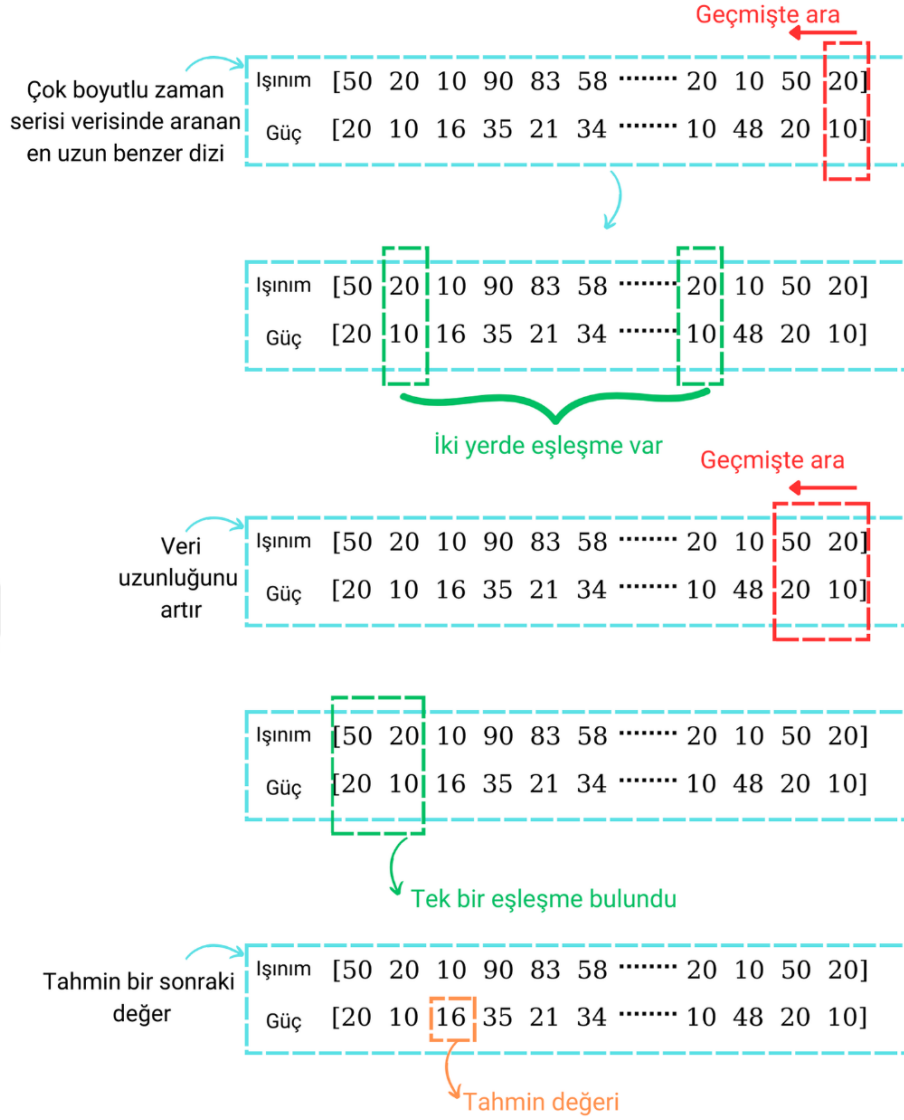


Şekil 3.26 Çok boyutlu Mycielski algoritması süreç akış şeması

3.6.1 Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM-GRU Hibrit Modeli

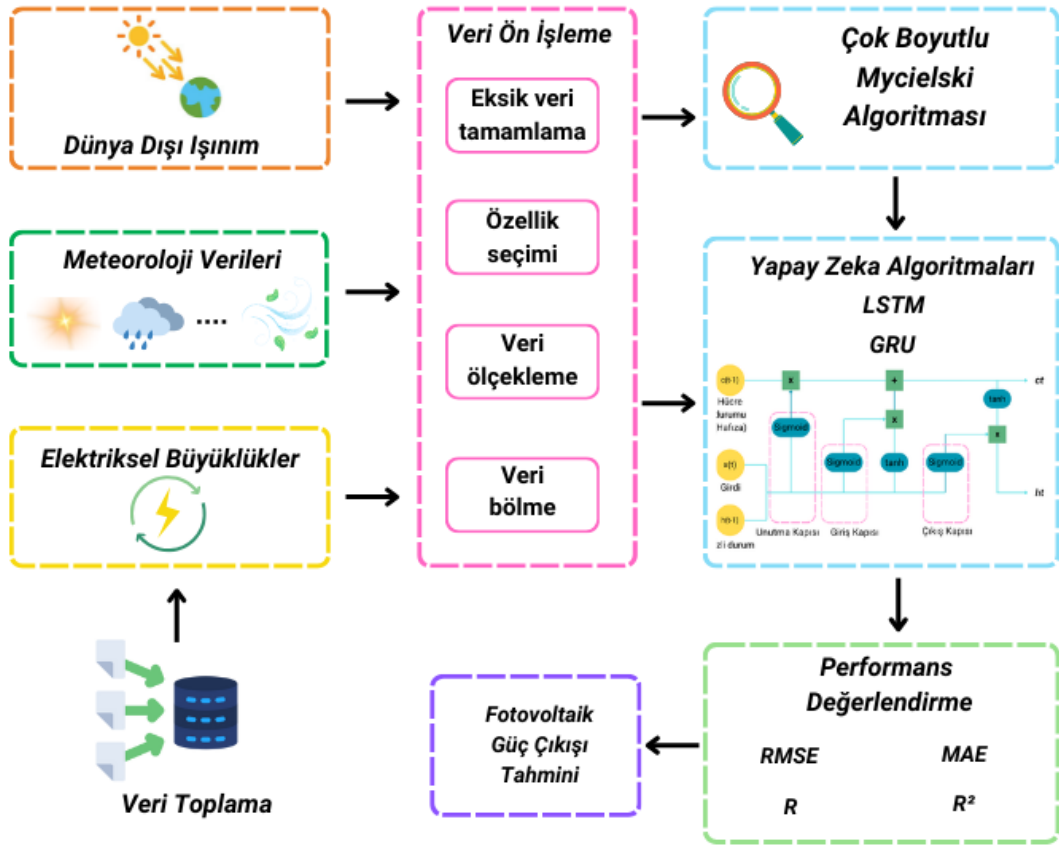
Fotovoltaik panellerin güç çıkışının tahmin edilmesi için tek bir değişkenin kullanılması modelin başarısı açısından yeterli değildir. Güç çıkışı, yalnızca güneş ışınlamı değil, aynı zamanda çeşitli meteorolojik faktörler ve elektriksel büyüklüklerden de etkilenmektedir.

Tez çalışmasında, panel güç çıkışını etkileyen faktörler Şekil 3.11’de belirtilen korelasyon matrisine göre belirlenmiş ve bu çok boyutlu veri seti üzerinde, en uzun ortak dizi yöntemi ile çok boyutlu Mycielski algoritması tasarlanmış ve yapay zekâ algoritmaları ile hibrit bir şekilde uygulanmıştır. Çalışmanın bu aşaması, TÜBİTAK 1002-A hızlı destek programı 123E624 nolu proje kapsamında elde edilen gerçek zamanlı veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada geliştirilen algoritmanın genel konfigürasyonu Şekil 3.28’de verilmiştir.



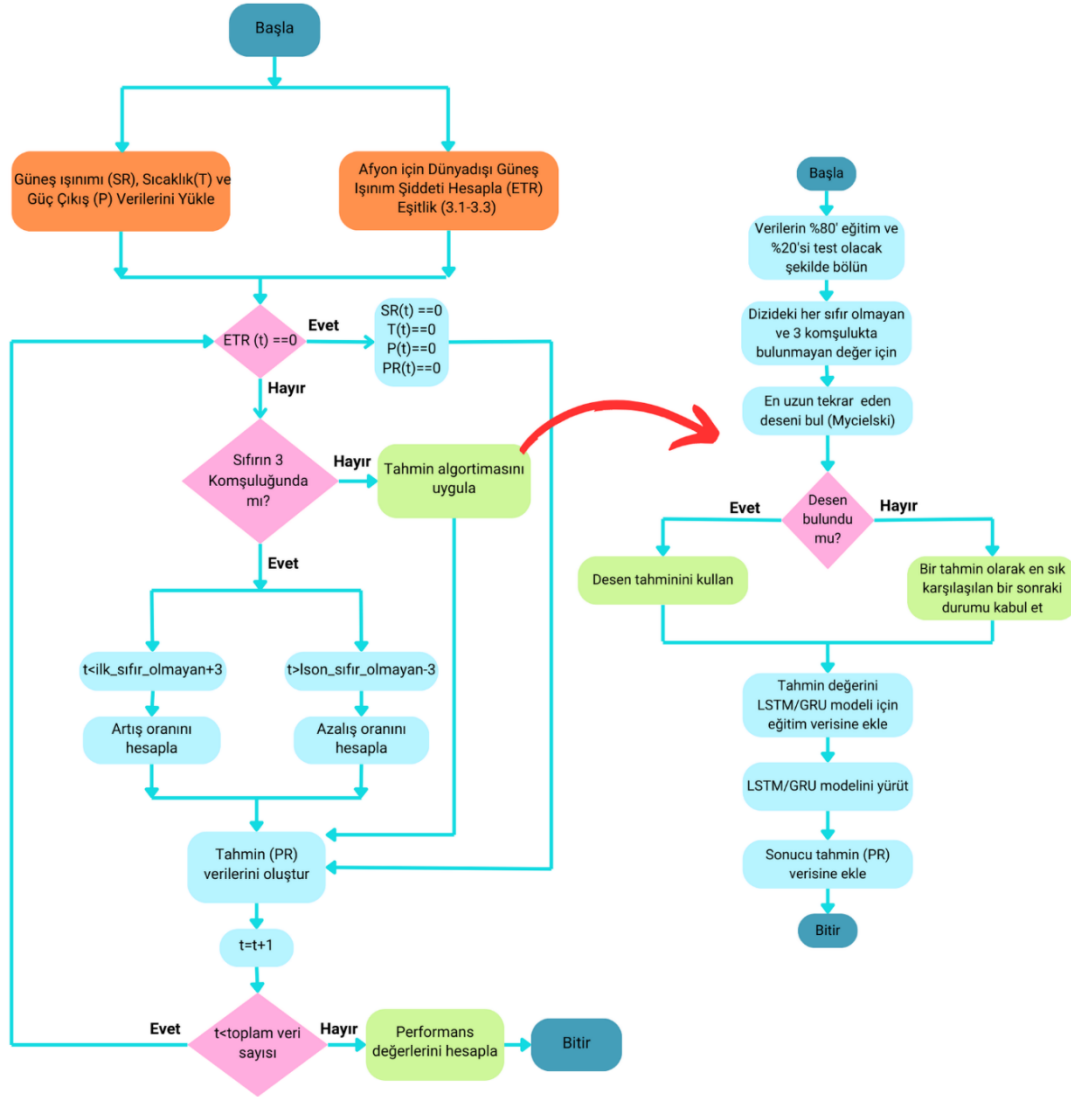
Şekil 3.27 Çok boyutlu Mycielski algoritması örnek bir yapı

Tez çalışmasının bu aşamasında, geçmiş örüntülerden öğrenme yeteneğine sahip çok boyutlu Mycielski algoritması kullanılarak elde edilen tahmin verileri, derin öğrenme modellerinden biri olan LSTM ve GRU ağlarına girdi olarak sunulmaktadır. Bu yaklaşımın temel amacı, yapısal ilişkilerden türetilen tahminlerin, zamansal bağımlılıkları öğrenebilen bir modelle işlenmesi sonucu elde edilecek doğruluğu artırmaktır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/LSTM-GRU hibrit modelin akış şeması Şekil 3.29’da gösterilmiştir.



