



**ENERJİ FARKINDALIKLI VE OPTİMİZASYON TABANLI AKILLI PV
TEMİZLEME SİSTEMİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Emrah ÜSTÜNDAĞ

Danışman

Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Aralık 2025

Bu tez çalışması 22.FEN.BIL.27 numaralı proje ile BAP tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ENERJİ FARKINDALIKLI VE OPTİMİZASYON TABANLI
AKILLI PV TEMİZLEME SİSTEMİ TASARIMI

Emrah ÜSTÜNDAĞ

Danışman

Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Aralık 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Emrah ÜSTÜNDAĞ tarafından hazırlanan “ENERJİ FARKINDALIKLI VE OPTİMİZASYON TABANLI AKILLI PV TEMİZLEME SİSTEMİ TASARIMI” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 08 / 12 / 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. Fatih Onur HOCAOĞLU Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	
Üye	: Doç. Dr. Emre Akarslan Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	
Üye	: Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	
Üye	: Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi	
Üye	: Prof. Dr. Ömer Nezih GEREK Eskişehir Teknik Üniversitesi, 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.

13 / 11 / 2025

İmza

Emrah ÜSTÜNDAĞ

ÖZET

Doktora Tezi

ENERJİ FARKINDALIKLI VE OPTİMİZASYON TABANLI AKILLI PV TEMİZLEME SİSTEMİ TASARIMI

Emrah ÜSTÜNDAĞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

Bu tez çalışmasında, fotovoltaik (photovoltaic – PV) sistemlerde enerji üretim verimliliğini düşüren iki temel problem bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır: (i) kirlenme kaynaklı güç kayıplarının modellenmesi ve öngörülmesi, (ii) panel temizleme süreçlerinde enerji ve kaynak tüketiminin optimizasyonu. Literatürdeki mevcut çalışmaların çoğu, kirlenmenin paneller üzerinde homojen (uniform) dağıldığı varsayımına dayanmakta ve bu nedenle gerçek saha koşullarındaki performans kayıplarını yeterince temsil edememektedir.

Bu tezde, ilk olarak homojen olmayan (non-uniform) kirlenmelerin panel çıkış karakteristiğine etkisini fiziksel olarak modelleyen yeni bir Geçirgenlik Dağılımı (Transmittance Distribution – TD) yaklaşımı geliştirilmiştir. TD'nin çıkarımı, Eşdeğer Devre Modeli (Equivalent Circuit Model – ECM) ve optimizasyon tabanlı çözüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, ölçülen I–V eğrileri ile yüksek doğrulukta doğrulanmıştır. Geliştirilen yöntem, çevresel değişkenlerin (ışınım, sıcaklık) etkilerini içeren doğrusal olmayan durumları da açıklayabilmekte ve mevcut modellerin aksine non-uniform kirlenme koşullarında panelin gerçek güç kaybını tahmin edebilmektedir.

İkinci aşamada, temizleme kararı ve güzergâh planlaması konuları ele alınmış, bu amaçla Yinelemeli Tablo Doğrulama Algoritması (Recursive Tabular Validation Algorithm – RTVA) tabanlı yeni bir enerji farkındalıklı güzergâh optimizasyon yöntemi

geliştirilmiştir. RTVA algoritması, görüntü işleme ile tespit edilen kısmi kirlenme koordinatlarını dikkate alarak temizleme sırasını ve robotik hareket güzergâhını optimize etmekte, böylece gereksiz kaynak kullanımını minimize etmektedir.

Bu iki yaklaşım (TD optimizasyonu ve RTVA güzergâh planlama), ölçülen verim düşüşünden kirlenme dağılımının çıkarılmasından, gelecekteki enerji kaybı tahmini ve optimum temizlik kararına uzanan bütünleşik bir karar destek sistemi oluşturmaktadır. Elde edilen bulgular, PV sistemlerinde enerji üretim verimliliğinin artırılması, temizlik süreçlerinin maliyet-etkin hâle getirilmesi ve sürdürülebilir işletme stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

2025, xvii + 141 sayfa

Anahtar Kelimeler: Panel temizleme, Kirlenme etkisi, Homojen olmayan kirlenme, Geçirgenlik dağılımı, Güzergâh optimizasyonu, Enerji verimliliği, Eşdeğer devre modeli, Görüntü işleme.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN OF AN ENERGY-AWARE AND OPTIMIZATION-BASED INTELLIGENT PV CLEANING SYSTEM

Emrah ÜSTÜNDAĞ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric and Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOGLU

In this thesis, two fundamental challenges that reduce energy production efficiency in photovoltaic (PV) systems are addressed through an integrated approach: (i) modeling and prediction of power losses caused by surface soiling, and (ii) optimization of energy and resource consumption in panel cleaning processes. Most studies in the literature assume that contamination on PV panels is uniformly distributed; however, such an assumption does not adequately represent real-world performance degradation under field conditions.

In the first stage of this study, a novel Transmittance Distribution (TD) approach was developed to physically model the effect of non-uniform contamination on the output characteristics of PV modules. The TD extraction was carried out using the Equivalent Circuit Model (ECM) combined with optimization-based solution techniques, and the results were validated against experimentally measured I–V curves with high accuracy. The proposed method is capable of explaining nonlinear behaviors influenced by environmental factors such as irradiance and temperature and, unlike conventional models, can accurately predict the actual power loss of panels under non-uniform soiling conditions.

In the second stage, cleaning decision-making and path planning were investigated. For this purpose, a new energy-aware route optimization method based on the Recursive

Tabular Validation Algorithm (RTVA) was developed. The RTVA algorithm optimizes the cleaning sequence and robotic motion path by considering partially soiled coordinates detected through image processing (IP), thereby minimizing unnecessary resource consumption.

Together, these two approaches—TD optimization and RTVA path planning—form an integrated decision-support system that spans the entire process from deriving the contamination distribution based on measured efficiency loss to predicting future energy loss and determining the optimal cleaning strategy. The findings contribute to improving energy production efficiency, enhancing cost-effectiveness of cleaning operations, and promoting sustainable operation strategies for PV systems.

2025, xvii + 141 pages

Keywords: Panel cleaning, Soiling effect, Non-uniform contamination, Transmittance distribution, Route optimization, Energy efficiency, Equivalent circuit model, Image processing.

TEŐEKKÖR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOğLU'na, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma, ayrıca 22.FEN.BİL.27 numaralı proje desteği için BAP birimine teőekk r ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme, bu zorlu süreçte her zaman yanımda hissettiğim eşim Z merya  ST NDAğ'a ve bu süre zarfında aramıza katılan ve çalışmalarımın motivasyon kaynağı olan sevgili kızım Hira Nil'e teőekk r ederim.

Emrah  ST NDAğ

Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Fotovoltaik Sistemlerde Verimlilik Sorunları	4
2.1.1 Kirlenme Kavramı	4
2.1.2 Kirlenmenin PV Performansına Etkisi	5
2.1.3 Non-Uniform Kirlilik.....	7
2.1.3.1 Gölgeleme Etkisi ve Panel Konfigürasyonu	8
2.1.3.2 Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT).....	9
2.2 PV Panel Temizleme Sistemleri	11
2.2.1 Manuel Temizleme Sistemleri	11
2.2.2 Robotik ve Sensör Tabanlı Yaklaşımlar	12
2.2.2.1 Yarı Otomatik Temizleme Sistemleri	12
2.2.2.2 Tam Otomatik Temizleme Sistemleri	14
2.2.3 Susuz Temizleme Önerileri	17
2.3 Kirlenme Tespit Yöntemleri.....	19
2.3.1 Lokasyon Bazlı Yaklaşımlar.....	19
2.3.2 Ölçüm Tabanlı Yaklaşımlar.....	20
2.3.3 Görüntü İşleme Tabanlı Yaklaşımlar.....	22
2.3.4 Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Tabanlı Sınıflandırmalar	23
2.4 Temizlik Takvimi ve Karar Verme Mekanizmaları	24
2.5 Literatürdeki Açık Noktalar ve Çalışmanın Katkısı	28
3. MATERYAL ve METOT	31
3.1 Geliştirilen Temizleme Robotu Tasarımı	32
3.1.1 Mekanik Detaylar ve İmalat Süreci	34
3.1.2 Akıllı Karar Verme Mekanizması.....	38