Şekil 3.28 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM-GRU Hibrit Modelinin genel konfigürasyonu

Modeller oluşturulurken toplamda 32064 adet veri kullanılmıştır. Bu verilerin %80 'i eğittim, %20'si ise test verisi olarak kullanılmıştır. Çok boyutlu Mycielski'nin her adımda tahmin ettiği değer bir sonraki adımda LSTM/GRU katmanının eğitim kısmına eklenmiştir. Böylece, geçmiş örüntülerden elde edilen yapısal bilgilerin zamansal bağımlılıklarla birleştirilerek hem verinin topolojik özelliklerini hem de zaman serisi dinamiklerini daha etkili bir şekilde modellemek ve tahmin doğruluğunu artırmak amaçlanmıştır. LSTM ve GRU modellerinin performanslarını hibrit Mycielski modeli ile kıyaslamak için model yapısındaki özellikler aynı kullanılmıştır ve yapısal özellikler Çizelge 3.2'deki gibi belirlenmiştir. Algoritmaların çalıştırıldığı bilgisayar, 32 GB RAM'e sahip Intel® Core i7-9750H (2.6GHz) işlemci üzerinde çalışan, Windows 11 işletim sistemine sahiptir.



Şekil 3.29 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM-GRU Hibrit Modelinin akış şeması

Çizelge 3.2 Tez çalışması kapsamında geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/LSTM-GRU hibrit modelde LSTM-GRU modellerinin yapısal özellikleri.

Özellik	LSTM/GRU
Katman sayısı	3
Aktivasyon Fonksiyonu	ReLU
Batch_size	16
Optimizasyon algoritması	Adam
Maliyet Fonksiyonu Hesaplama	MSE
Dropout Oranı	0.2
Epochs	500
Erken durdurma	30

3.7 Performans Değerlendirme Kriterleri

Bir öğrenme modelinin başarısını ölçmek için, tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki farklılıkları değerlendiren çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır. Güvenilir ve doğru tahminler elde edebilmek için hataların minimum düzeyde olması ve doğruluk oranının 1'e yakın çıkması beklenmektedir. Bu tez kapsamında kullanılan performans değerlendirme kriterleri Çizelge 3.3'de verilmiştir (Kaysal ve Hocaoglu 2025).

Çizelge 3.3'teki denklemlerde, m tahmin edilen veri miktarını, y_n tahmin edilen verilerin büyüklüğünü, $\hat{y}_n$ verilerin herhangi bir zamandaki gerçek büyüklüğünü ve M_n verilerin ortalama büyüklüğünü ifade etmektedir. Ortalama mutlak hata (MAE), tahmin edilen değer ile gözlemlenen değer arasındaki farkların mutlak ortalamasını verir. Kök ortalama kare hata (RMSE), gözlemlenen değer ile tahmin edilen değer arasındaki farkların standart sapması olarak tanımlanır. Belirleme kat sayısı R^2 , tahmin edilen bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenlerdeki varyans oranını ifade eder. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça, modelin tahmin doğruluğu artar ve modelin bağımsız değişkenler üzerinden bağımlı değişkeni ne kadar iyi açıkladığını gösterir. Korelasyon (R), iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü ölçmektedir. Bu değişkenlerden hangilerinin ilişkili olduğunu belirlemeye yardımcı olur. 1'e yakın bir korelasyon değeri, değişkenler arasında güçlü ve pozitif doğrusal bir ilişki olduğunu gösterir.

Çizelge 3.3 Tez çalışmasında kullanılan performans değerlendirme kriterleri

Metrik	Denklem
MAE (Ortalama mutlak hata)	$MAE = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m y_n - \hat{y}_n $
RMSE (Hataların karesinin ortalamasının karekökü)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (y_n - \hat{y}_n)^2}$
R^2 (Belirleme katsayısı)	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^m (y_n - \hat{y}_n)^2}{\sum_{n=1}^m (y_n - M_n)^2}$
R (Korelasyon katsayısı)	$R = \frac{\sum_{n=1}^m (y_n - M_n)(\hat{y}_n - M_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^m (y_n - M_n)^2 (\hat{y}_n - M_n)^2}}$

4 BULGULAR

Ancak, literatürde belirtildiği gibi, Mycielski modeli, özellikle güneş enerjisi verilerinde, ardışık sıfır sorunuyla karşı karşıyadır. Bu nedenle, bu çalışma öncelikle modelin "sıfır hassasiyet" sorununa bir çözüm geliştirmeye odaklanmıştır. Bu çalışma için kurulan sistemden henüz yeterli veri toplayamadığından, Mycielski algoritmasının iyileştirilmesi için meteoroloji istasyonundan güneş ışıınım verileri temin edilmiştir. Ardından, tez çalışması için GURAM'da kurulan veri toplama sistemi ile elde edilen fotovoltaiik panel çıkış gücü verileri kullanılarak, Mycielski algoritması çok boyutlu zaman serileri üzerinde uygulanmıştır.

Bulgular bölümü iki alt başlık altında sunulmuştur. İlk alt başlıkta, tez çalışması kapsamında geliştirilen üç aşamalı tahmin modelinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. İkinci alt başlıkta ise, yine tez kapsamında geliştirilen çok boyutlu Mycielski/LSTM-GRU hibrit modelinin tahmin performansına ilişkin bulgular aktarılmıştır.

4.1 Tez Çalışması Kapsamında Geliştirilen Üç Aşamalı Tahmin Modeli Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında henüz proje kapsamında kurulan sistemden yeterli veri elde edilemediği için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilen ve Afyonkarahisar bölgesinden ölçülen beş yıllık güneş radyasyonu verileri kullanılmıştır. Üç aşamalı tahmin modelinin karşılaştırma sırasında tutarlılık sağlaması için saf Mycielski ve Mycielski-Birinci Alt Tahmin modellerinin performansları seçilmiştir. Ayrıca literatürde sık kullanılan klasik modellerden ARIMA ve Uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım (ANFIS) modelleri ile kıyaslanmıştır. Model başarıları MAE, RMSE, R ve R^2 gibi çeşitli değerlendirme ölçütleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Tahmin modellerinden elde edilen performans sonuçları Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1'e göre, Mycielski Modeli, nispeten yüksek hata oranlarına ve düşük veri açıklama kapasitesine sahip olduğu için en düşük performansı göstermektedir. Modelin hata oranları RMSE 15,10 W/m², MAE 6,86 W/m² ve veri açıklama kapasitesi R^2 0,73 olarak kaydedilmiştir. Buna karşın, Mycielski-Birinci Alt Tahmin Modeli, hata oranlarını düşürerek (RMSE 10,34 W/m², MAE 5,93 W/m²) ve doğruluk oranını artırarak (R^2 0,87, R 0,94) önemli bir iyileşme sağlamıştır. Önerilen yeni üç aşamalı tahmin modeli ise tüm

metriklerde en iyi performansı sunmaktadır. Bu model, çok düşük hata oranları (RMSE 8,46 W/m², MAE 3,82 W/m²) ve başarılı veri açıklama kapasitesi (R² 0,92) ile tahmin görevinde yüksek bir başarı elde etmiştir.

Ayrıca Çizelge 4.1 ‘de geliştirilen üç aşamalı tahmin modelinin başarısını görebilmek için literatürde sık kullanılan klasik tahmin modellerinden ARIMA ve ANFIS ile kıyaslanmıştır. ARIMA modelinin RMSE değeri 11,23, MAE değeri 6,59 ile ANFIS modelinin RMSE değeri 13,90 ve MAE değeri 6,67 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre klasik modeller içinde ARIMA modelinin hata oranları ANFIS modeline göre düşük hesaplanmıştır. ARIMA modelinin doğruluk oranlarını R² 0,85, R 0,92 artırarak ANFIS modeline göre iyileşme sağlamıştır. Yine Çizelge 4.1’e göre tek başına kullanılan Mycielski modelinin klasik yöntemlere göre performansı düşük çıkmıştır. Fakat tez çalışmasında geliştirilen Üç Aşamalı Tahmin modeli klasik yöntemler arasında da başarılı sonucu vermiştir. Böylece geliştirilen Mycielski modeli geleneksel yöntemler arasında da başarısını kanıtlamıştır.

Çizelge 4.1 Modellerden elde edilen sonuçlar

<i>Model</i>	<i>RMSE(W/m²)</i>	<i>R²</i>	<i>MAE(W/m²)</i>	<i>R</i>
ARIMA	11,23	0,85	6,59	0,92
ANFIS	13,90	0,77	6,67	0,88
Mycielski	15,10	0,73	6,86	0,86
Mycielski-Birinci Alt tahmin modeli	10,34	0,87	5,93	0,94
Önerilen Model (Üç aşamalı)	8,46	0,92	3,82	0,95

Mycielski modeli, ham haliyle tahmin yaparken sıfır değerlerinin etkisine maruz kalması nedeniyle düşük performans göstermektedir. Mycielski- Birinci Alt Tahmin modeli ise sıfır değerlerinin etkisini azaltmak ve tahmin başarısını artırmak amacıyla, projenin İkinci Alt Tahmin stratejileri başlığı altında açıklanan yöntemiyle geliştirilmiştir. Bu yöntemin uygulanması, ham Mycielski modelinin performansını önemli ölçüde artırmıştır.