3.1.2.1 Kontrol Mimarisi ve Donanım Gerçeklemesi	38
3.1.2.2 Enerji Kayıp Tahmini ve Analitik Çerçeve.....	41
3.1.2.3 Hareket Sisteminin Enerji Tüketim Modeli	43
3.2 Non-Uniform Kirlenme Tespiti ve Modellemesi	45
3.2.1 Görüntü İşleme ile Kirlenme Tespiti	46
3.2.2 Geçirgenlik Dağılımı Kavramı	53
3.2.2.1 PV Hücresi Eşdeğer Devre Modeli	55
3.2.2.2 Geçirgenlik Kavramının Eşdeğer Devrede Temsili	58
3.2.2.3 Panel Yüzeyi Boyunca Geçirgenlik Dağılımı	61
3.2.2.4 Yusufçuk (Dragonfly) Algoritması ile Yüzeydeki Geçirgenlik Dağılımının Çıkarılması	63
3.3 Sistemin Enerji Sarfıyat Optimizasyonu	66
3.3.1 Yinelemeli Tablo Doğrulama Algoritması (RTVA).....	68
3.3.1.1 Rota Planlamasına Tablo Tabanlı İki Boyutlu Yaklaşım.....	70
3.3.1.2 Tablonun Doğrulama Mantığı ve Rota Oluşturma Kısıtları	71
3.3.1.3 Turnuva Seçim Yöntemi	72
3.3.1.4 Açık Çevrim Başlangıcı ve Yol Seçim Stratejisi	73
3.3.1.5 Açık Çevrimlerin Rotaya Dönüştürülmesi.....	75
3.3.1.6 Kesişen Yol Optimizasyonu.....	76
4. BULGULAR	79
4.1 Eşdeğer Devre Modellemesi ile Panel Seviyesinde Simülasyonlar	79
4.2 Yüzeydeki Geçirgenlik Dağılımının I-V Eğrilerinden Çıkarılması	86
4.2.1 Deneysel Kurulum ve Ölçüm Sistemi	86
4.2.2 TD'nin Eşdeğer Devre Entegrasyonu	87
4.2.3 TD Parametre Aralığı.....	88
4.2.4 Optimizasyon Süreci ve Yakınsama	89
4.2.5 Görüntü İşleme ile Geçirgenlik Dağılımının Çıkarımı	91
4.2.6 Sonuçların Karşılaştırılması.....	95
4.3 RTVA Yöntemi ile Optimize Edilmiş Enerji Sarfıyatı (CC)	98
4.3.1 Görüntü İşleme Hattı ile Kirli Düğümün Çıkarılması	99
4.3.2 RTVA ile Rota Optimizasyonu.....	99
4.3.3 Ölçeklenebilirlik ve Çok Senaryolu Performans Analizi	101
4.3.4 RTVA Genel Performans Değerlendirmesi	104
4.4 Karar Verme Mekanizmasının Test Edilmesi	106