Önerilen Üç Aşamalı Model, verilerdeki sıfır değerlerinin yanı sıra gün doğumu ve gün batımında meydana gelen ani değişimlerin etkilerini de yakalamak üzere tasarlanmıştır. Bu geliştirme, modelin performansında belirgin bir iyileşme sağlamış ve elde edilen

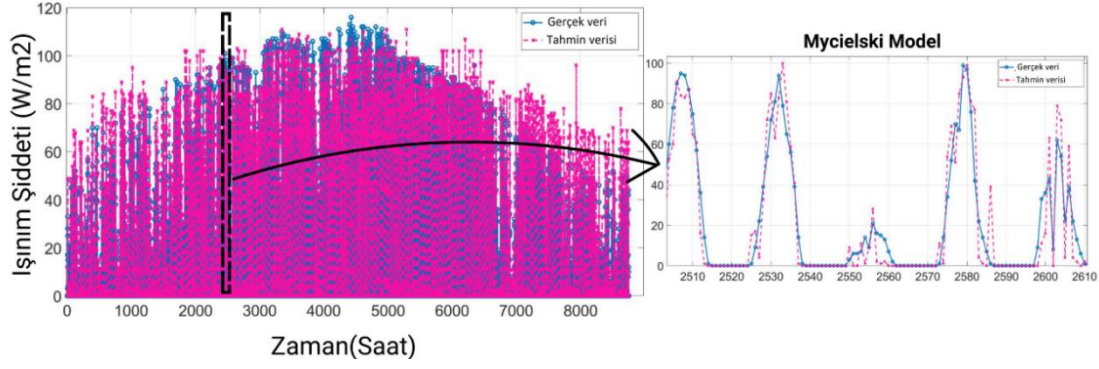
sonuçlarla başarısını kanıtlamıştır. Çizelge 4.2, önerilen model ile literatürde daha önce Afyonkarahisar için çalışılmış diğer modeller arasındaki karşılaştırmayı sunmaktadır ve Üç Aşamalı Modelin elde ettiği sonuçları detaylı bir şekilde göstermektedir.

Literatürde, Hocaoglu ve Serttaş (2017), güneş radyasyonu tahmini için sıfırları kaldırılmış Mycielski-Markov modelini kullanarak bu modelin başarılı sonuçlar verdiğini kanıtlamışlardır. Bakır, yaptığı çalışmada Afyon ili (2024) için küresel güneş radyasyonunu tahmin etmiştir. Eşlik ve meslektaşları ise Afyon ili (2024) için güneş radyasyonu tahmininde derin öğrenme modellerini kullanmışlardır.

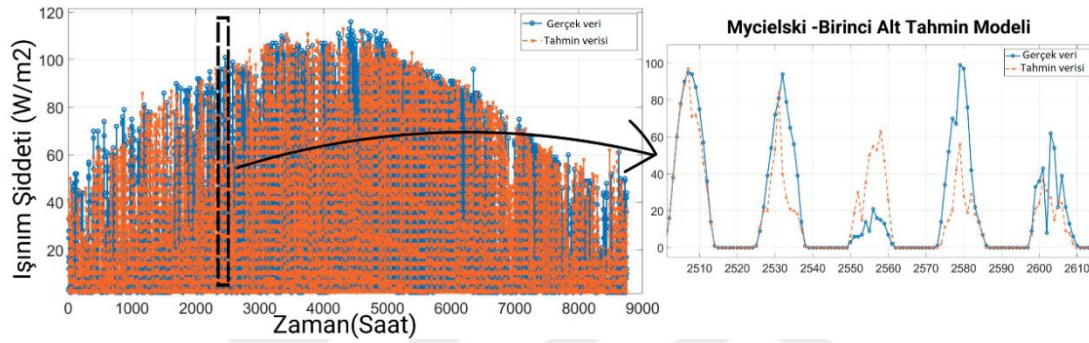
Önerilen Üç Aşamalı Tahmin Modelinin, literatürdeki diğer çalışmalar arasında güçlü bir konuma sahip olduğu ve elde edilen sonuçlarla dikkate değer bir başarı sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, yöntemin daha da geliştirilebileceği açıktır. Modellerin performansını daha net ortaya koyabilmek amacıyla Afyonkarahisar bölgesine ait ölçülen ve tahmin edilen değerlere ait grafikler ve yakınlaştırılmış görüntüleri Şekil 4.1(a-c)'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Afyon ili için önerilen modelin ve diğer mevcut modellerin performanslarının karşılaştırılması

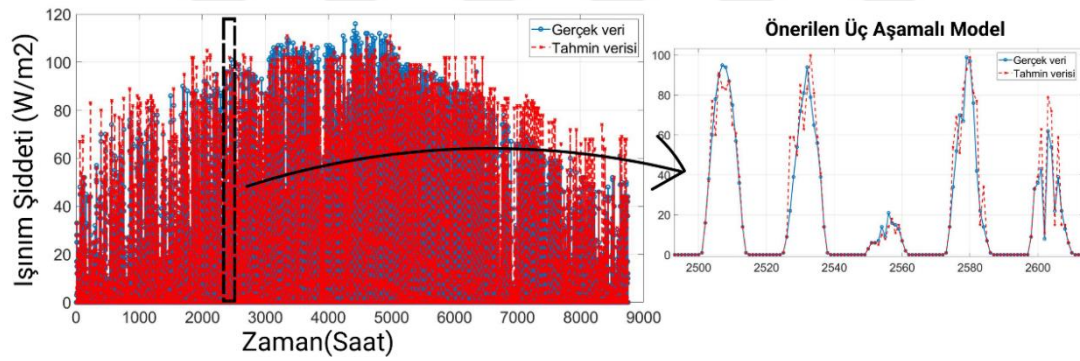
Literatür	Yöntem	RMSE	R ²	MAE	R	Bölge
Önerilen Model	Üç aşamalı model	8,46	0,92	3,82	0,95	<i>Afyon-Türkiye</i>
Hocaoglu ve Serttaş (2017)	Mycielski-Markov	16,06	0,85	-	0,85	<i>Afyon-Türkiye</i>
Bakır (2024)	Gradyan Tabanlı model	-	0,84	-	-	<i>Afyon-Türkiye</i>
Eşlik vd. (2024)	CNN-LSTM hibrit model	53,95	0,70	40,19	-	<i>Afyon-Türkiye</i>
Arseven ve Çınar (2023)	Arima- Dünya Dışı Işınım Filtresi hibrit	41,83	-	-	-	<i>Afyon-Türkiye</i>
Akarслан vd. (2018)	Yarı-ampirik model	51,21	-	-	-	<i>Afyon-Türkiye</i>



(a)



(b)

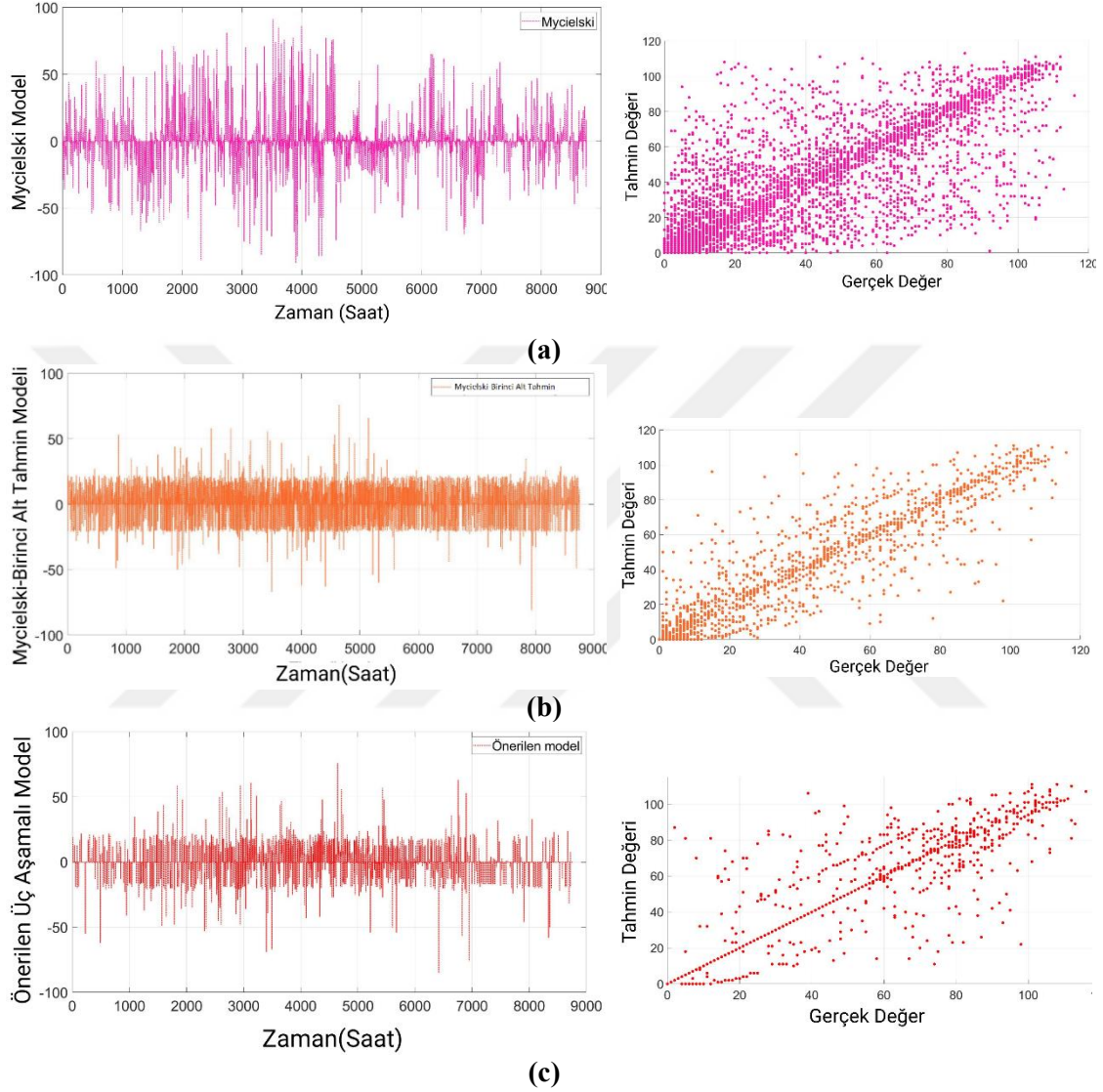


(c)

Şekil 4.1 Afyonkarahisar ili için ölçülen güneş ışıınım verileri ile Mycielski model (a), Mycielski-Birinci Alt Tahmin modeli (b) ve Önerilen Üç Aşamalı Tahmin modeli (c) tahmin performansına ait sonuç grafikleri

Şekil 4.1'deki grafikler üç modelin performansını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Mycielski modelinin ham hali sıfıra duyarlılığı nedeniyle tahmin başarısı üzerinde önemli bir etki göstermektedir. Bu durum modelin doğruluk performansı ve genel tahmin yeteneği üzerinde önemli bir olumsuz etkiye sahiptir. Mycielski Modeli tahmin edilen ve ölçülen veriler arasında önemli farklılıklar ile en düşük performansı gösterirken, Mycielski-Birinci Alt Tahmin Modeli tahmin doğruluğunu artırmakta ancak ölçülen

verilerle mükemmel bir uyum sağlamada başarısız olmaktadır. Önerilen model ölçülen verilerle başarılı bir uyum göstermekte, hataları en aza indirmekte ve hem genel trend hem de detaylarda üstün tahmin performansı sunmaktadır.