4.4.1 Güneş Işınımı Tahmini ve Meteorolojik Tahminler	107
4.4.2 Test Düzeninde Yapılan Ölçümler	113
4.4.2.1 Verim Analizi ve Kirlenme Hızı Modeli	114
4.4.3 Tahmin Modelinin Doğrulanması	115
4.4.4 Değerlendirme	117
4.5 Kısıtlar ve Kabuller	119
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	121
5.1 Mekanik Sistem ve Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirme	121
5.2 Non-Uniform Kirlenme Modeli ve Geçirgenlik Dağılımı Yaklaşımı	122
5.3 Enerji Farkındalıklı RTVA Optimizasyonu ve Karar Verme Mekanizması	122
5.4 Genel Değerlendirme ve Sürdürülebilirlik Perspektifi	123
5.5 Sonuç ve Öneriler	124
6. KAYNAKLAR	126
ÖZGEÇMİŞ	140

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

mm	Milimetre
cm ²	Santimetre kare
µm	Mikrometre
W	Watt
m ²	Metre kare
°C	Celsius derece
W-sa	Watt-saat
J	Joule
K	Kelvin
µ _i	Akım-sıcaklık katsayısı
µ _v	Gerilim-sıcaklık katsayısı
µ _p	Güç-sıcaklık katsayısı
µ _τ	Geçirgenlik dağılımı ortalaması
σ _τ	Geçirgenlik dağılımı standart sapması
τ	Geçirgenlik
V	Volt
A	Amper
mA	Miliamper

Kısaltmalar

ACO	Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization)
ANN	Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)
ASS	Ares kir istasyonu (Ares Soiling Station)
BCO	Arı Kolonisi Optimizasyonu (Bee Colony Optimization)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design)
CC	Temizlik Sarfıyatı (Cleaning Consumption)
CT	Temizleme Zamanı (Cleaning Time)
cGAN	Koşullu Üretici Çekişmeli Ağ (Conditional Generative Adversarial Network)
CNN	Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network)
DBSCAN	Gürültü ayıklayan yoğunluk tabanlı kümeleme (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)
DL	Derin Öğrenme (Deep Learning)
DHA	Geyik Avı Algoritması (Deer Hunting Algorithm)
DOA	Yusufçuk Optimizasyon Algoritması (Dragonfly Optimization Algorithm)
DP	Douglas-Peucker
DT	Karar Ağacı (Decision Tree)
EANN	Geliştirilmiş ANN (Enhanced Artificial Neural Network)
ECM	Eşdeğer Devre Modeli (Equivalent Circuit Model)
EDN	Elman Derin Ağları (Elman Deep Network)
FF	Doldurma Faktörü (Fill Factor)
FMEA	Hata Türleri ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effect