Şekil 4.2 Afyonkarahisar ili için Mycielski model (a), Mycielski-Birinci Alt Tahmin modeli (b) ve Önerilen Üç Aşamalı Tahmin modeli (c) hata ve korelasyon grafikleri

Modellerle ilişkili hata grafikleri, tahmin modelinin performansını ve tahminlerinin ne kadar başarılı olduğunu anlamak için kullanılan önemli araçlardır. Hata grafikleri genellikle tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki farkı zaman içinde göstermektedir. Çalışmada kullanılan modellerin hata grafikleri ve korelasyon grafikleri Şekil 4.2 (a-c)'de verilmiştir.

Mycielski modeli düşük doğrusallıkla en zayıf performansı sergilerken, Mycielski-Birinci Alt Tahmin modeli doğrulukta herhangi bir iyileştirme sağlamada başarılı olmuştur. Önerilen model, tahminler ve gerçek değerler arasında iyi bir ilişki sağlayarak diğer modellere kıyasla iyi performans göstermiştir.

4.2 Geliştirilen Çok Boyutlu Mycielski/LSTM-GRU Hibrit Modellerinden Elde Edilen Sonuçlar

Çalışmanın bu aşamasında Çok boyutlu zaman serileri ile Mycielski algoritmasının hibrit bir şekilde yapay zekâ algoritmalarıyla (LSTM ve GRU modelleri) işletilmesinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bir önceki çalışmada Mycielski algoritmasında sıfıra duyarlılık problemi ve ısıtım verisinin gün doğumu ve gün batımında yaşanan hızlı değişimlere duyarlılığı problemi hakkında çözüm yöntemleri geliştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın bu kısmında Tübitak proje kapsamında kurulmuş olan veri toplama sisteminden elde edilen gerçek zamanlı veriler kullanılmıştır. Veriler daha önce Bölüm 3.3 “Veri Ön İşleme” başlığı altında bahsedildiği gibi durumlara ayrılmıştır. Çalışmada öncelikle iki boyutlu verilerle Mycielski algoritması işletilmiştir. Bu veri çiftleri Şekil 3.11’deki korelasyon grafiğine göre belirlenmiştir. İlk olarak “Isıtım-Güç” sonrasında ise “Sıcaklık-Güç” olacak şekilde iki boyutlu veri grupları oluşturulmuştur. Mycielski algoritması iki boyutlu veri yapısında en uzun benzerliği aramış ve benzerlik bulunduğunda bu iki boyutlu diziden sonra gelen güç değerini LSTM/GRU modelinin eğitim verisine eklenmiştir. Eğer Mycielski algoritması en uzun benzerliği bulamazsa veya birden fazla yerde aynı uzunlukta benzer dizi bulursa, algoritma veri setinin tamamında bu dizilerden sonraki olasılıkları analiz ederek en çok tekrar eden değeri tahmin olarak kabul etmekte ve yine LSTM/GRU modelinde eğitim verisi olarak kullanılmaktadır.

Isıtım-Güç ve Sıcaklık-Güç için Çok Boyutlu(M) Mycielski/LSTM ve Mycielski/GRU modelleri ayrı ayrı eğitilmiş ve çok boyutlu Mycielski modeli ile kıyaslanmıştır. Modellerin performansı RMSE, MAE, R2 ve R değerleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3’teki sonuçlar, Isıtım-Güç ve Sıcaklık-Güç veri setleri üzerinde M/Mycielski-LSTM ve M/Mycielski-GRU modellerinin performanslarını karşılaştırmaktadır. Genel

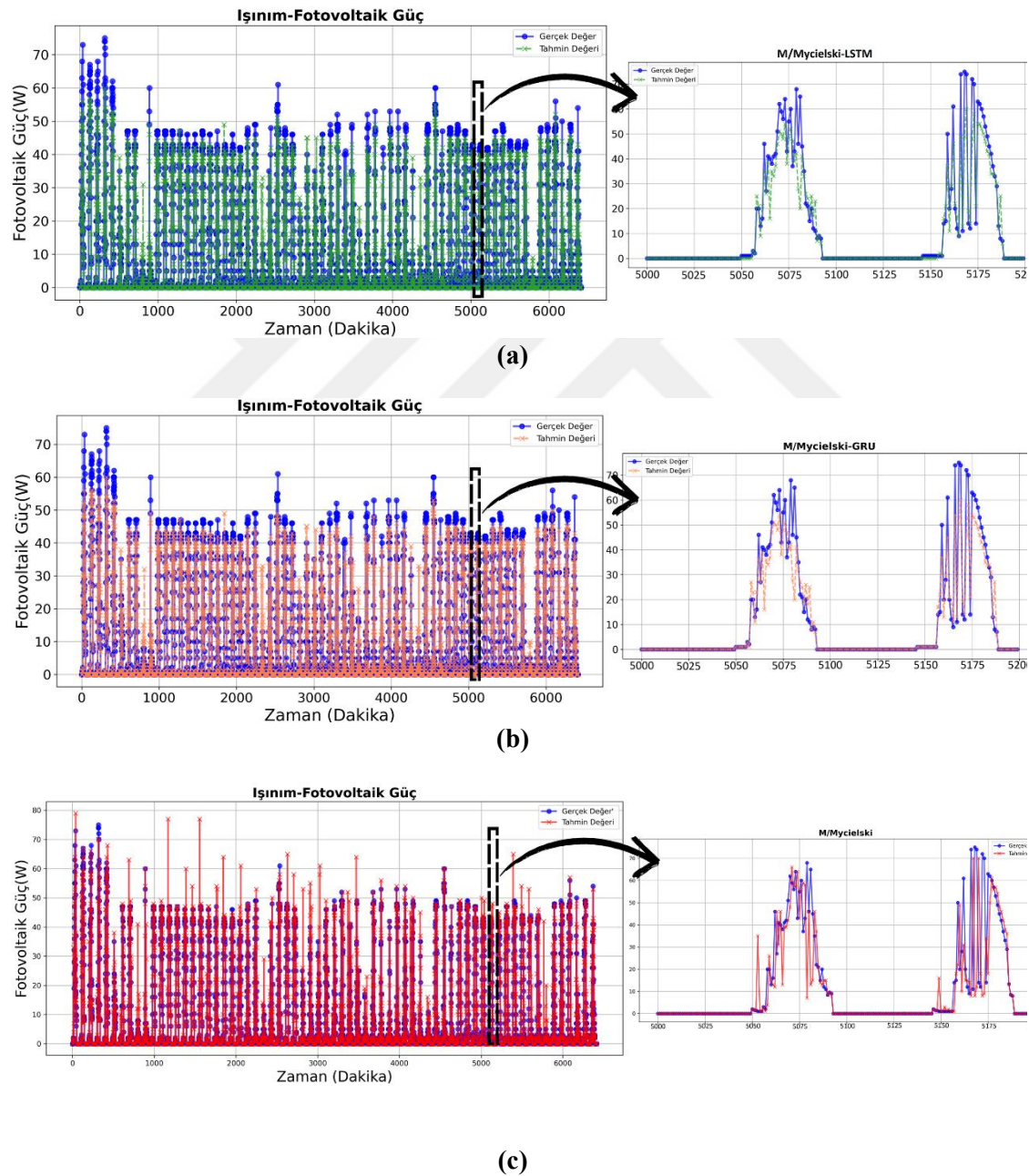
olarak, iki farklı özellikteki veri grubunda LSTM modeli, GRU ve M/Mycielski modeline kıyasla daha düşük hata oranları ve daha yüksek uyum katsayıları ile üstün performans göstermiştir. Ayrıca çok boyutlu verilerde Mycielski algoritması belli bir başarı göstermiş olsa da yapay zekâ destekli algoritmaların Mycielski modeline hibrit bir şekilde entegre edilmesi ile hata oranları büyük oranda düşmüş ve algoritmanın performansı artmıştır. Özellikle Işınım-Güç verisinde, LSTM'in $R^2 = 0.8225$ ve $R = 0.9069$ değerleri güç ile ışıınım arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve modelin bunu başarılı şekilde öğrendiğini gösteriyor. Ayrıca düşük $MAE = 2,2043$ ve $RMSE = 6,7484$ ise modelin tahminlerinin gerçeğe yakın olduğunu gösteriyor. Benzer şekilde, Sıcaklık-Güç verisinde de LSTM hem hata oranlarının düşüklüğü hem de yüksek korelasyon katsayısı ile daha başarılı olmuştur.

Işınım-Güç verileri için modellerden elde edilen gerçek-tahmin değerlerine ve yakınlaştırılmış değerlere ait grafikler Şekil 4.3 (a-c)'de verilmiştir. Sıcaklık-Güç verileri için modellerden elde edilen gerçek-tahmin değerlerine ve yakınlaştırılmış değerlere ait grafikler Şekil 4.4 (a-c)'de verilmiştir.