	Analysis)
GA	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
GD	Geçirgenlik Dağılımı (Transmittance Distribution)
GES	Güneş Enerji Santrali
GLCM	Gri-Düzey Eş-Oluşum Matrisi (Gray-Level Co-Occurrence Matrix)
GSO	Ateşböceği Sürüsü Optimizasyonu (Glowworm Swarm Optimization)
GÜRAM	Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi
HBBHO	Biyografi Tabanlı Helianthus Optimizasyonu (Biography-Based Helianthus Optimization)
INC	Artımsal İletkenlik (Incremental Conductance)
IP	Görüntü İşleme (Image Processing)
LCOE	Dengelenmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost of Electricity)
LR	Lojistik Regresyon (Logistic Regression)
LSTM	Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory)
LWIR	Uzun Dalga Kızılötesi (Long-Wave Infrared)
MABE	Ortalama Mutlak Sapma Hatası (Mean Absolute Bias Error)
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error)
MBE	Ortalama Sapma Hatası (Mean Bias Error)
ML	Makine Öğrenmesi (Machine Learning)
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi-Layer Perceptron)
MPP	Maksimum Güç Noktası (Maximum Power Point)
MPPT	MPP Takibi (MPP Tracking)
MST	Minimum Kapsayan Ağaç (Minimum Spanning Tree)
NNA	En Yakın Komşuluk Algoritması (Nearest Neighbor Algorithm)
PIO	Yol Kesişimi İyileştiricisi (Path-Intersection Optimizer)
PO	Parametre Optimizasyonu
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
PV	Fotovoltaik (Photovoltaic)
P&O	Sars ve Gözle (Perturb and Observe)
RF	Rastgele Orman (Random Forest)
RMSE	Hata Kareleri Ortalamalarının Kökü (Root Mean Square Error)
RTVA	Yinelemeli Tablo Doğrulama Algoritması (Recursive Tabular Validation Algorithm)
SA	Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)
STC	Standart Test Koşulları (Standard Test Conditions)
SVM	Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine)
TSP	Gezgin Satıcı Problemi (Traveling Salesman Problem)
USA	Amerika Birleşik Devletleri (United States of America)
VMD	Varyasyonel Kip Ayrıştırma (Variational Mode Decomposition)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 PV modül hücre dizisinde kısmi gölgelenme ve baypas diyotu aktivasyonu şeması	2
Şekil 2.1 PV modüller yüzeyinde kirlenmeye bağlı hot-spot oluşumunun a) Şematik Gösterimi b) Termal Görüntüsü	5
Şekil 2.2 Panel üzerinde biriken toz miktarının panel çıkış gücüne etkisi .(Panat ve Varanasi, 2022).....	7
Şekil 2.3 Konfigürasyon stratejileri (Ahmad vd. 2025)	9
Şekil 2.4 PV sistemlerde MPPT kontrollü güç dönüşümünün blok diyagramı	10
Şekil 2.5 MPP takibi gösterimi	10
Şekil 2.6 PV panellerin manuel yöntemle temizlenmesi uygulaması	12
Şekil 2.7 Yarı otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – I: a) Ronnaronglit ve Maneerat (2019), b) Yan vd. (2020), c) Sundaram vd. (2019), d) Park vd. (2018), e) Mousavi ve Farahani (2022).....	13
Şekil 2.8 Yarı otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – II: a) Akyazı vd. (2019), b) Habib vd. (2021).....	14
Şekil 2.9 Tam otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – I: a) Kargacıoğlu (2018), b) Mutluer ve Erat (2019), c) Borawake vd. (2025), d) Oufettoul vd. (2025)	15
Şekil 2.10 Tam otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – II: a) Perarasi vd. (2021), b) Hashim vd. (2019), c) Ahmed vd. (2025), d) Kishor vd. (2025)	16
Şekil 2.11 Akustik dalga yöntemi ile temassız temizleme uygulaması (Alagöz vd. 2023)	18
Şekil 2.12 Elektrostatik itme kuvveti ile panel yüzeyinden partikül uzaklaştırma prensibi (Panat ve Varanasi, 2022).....	18

Şekil 2.13 Kirlenmeye bağlı günlük kayıp grafiği (Abraim vd. 2023)	24
Şekil 3.1 İki eksenli otonom panel temizleme sistemi ve kontrol mimarisi şeması.....	32
Şekil 3.2 Tasarlanan robotik sistemin CAD çizimleri.....	34
Şekil 3.3 Mekanik sistem inşasında kullanılan malzemeler.....	35
Şekil 3.4 Metal sacların lazer kesim için CAD çizimi	36
Şekil 3.5 İmalat aşaması ve prototipin kurulumu (GÜRAM)	37
Şekil 3.6 Geliştirilen temizleme sisteminin donanım ve kontrol mimarisi: (a) deney düzeneği; (b) veri toplama ve kontrol akışı	40
Şekil 3.7 Mikrodenetleyici üzerinde gerçekleştirilen kirlenme tespiti ve temizlik aktivasyonuna ilişkin karar akış diyagramı.	40
Şekil 3.8 Prototip sistemin tam yüzey temizleme rotasının şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.9 Panel yüzeyinde non-uniform kirlenme dağılımının 4×9 hücreli ızgara modeliyle gösterimi.	46
Şekil 3.10 Önerilen temizleme sisteminde kir tespiti ve koordinat çıkarımı için kullanılan IP süreci.	49
Şekil 3.11 Panel sınırlarının tespiti süreci: (a) orijinal görüntü, (b) dört baskın köşenin (yeşil daireler) bulunduğu en büyük kontur, (c) köşe noktalarından elde edilen yeşil dikdörtgen panel tespiti.	50
Şekil 3.12 Arka plan maskeleyme işlemi: (a) panel köşelerinden üretilen ikili maske, (b) sadece panel yüzeyini gösteren sonuç görüntü.....	51
Şekil 3.13 Perspektif dönüşümü sonucu elde edilen üstten görünüm (3620×4330 piksel).	52
Şekil 3.14 Toz renk değerlerine karşılık gelen tipik Hue aralığı.....	52
Şekil 3.15 Toz birikimli bir PV panel için HSV ayrıştırma ve filtreleme sonuçları.	53