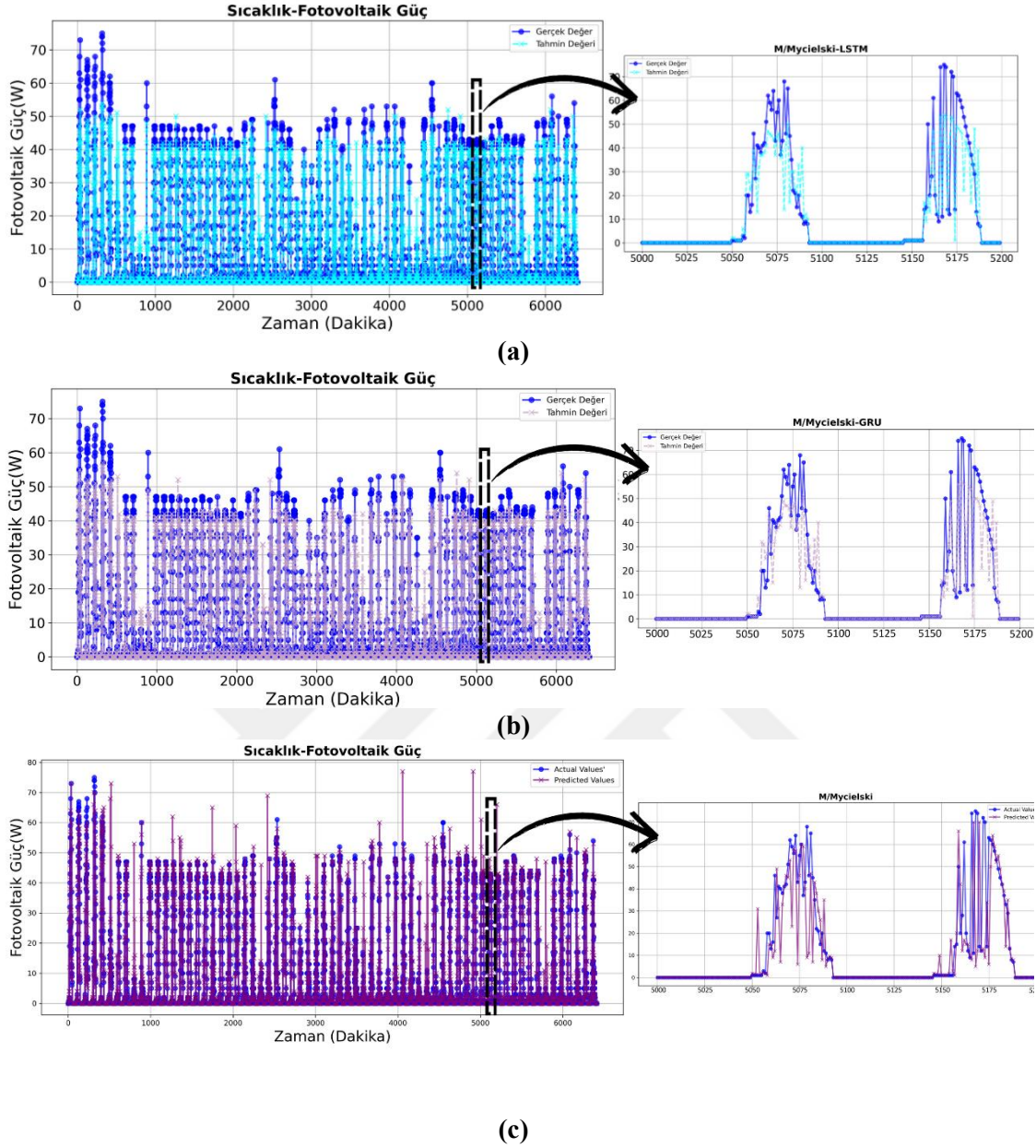
Şekil 4.3 (a-c) ile Şekil 4.4 (a-c) 'deki grafikler, Işınım-Güç ve Sıcaklık-Güç veri setleri için M/Mycielski, M/Mycielski-LSTM ve M/Mycielski-GRU modellerinin gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki uyumu görsel olarak karşılaştırmaktadır. Yapay zekâ destekli her iki model de genel trendleri başarıyla yakalarken, M/Mycielski-LSTM'in tahmin performansının daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. LSTM modeli, hem Işınım-Güç hem de Sıcaklık-Güç verilerinde pik noktalarını ve dalgalanmaları daha doğru bir şekilde tahmin edebilmiş ve hızlı değişimlere daha iyi adapte olmuştur. Işınım-Güç verileri için modellerden elde edilen hata ve korelasyon grafikleri Şekil 4.5 (a-c)'de verilmiştir. Sıcaklık-Güç verileri için modellerden elde edilen hata ve korelasyon grafikleri de Şekil 4.6 (a-c)'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Çok Boyutlu Mycielski/ LSTM/GRU modellerinden elde edilen tahmin sonuçları

Özellik	Model	RMSE(W)	MAE(W)	R ²	R
Işınım-Güç	<i>M/Mycielski-LSTM</i>	6,7484	2,2043	0,8225	0,9069
	M/Mycielski-GRU	6,8255	2,2494	0,8184	0,9046
	M/Mycielski	7,7836	2,4353	0,7737	0,8796
Sıcaklık-Güç	<i>M/Mycielski-LSTM</i>	7,4800	2,4147	0,7819	0,8842
	M/Mycielski-GRU	7,6205	2,4641	0,7737	0,8796
	M/Mycielski	8,2448	2,5341	0,7351	0,8573

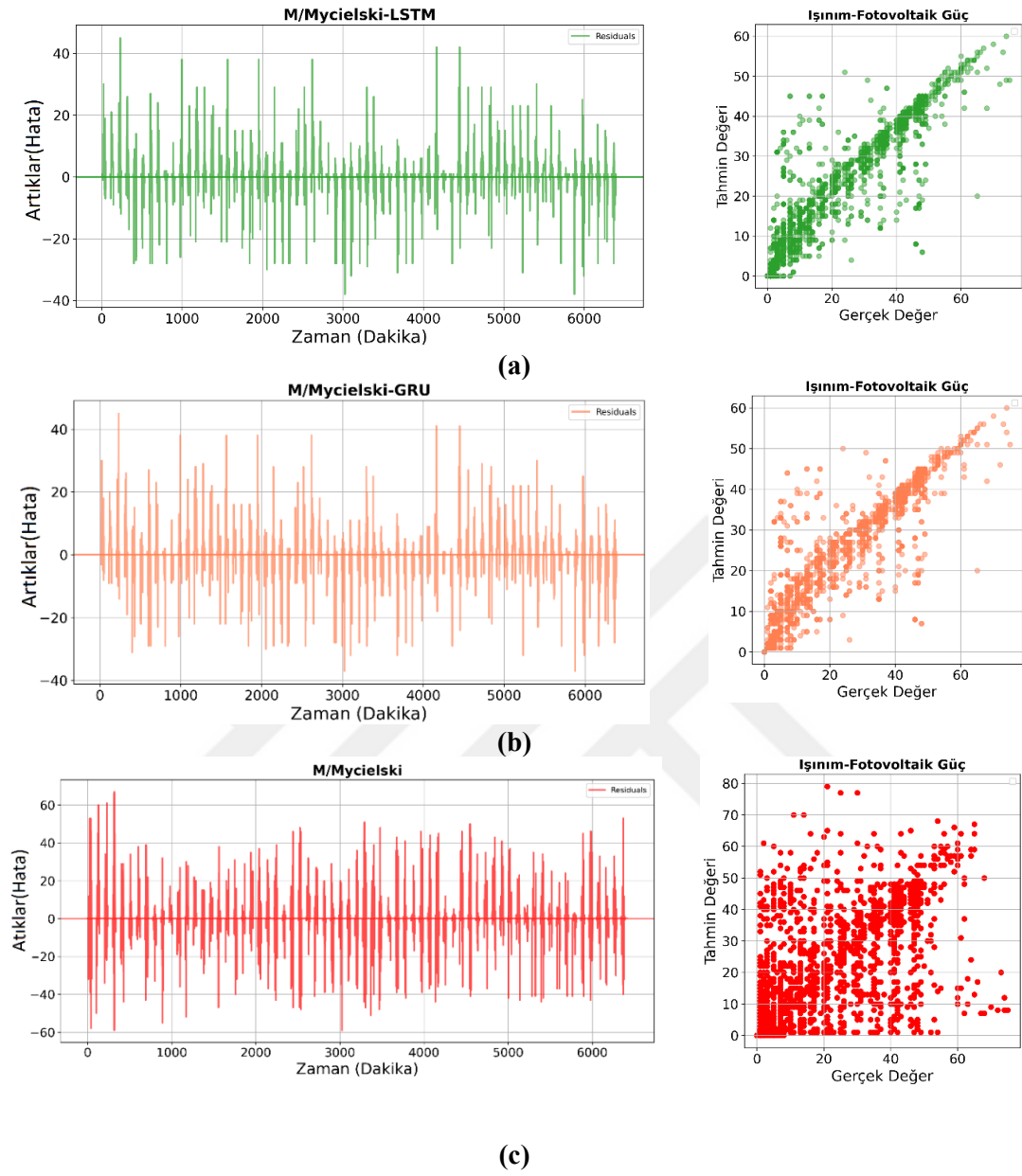


Şekil 4.3 Güç-Işınım verileri için M/Mycielski-LSTM (a), M/Mycielski-GRU (b), M/Mycielski (c) modellerinin tahmin performansına ait sonuç grafikleri



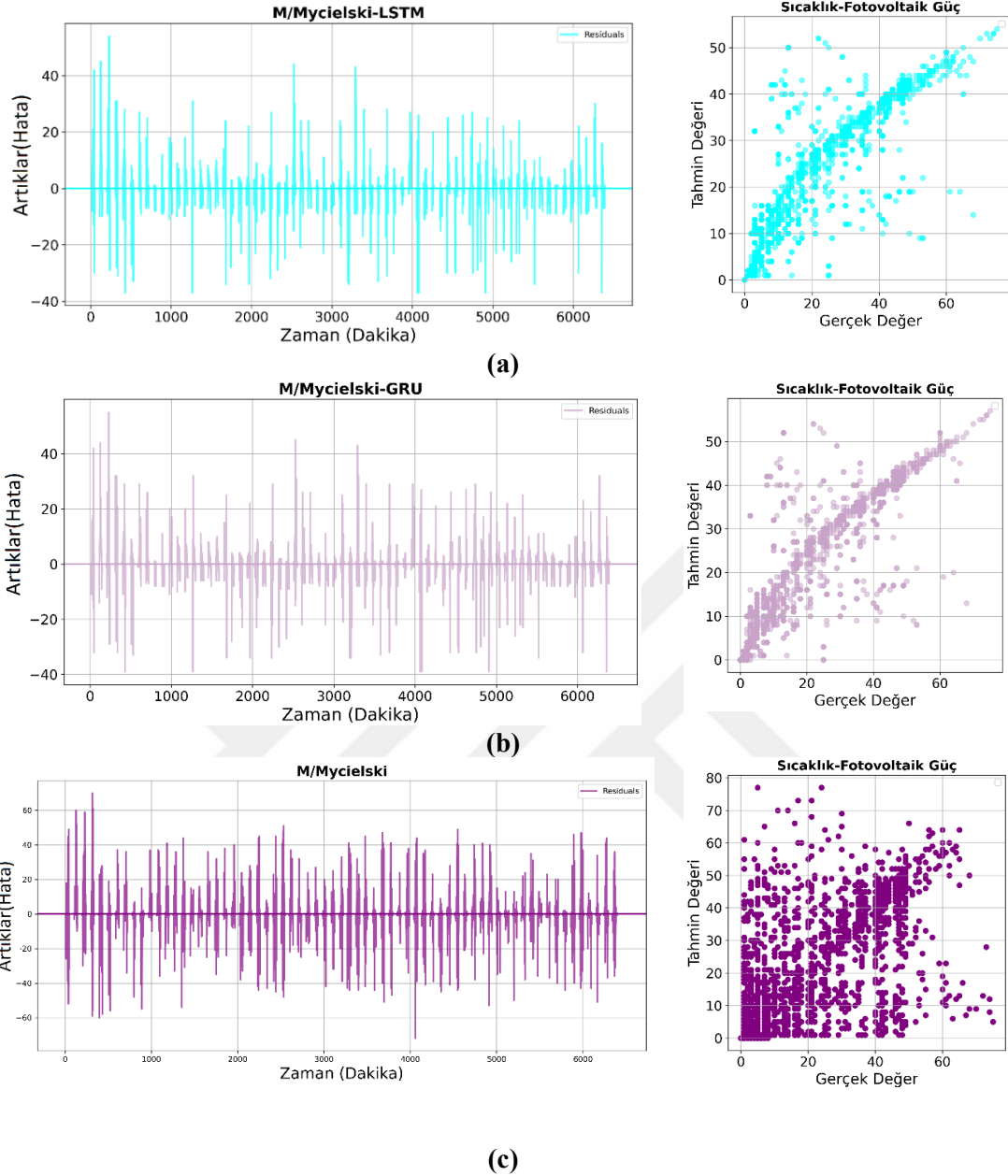
Şekil 4.4 Güç-Sıcaklık verileri için M/Mycielski-LSTM(a), M/Mycielski-GRU(b), M/Mycielski (c) modellerinin tahmin performansına ait sonuç grafikleri

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'daki korelasyon eğrileri incelendiğinde, yapay zekâya sahip modellerin, tek başına kullanılan Mycielski modeline kıyasla tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki ilişkiyi daha başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir. Ayrıca, hata grafikleri, LSTM içeren modellerin, özellikle yoğun ani değişim ve dalgalanmaların olduğu veri setlerinde güç tahmininde daha etkili olduğunu göstermektedir. Korelasyon eğrileri incelendiğinde, LSTM içeren modellerin, tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki ilişkiyi GRU modellerine kıyasla daha başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir.



Şekil 4.5 Güç-Işınım verileri için M/Mycielski-LSTM (a), M/Mycielski-GRU (b), M/Mycielski (c) modellerinin hata ve korelasyon grafikleri

Çizelge 4.4, M/Mycielski-LSTM modelini literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmaktadır. Literatürde Abdel Nasser ve Mahmoud (2019) LSTM-RNN modelini kullanarak fotovoltaik gücü tahmin etmişlerdir. Bu yöntemin iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Wen vd. (2019) ABD bölgesi için yaptıkları çalışmada derin öğrenme yöntemlerini kullanmışlardır. RMSE değerini 7,536, MAE değerini ise 4,369 olarak bulmuşlardır. Wang vd. (2022) geliştirdikleri tahmin modelinde RMSE=%6,67 ve MAE=%4,768 bildirmişlerdir.



Şekil 4.6 Güç-Sıcaklık verileri için M/Mycielski-LSTM (a), M/Mycielski-GRU (b), M/Mycielski (c) modellerinin hata ve korelasyon grafikleri

Bu tez çalışması, PV çıkış gücünü modellemek için iki boyutlu zaman serisi tabanlı bir Mycielski yaklaşımı kullanan ve yapay zekâ algoritmalarıyla entegre eden ilk çalışmadır. Geliştirilen M/Mycielski LSTM modeli, Afyonkarahisar bölgesinden alınan 2B çıkış gücü verileri kullanılarak eğitilmiş ve test edilmiştir. Ayrıca, Mycielski algoritmasının iki boyutlu veriler üzerindeki tahmin başarısı kanıtlanmıştır. Mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında, model önemli ölçüde daha iyi tahmin performansı göstermektedir. $RMSE = 6,7484$ W, $MAE = 2.2043$ W, $R^2 = 0,8225$ ve $R = 0,9069$ değerleri elde edilerek

yüksek doğruluk göstermiştir. Ayrıca, bu model doğrudan çıkış gücüne odaklandığı ve böylece uygulama için daha uygun sonuçlar sağladığı için önceki yaklaşımlardan farklıdır. Önerilen hibrit model, literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla güçlü bir performans göstermekte ve sonuçlar ikna edicidir. Aynı zamanda, bu bağlamda zaman serisi analizi için 2B Mycielski tabanlı bir yaklaşımın uygulanması, gelecekteki araştırmaları teşvik edebilecek bir yeniliktir. Model, ek veri kümeleriyle veya farklı iklim koşulları altında çalışılarak daha da geliştirilebilir. Bu nedenle, bu çalışma hem metodolojik hem de pratik açıdan literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Çizelge 4.4 M/Mycielski-LSTM modelini literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılması

Çalışma	Veri Türü	Girdiler	Performans	Bölge
Önerilen Model	Çıkış gücü	Sıcaklık, güç, Işınım	RMSE= 6,7484 R2= 0,8225 R= 0,9069 MAE= 2,2043	Türkiye
Abdel Nasser ve Mahmoud (2019)	Çıkış gücü	Geçmiş saatlik PV gücü	RMSE=82,15-136,87	Çin
Wen (2019)	vd. Çıkış gücü	Fotovoltaik güç, Sıcaklık, Nem, Rüzgâr hızı	RMSE= 7,536 MAE= 4,369	Amerika
Wang (2022)	vd. Çıkış gücü	Bulut dağıtım özellikleri, geçmiş güç verileri	RMSE= %6,675 MAE= %4,768	Çin

5 TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışması kapsamında, fotovoltaik panellerin çıkış gücü, yenilikçi modeller geliştirerek tahmin edilmiştir. Çalışmanın öncelikli odak noktası, zaman serilerinde Mycielski tahmin yönteminin kullanılması ve geliştirilmesi olmuştur. Literatürde güneş enerjisi üzerine Mycielski tahmin modelinin uygulandığı çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmaların eksik yönleri belirlenmiştir. Güneş enerjisi tahmininde Mycielski modelinin uygulandığı çalışmalarda, günün gece saatlerine ait ardışık sıfır değerlerinin veri setinden çıkarılması durumunda modelin başarılı sonuçlar sunduğu görülmüştür. Sıfır değerleri veri seti içerisinde çıkarılmadığında ise Mycielski modeli, ardışık sıfır değerlerine takılarak model başarısını olumsuz etkilemiştir. Fakat ardışık sıfır değerlerinin olduğu gece saatleri, zamanın bir parçası olduğundan zaman serisi veri yapısından çıkarılması verinin bütünlüğünü bozmaktadır. Tez çalışmasının ilk aşamasında, Mycielski modelinin sıfır değerine duyarlılık problemini gidermek ve tahmin doğruluğunu artırmak amacıyla yenilikçi üç aşamalı güneş ışıınım tahmin modeli geliştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Model, sıfır değerlerine olan duyarlılığı azaltırken aynı zamanda tahmin doğruluğunu artırmak için hibrit bir yapıda tasarlanmıştır

Literatürde ilk kez uygulanan üç aşamalı modelde, günün saatlik güneş ışıınımı verileri sabah, öğle ve akşam olmak üzere üç farklı zaman dilimine ayrılmıştır. Her zaman dilimi için farklı tahmin stratejileri uygulanmıştır. Geliştirilen model, geleneksel Mycielski ve Mycielski-Birinci Alt Tahmin modelleri ile karşılaştırılmış ve başarılı sonuçlar sergilediği görülmüştür. Çalışmada, Mycielski modelinin sıfır değerleri ile ilgili yaşadığı sorunlar ele alınmış ve bu değerlerin doğal bir süreç olarak değerlendirilmesi sağlanarak Mycielski modeli iyileştirilmiş ve böylece modelin performansı artırılmıştır. Sıfır değerleri, tahmin süreçlerine deterministik bir şekilde entegre edilmiştir. Ayrıca, özellikle sabah ve akşam saatlerinde gözlenen hızlı değişimlerin dünya dışı ışıınım şiddeti verileriyle düzeltilmesi, modelin bu kritik geçiş dönemlerini daha iyi öğrenmesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen modelin hata oranlarını önemli ölçüde azalttığını ve güneş ışıınımı verilerinin stokastik doğasını daha etkili bir şekilde yakaladığını ortaya koymuştur. RMSE, MAE, R^2 ve korelasyon katsayısı gibi metrikler üzerinden yapılan değerlendirmelerde, önerilen model benzer modellere kıyasla önemli bir üstünlük sağlamaktadır. Özellikle geleneksel Mycielski modeli ile kıyaslandığında,

geliştirilen ve iyileştirilmiş Mycielski modelinin tahmindeki başarı oranı %26,03 değerinde bir artış sağlamıştır.

Tez çalışmasının ikinci odak noktası ise Mycielski modelinin çok boyutlu zaman serilerine uygulanabilirliği üzerine olmuştur ve M/Mycielski olarak adlandırılmıştır. M/Mycielski modelinin gerçek zamanlı veriler üzerinde uygulanabilmesi için GURAM'da fotovoltaiik panel ve veri toplama sisteminin kurulumu gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenden elde edilen verilerde eksik veriler önışleme bölümünde belirtildiğı gibi tamamlanmıştır. Böylece modelin daha başarılı sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Öznitelik seçimi korelasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve böylece modele gereksiz veri yükü getirebilecek değışkenler elenmiştir. Bu sayede modelin hesaplama verimliliğı artırılmış ve tahmin doğruluğı önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Özgün M/Mycielski modeli, çok boyutlu zaman serileri için uygulanabilirliği test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. M/Mycielski modelinin performansını artırmak ve başarısını kıyaslamak için yapay zekâ algoritmaları ile literatürde ilk kez hibrit bir şekilde uygulanmıştır. Geliştirilen çok boyutlu Mycielski tabanlı hibrit yapay zekâ modeli, fotovoltaiik güç tahmini için etkili bir yöntem sunmakta ve yenilikçi yaklaşımıyla mevcut literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu hibrit yapı, ikna edici sonuçlara yol açmıştır. Modelin literatüre katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Mycielski modelinin sıfır değıer sapması problemi çözülmüş ve model yeniden yapılandırılmıştır. Böylece model, verilerin zamansal yapısını bozmadan çalıştırılabilmiş ve PV çıkış gücünü tahmin etme performansının iyileştirildiğı gözlemlenmiştir.
- 2- Bu tez çalışmasının öne çıkan katkılarından biri, Mycielski algoritmasının literatürde ilk kez çok boyutlu zaman serisi verilerine uygulanmış olmasıdır. Bu şekilde, PV çıkış gücünü etkileyen çevresel ve sistem değışkenleri modele eş zamanlı olarak entegre edilmiştir. Böylece, algoritmanın çok değışkenli veri yapılarında uygulanabilirliği ve etkinliğı gösterilmiştir.
- 3- Mycielski algoritması, yapay zekâ algoritmalarının güçlü yönlerini çok

boyutlu veri yapılarıyla birleştirerek PV sistemlerinin değişken çıkış gücünün anlaşılmasını mümkün kılmıştır. Özellikle, geçmiş veri örüntülerinin doğru bir şekilde yakalanması ve tahmin modellerine entegre edilmesi, modelin performansını artırmış ve fotovoltaik panellerin güç tahmininde yüksek başarı sağlamıştır.

Geliştirilen M/Mycielski ve LSTM-GRU hibrit modelleri, güç tahmini alanında literatüre yenilikçi bir yaklaşım sunmuş, mevcut yöntemlerin ötesine geçen ve daha yüksek doğruluk ve verimlilik sağlayan bir modelleme perspektifi sağlamıştır. Ayrıca, Mycielski algoritmasının çok boyutlu bir yapıya dönüştürülmesi, fotovoltaik sistemlerin güç çıkışını etkileyen faktörler arasında güçlü ilişkilerin tespit edilmesini mümkün kılmıştır. Güneş ışınlam şiddeti, sıcaklık ve güç gibi parametrelerin modele entegre edilmesi, tahmin doğruluğunu artırmada kritik bir rol oynamıştır.

Gelecek çalışmalar, bu çalışmanın sonuçları ve metodolojik yöntemlerinin üzerine inşa edilerek daha kapsamlı analizlere yönelebilir. Tez çalışmasında, Mycielski algortiması çok boyutlu zaman serilerinde kullanılırken Sıcaklık-Güç ve Işınlam-Güç olacak şekilde iki boyutlu veri yapıları ile gerçekleştirilmiştir. İleriki çalışmalar, Sıcaklık-Işınlam-Güç veya farklı veri grupları kullanılarak çok boyutlu zaman serisi yapılarının etkileri incelenebilir. Böylece bir fotovoltaik panel çıkış gücünü etkileyen ikiden fazla değişkenli yapıların, tahmin performansı üzerindeki etkileri gözlenebilir. Ayrıca, bu çalışmada Mycielski algortimasının başarısını artırmak için LSTM ve GRU gibi algoritmalar hibrit olarak kullanılmış ve başarısı gözlenmiştir. Transformer tabanlı modellerin Mycielski modeline entegre edilerek tahmin doğruluğu ve genelleme yeteneği gözlemlenebilir.

6 KAYNAKLAR

- Abdel-Nasser M, Mahmoud K, 2019, Accurate Photovoltaic Power Forecasting Models Using Deep LSTM-RNN, *Neural Computing and Applications*, 31(7), 2727-2740.
- Agga A, Abbou A, Labbadi M, El Houm Y, Ali I H O, 2022, CNN-LSTM: An Efficient Hybrid Deep Learning Architecture for Predicting Short-Term Photovoltaic Power Production, *Electric Power Systems Research*, 208, 107908.
- Ağbulut Ü, Gürel A E, Biçen Y, 2021, Prediction of Daily Global Solar Radiation Using Different Machine Learning Algorithms: Evaluation and Comparison, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110114.
- Ağbulut Ü, Gürel A E, Ergün A, Ceylan İ, 2020, Performance Assessment of A V-Trough Photovoltaic System and Prediction of Power Output with Different Machine Learning Algorithms, *Journal of Cleaner Production*, 268, 122269.
- Akarşlan E, Hocaoglu F O, Edizkan R, 2018, Novel Short Term Solar İrradiance Forecasting Models, *Renewable Energy*, 123, 58-66.
- Akarşlan E, Hocaoglu F O, Edizkan R, 2014, A Novel MD (Multi-Dimensional) Linear Prediction Filter Approach For Hourly Solar Radiation Forecasting, *Energy*, 73, 978-986.
- Antonopoulos V Z, Papamichail D M, Aschonitis V G, Antonopoulos A V, 2019, Solar Radiation Estimation Methods Using ANN and Empirical Models, *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, 160-167.
- Aras M, 2019, Polikristal ve monokristal tip fotovoltaik güneş panellerinin verimlerinin Erzurum kış ayları koşullarında karşılaştırılması, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 58s, Erzurum.
- Arseven B, Çınar S M, 2023, Dünya dışı ışınlımlarla iyileştirilmiş Arima, ridge regresyon ve lasso regresyon yöntemlerinin saatlik ışınlım tahmininde kullanılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(3), 733-742.
- Azizi N, Yaghoubirad M, Farajollahi M, Ahmadi A, 2023, Deep Learning Based Long-Term Global Solar İrradiance and Temperature Forecasting Using Time Series

- With Multi-Step Multivariate Output, *Renewable Energy*, 206, 135-147.
- Bakır H, 2024, Prediction of Daily Global Solar Radiation in Different Climatic Conditions Using Metaheuristic Search Algorithms: A Case Study From Türkiye, *Environmental Science and Pollution Research*, 31(30), 43211-43237.
- Bamisile O, Oluwasanmi A, Ejayi C, Yimen N, Obiora S, Huang Q, 2022, Comparison of Machine Learning and Deep Learning Algorithms for Hourly Global/Diffuse Solar Radiation Predictions, *International Journal of Energy Research*, 46(8), 10052-10073.
- Bashir T, Haoyong C, Tahir M F, Liqiang Z, 2022, Short Term Electricity Load Forecasting Using Hybrid Prophet-LSTM Model Optimized by BPNN, *Energy reports*, 8, 1678-1686.
- Bedi J, Toshniwal D, 2019, Deep Learning Framework to Forecast Electricity Demand. *Applied energy*, 238, 1312-1326.
- Belmahdi B, Louzazni M, El Bouardi A, 2022, Comparative Optimization of Global Solar Radiation Forecasting Using Machine Learning and Time Series Models, *Environmental Science and Pollution Research*, 29: 14871-14888.
- Bhola P, Bhardwaj S, 2019, Estimation of Solar Radiation Using Support Vector Regression, *Journal of Information and Optimization Sciences*, 40(2), 339-350.
- Cho K, Van Merriënboer B, Gulcehre C, Bahdanau D, Bougares F, Schwenk H, Bengio Y, 2014, Learning Phrase Representations Using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation, *arXiv preprint arXiv:1406.1078*.
- Çingi A, 2019, Güneş Enerjisi Elektrik Santrallerinde Kullanılan Fotovoltaik Panellerin Enerji Verimliliklerinin Belirlenmesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Kilis.
- Çolak Z, 2025, Derin Öğrenme Modelleri ile Hisse Senedi Fiyat Tahmini: LSTM, GRU, RNN, MLP Modellerinin Karşılaştırmalı Analizi, *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 23(56), 1250-1286.
- Dhaked D K, Dadhich S, Birla D, 2023, Power Output Forecasting of Solar Photovoltaic

- Plant Using LSTM, Green Energy and Intelligent Transportation, 2(5), 100113.
- Eslik A, Sen O, Serttas F, 2024, CNN-LSTM Model for Solar Radiation Prediction: Performance Analysis, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39(4).
- Fara L, Diaconu A, Craciunescu D, Fara S, 2021, Forecasting of Energy Production for Photovoltaic Systems Based on ARIMA and ANN Advanced Models, International Journal of Photoenergy, 2021(1), 6777488.
- Fidan M, Sertsöz M, Kurban M, 2020, A Hybrid Model of 2d-DCT and 2d-Mycielski Algorithm for Hourly Global Solar Irradiation, Advances in Electrical and Computer Engineering, 20(2), 45-54.
- Fidan M, Hocaoglu F O, Gerek Ö N, 2012, Improved Synthetic Wind Speed Generation Using Modified Mycielski Approach, International Journal of Energy Research, 36(13), 1226-1237.
- Gan M, Ding M, Huang Y Z, Dong X P, 2012, The Effect of Different State Sizes on Mycielski Approach for Wind Speed Prediction, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 109, 89-93.
- Goh H H, Lee S W, Chua Q S, Goh K C, Teo K T K, 2016, Wind Energy Assessment Considering Wind Speed Correlation in Malaysia, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1389-1400.
- Goliatt L, Yaseen Z M, 2023, Development of a Hybrid Computational Intelligent Model for Daily Global Solar Radiation Prediction, Expert Systems with Applications, 212, 118295.
- Gupta R, Yadav A K, Jha S K, Pathak P K 2024, A Robust Regressor Model for Estimating Solar Radiation Using An Ensemble Stacking Approach Based on Machine Learning, International Journal of Green Energy, 21(8), 1853-1873.
- Gün A R, 2023, Kısa Dönemli Fotovoltaik Güç Tahmini İçin Geliştirilen Yenilikçi Bir Hibrit Modelin Analizi ve Uygulaması, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, 79s, Bilecik.

- Gürel A E, Ağbulut Ü, Bakır H, Ergün A, Yıldız G, 2023, A State of Art Review on Estimation of Solar Radiation with Various Models, *Heliyon*, 9(2).
- Hocaoğlu F O, Serttas F, 2017, A Novel Hybrid (Mycielski-Markov) Model for Hourly Solar Radiation Forecasting, *Renewable Energy*, 108, 635-643.
- Hocaoğlu F O, Fidan M, Gerek Ö N, 2009, Mycielski Approach for Wind Speed Prediction, *Energy Conversion and Management*, 50(6), 1436-1443.
- Hu Z, Gao Y, Ji S, Mae M, Imaizumi T, 2024, Improved Multistep Ahead Photovoltaic Power Prediction Model Based on LSTM and Self-Attention with Weather Forecast Data, *Applied Energy*, 359, 122709.
- Husain A A, Hasan W Z W, Shafie S, Hamidon M N, Pandey S S, 2018, A Review of Transparent Solar Photovoltaic Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 779-791.
- Jathar L D, Nikam K, Awasarmol U V, Gurav R, Patil J D, Shahapurkar K, Ağbulut Ü, 2024, A Comprehensive Analysis of The Emerging Modern Trends in Research on Photovoltaic Systems and Desalination in The Era of Artificial Intelligence And Machine Learning. *Heliyon*, 10(3).
- Kaysal K, Hocaoğlu F O, 2025, A Novel Three-Segment Solar Radiation Forecasting Model, *Renewable Energy*, 123947.
- Kaysal K, Hocaoğlu F, Yurttakal A, Erbay H, 2025, M/LSTM-GRU Hybrid Model for Solar Radiation Estimation, In *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*, Vol. 78, No. 6, pp. 894-903.
- Kaysal K, Yurttakal A H, Hocaoğlu F O, 2023, Hibrit Derin Öğrenme Yöntemi Kullanılarak Hiperparametre Optimizasyonu ile Yenilenebilir Elektrik Enerjisi Tahmini, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3).
- Kaysal K, Hocaoğlu F O, Oğuz Y, Kaysal A, 2013, Short Term Load Forecasting for A Micro Region Using NNs and Regression Models, In *2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, pp. 177-180, IEEE.

- Kim E, Akhtar M S, Yang O B, 2023, Designing Solar Power Generation Output Forecasting Methods Using Time Series Algorithms, *Electric Power Systems Research*, 216, 109073.
- Konstantinou M, Peratikou S, Charalambides A G, 2021, Solar Photovoltaic Forecasting of Power Output Using LSTM Networks, *Atmosphere*, 12(1), 124.
- Kumari P, Toshniwal D, 2021, Deep Learning Models for Solar Irradiance Forecasting: A Comprehensive Review, *Journal of Cleaner Production*, 318, 128566.
- Lee J, Cho Y, 2022, National-Scale Electricity Peak Load Forecasting: Traditional, Machine Learning, or Hybrid Model?, *Energy*, 239, 122366.
- Lai W, Zhen Z, Wang F, Fu W, Wang J, Zhang X, Ren H, 2024, Sub-Region Division Based Short-Term Regional Distributed PV Power Forecasting Method Considering Spatio-Temporal Correlations, *Energy*, 288, 129716.
- Michael N E, Bansal R C, Ismail A A A, Elnady A, Hasan S, 2024, A Cohesive Structure of Bi-Directional Long-Short-Term Memory BiLSTM-GRU for Predicting Hourly Solar Radiation, *Renewable Energy*, 222, 119943.
- Mirzabe A H, Hajiahmad A, Keyhani A, Mirzaei N, 2022, Approximation of Daily Solar Radiation: A Comprehensive Review on Employing of Regression Models, *Renewable Energy Focus*, 41, 143-159.
- Özdemir T, 2022, Farklı Tipteki Fotovoltaik Sistemlerin Güç Üretimlerinin Analizi ve Yapay Zekaya Dayalı Tahmini, *Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 113s, Düzce.
- Perveen G, Rizwan M, Goel N, Anand P, 2025, Artificial Neural Network Models for Global Solar Energy and Photovoltaic Power Forecasting Over India, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(1), 864-889.
- Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J, 1986, Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323(6088), 533-536.
- Saadati T, Barutcu B, 2025, Forecasting Solar Energy: Leveraging Artificial Intelligence and Machine Learning for Sustainable Energy Solutions, *Journal of Economic*

Surveys.

- Sahin G, Isik G, van Sark W G, 2023, Predictive Modeling of PV Solar Power Plant Efficiency Considering Weather Conditions: A Comparative Analysis of Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression, *Energy Reports*, 10, 2837-2849.
- Saxena N, Kumar R, Rao Y K, Mondloe D S, Dhapekar N K, Sharma A, Yadav A S, 2024, Hybrid KNN-SVM Machine Learning Approach for Solar Power Forecasting, *Environmental Challenges*, 14, 100838.
- Serttas F, Hocaoglu F O, 2025, A Novel Partial Discharge Signal Detection and Estimation Method: Mycielski Algorithm, *Electrical Engineering*, 107(3), 2829-2843.
- Shadab A, Ahmad S, Said S, 2020, Spatial Forecasting of Solar Radiation Using ARIMA Model, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100427.
- Sharadga H, Hajimirza S, Balog R S, Time Series Forecasting of Solar Power Generation for Large-Scale Photovoltaic Plants, *Renewable Energy*, 150, 797-807, 2020.
- Song Z, Xiao F, Chen Z, Madsen H, 2025, Probabilistic Ultra-Short-Term Solar Photovoltaic Power Forecasting Using Natural Gradient Boosting with Attention-Enhanced Neural Networks, *Energy and AI*, 100496.
- Song X, Johnson P, Duck P, 2021, A Novel Combination of Mycielski–Markov, Regime Switching and Jump Diffusion Models for Solar Energy, *Applied Energy*, 301, 117457.
- Suwadana F A, Garniwa P M, Putera D A, Puspita D, Gufron A, Aditya I A, Garniwa I, 2025, Solar Irradiance Estimation in Tropical Regions Using Recurrent Neural Networks and WRF Models. *Energies*, 18(4), 925.
- Teyabeen A A, Elhatmi N B, Essnid A A, Mohamed F, 2024, Estimation of Monthly Global Solar Radiation Over Twelve Major Cities of Libya, *Energy and Built Environment*, 5(1), 46-57.
- Wang L, Lu Y, Wang Z, Li H, Zhang M, 2024, Hourly Solar Radiation Estimation and Uncertainty Quantification Using Hybrid Models, *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews, 202, 114727.
- Wang L, Mao M, Xie J, Liao Z, Zhang H, Li H, 2023, Accurate Solar PV Power Prediction Interval Method Based on Frequency-Domain Decomposition and LSTM Model, *Energy*, 262, 125592.
- Wang F, Li J, Zhen Z, Wang C, Ren H, Ma H, Huang L, 2022, Cloud Feature Extraction and Fluctuation Pattern Recognition Based Ultrashort-Term Regional PV Power Forecasting, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(5), 6752-6767.
- Wen L, Zhou K, Yang S, Lu X, 2019, Optimal Load Dispatch of Community Microgrid With Deep Learning Based Solar Power and Load Forecasting, *Energy*, 171, 1053-1065.
- Wentz V H, Maciel J N, Gimenez Ledesma J J, Ando Junior O H, 2022, Solar Irradiance Forecasting to Short-Term PV Power: Accuracy Comparison of ANN and LSTM Models, *Energies*, 15(7), 2457.
- Xiao Z, Huang X, Liu J, Li C, Tai Y, 2023, A Novel Method Based on Time Series Ensemble Model for Hourly Photovoltaic Power Prediction, *Energy*, 276, 127542.
- Yahiaoui S, Assas O, 2024, Comparison of Solar Radiation Models Using Meteorological Parameters, *Energy Systems*, 15(2), 863-897.
- Yang X, Ji Y, Wang X, Niu M, Long S, Xie J, Sun Y, 2023, Simplified Method for Predicting Hourly Global Solar Radiation Using Extraterrestrial Radiation and Limited Weather Forecast Parameters, *Energies*, 16(7), 3215.
- Zhang R, Xu Z, Liu S, Fu K, Zhang J, 2025, Prediction of Ultra-Short-Term Photovoltaic Power Using Bilstm-Informer Based on Secondary Decomposition, *Energies*, 18(6), 1485.
- Zhang G, Band S S, Jun C, Bateni S M, Chuang H M, Turabieh H, Moslehpour M, 2021, Solar Radiation Estimation in Different Climates with Meteorological Variables Using Bayesian Model Averaging and New Soft Computing Models, *Energy Reports*, 7, 8973-8996.
- Zhou H, Zheng P, Dong J, Liu J, Nakanishi Y, 2024, Interpretable Feature Selection and Deep Learning for Short-Term Probabilistic PV Power Forecasting in Buildings

Using Local Monitoring Data, Applied Energy, 376, 124271.

Zhou Y, Liu Y, Wang D, Liu X, Wang Y, 2021, A Review on Global Solar Radiation Prediction with Machine Learning Models in A Comprehensive Perspective, Energy Conversion and Management, 235, 113960.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050/>, IEA 2025, 10.02.2025.
- 2- <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik/>, ETKB 2025, 31.03.2025.
- 3- https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/Türkiye_Ulusal_Enerji_Planı.pdf , EİGM 2025, 31.03.2025.
- 4- <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes/>, ETKB 2025,11.03.2025.
- 5- <https://www.gnssolar.com/icerik/860/turkiye-gunes-haritasi/>, GNSSOLAR 2025, 11.03.2025.



Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 47(2), 2554960.

Kaysal A, K ro lu S, O uz Y, Kaysal K, 2023, Design and experimental implementation of DC-DC converter based self-tuning fuzzy PI controller, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38(1), 483-495.

E-SCI Makaleler:

Kaysal K, Hoca lu F O, Kaysal A, 2024, Baskı Devre Kartı Delim G zergahlarının Meta-Sezgisel Algoritmalar Kullanılarak Optimizasyonu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(6), 763-770.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

Kaysal K, Hoca lu F O, 2023, Modelling of Different Mother Wavelet Transforms With Artificial Neural Networks for Estimation of Solar Radiation, Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering, 24(2), 141-154.

Kaysal K, Yurttakal A H, Hoca lu F O, 2023, Hibrit Derin   renme Yöntemi Kullanılarak Hiperparametre Optimizasyonu ile Yenilenebilir Elektrik Enerjisi Tahmini, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(3).

Eşlik A H, Yıldız E, Güneş İ, Kaysal K, Yalvaç M,  ınar S M, 2023, Model Tabanlı Bir PV Emülatör Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(4), 1109-1118.

Kaysal K, Akarslan E, Hoca lu F O, 2022, Türkiye Kısa Dönem Elektrik Yük Talep Tahmininde Makine   renmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Bilecik  eyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 693-702.

Kaysal K, Hoca lu F O, Kaysal A, 2021, Design And Experimental Implementation of Passive Battery Management Systems Using Arm-Based Microprocessors. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(1), 26-39.

Hoca lu F O, Kaysal K, Kaysal A 2015, Y k Tahmini İçin Hibrit (YSA ve regresyon)

Model, Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 3(2), 33-39.

Oğuz Y, Kaysal A, Kaysal K, 2015, Adıgüzel Hydroelectric Power Plant Modeling and Load-Frequency Control, Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 3(1), 34-41.

Uluslararası Bilimsel Konferanslarda Tam Metin Yayınlanan Bildiriler:

Kaysal K, Hocaoglu F O, 2024, Region-Specific Solar Performance Estimation: The Role of Data Acquisition Systems, In 2024 Global Energy Conference (GEC) (pp. 75-80). IEEE.

Kaysal K, Hocaoglu F O, 2024, A Research on The Effect of Class Numbers for An Algorithmical Based Solar Radiation Class Estimation, 8th International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences (CMES), 119-125.

Eren A, Sarisoy H, Kaysal K, 2024, Forecasting Seasonal Energy Production with K-Nearest Neighbors Regression Method, 8th International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences (CMES), 77-83.

Kaysal K, Hocaoglu F O, 2023, A Preliminary Study for Solar Radiation State Prediction, 15th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, and Applied Sciences, 173-179.

Kaysal K, Hocaoglu F O, Öztürk N, 2022, Comparison The Performance of Different Optimization Methods in Artificial Intelligence Based Electricity Production Forecasting, In 2022 10th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), pp. 236-239, IEEE.

Kaysal A, Köroglu S, Oguz Y, Kaysal K, 2018, Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems Approaches to Forecast the Electricity Data for Load Demand, an Analysis of Dinar District Case, In 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-6). IEEE.

Kaysal K, Hocaoglu F O, Oğuz Y, Kaysal A, 2013, Short Term Load Forecasting For A

Micro Region Using Nns And Regression Models, In 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp. 177-180, IEEE.

Uluslararası Bilimsel Konferanslarda Sunulan Özet Bildiriler:

Arınık Y, Kaysal K, 2023, Toplu Ulaşımında Akıllı Sistemler, 11th International Vocational Schools Symposium.

Ulusal Bilimsel Konferanslarda Sunulan Özet Bildiriler:

Kaysal K, Kaysal A, 2014, Mikrodenetleyici Tabanlı İki Eksenli Güneş Takip Sistemi Tasarımı, II. Ulusal Sinanpasa Meslek Yüksekokulu Kongresi.

Diğer konular: Aşağıda belirtilmiştir.

Proje:

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1002-A, Hızlı Destek, 123E624 numaralı projeyle desteklenmiştir.

Başarı:

Tez çalışması, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı tarafından yürütülen 2250- Lisansüstü Bursları Performans Programı kapsamında 2024 ve 2025 yıllarında toplam iki kez performans bursu ile desteklenmiştir.