Şekil 3.16 Güneş hücresinin tek diyotlu eşdeğer devre modeli.	56
Şekil 3.17 Çalışmada kullanılan 25 W monokristal panel	62
Şekil 3.18 DOA ile z-skoru normalizasyonuna dayalı TD optimizasyon sürecinin genel akış diyagramı.	66
Şekil 3.19 Önerilen RTVA mimarisinin blok diyagramı.	70
Şekil 3.20 RTVA arama tablosunda (lookup table) kural ihlali yapan kenarların elenmesi ve hedef odaklı yol seçimi süreci.	72
Şekil 3.21 İç bağlantıların daraltılması yoluyla kapalı döngülerin açık çevrimlere dönüştürülmesi.	74
Şekil 3.22 Kural tabanlı filtreleme sonrası seçilebilir mesafe matrisi.....	75
Şekil 3.23 Yol Kesişimi İyileştiricisi (PIO) kavramı. (Siyah yollar mevcut rotaları, kırmızılar kesişimleri, sarı ve mavi yollar ise alternatif bağlantıları göstermektedir.)... 77	77
Şekil 4.1 PO ile bulunan I-V eğrisi ve ölçülen I-V eğrisi.	79
Şekil 4.2 Farklı sıcaklık ve ışıınım koşullarında panel çıkış gücü ısı haritası.....	80
Şekil 4.3 Ortalama %20 kirliliğin a) uniform($\sigma=0$), b) $\sigma=0.20$, ve ortalama %57 kirliliğin c) $\sigma=0.29$ standart sapma değerlerinde dağılması ile farklı ışıınım değerlerinde I-V eğrileri.....	81
Şekil 4.4 Farklı ışıınım koşullarında panel çıkış parametrelerinin STC değerlerine göre değişimi	81
Şekil 4.5 STC’de TD’ye bağlı olarak panel çıkış gücünün değişimi	83
Şekil 4.6 Ortalama %20 non-uniform kirliliğe sahip panelin STC koşullarında ve farklı standart sapma dağılımına göre I-V eğrileri	84
Şekil 4.7 Ortalama %20 non-uniform kirliliğe sahip panelin STC koşullarında ve farklı standart sapma dağılımına göre a) Doldurma Faktörü (FF) b) Maksimum Güç Noktası (MPP) değişimi.....	84

Şekil 4.8 Farklı baypas diyotları ile panelin korunması durumunda 500 W/m ² ve 1000 W/m ² ışıınım değerlerinde I-V ve P-V grafikleri.....	85
Şekil 4.9 Ölçüm sistemi	86
Şekil 4.10 Çıkarılan TD kullanılarak I-V eğrisi tahmini blok şeması.....	87
Şekil 4.11 Farklı kirlenme tiplerine göre temsili panel görüntüleri ve karşılık gelen I–V karakteristikleri: a) Homojen yumuşak kirlenme, b) Kısmi yumuşak kirlenme, c) Temiz modül (kısmi gölgelenme), d) Yoğun kısmi kirlenme	88
Şekil 4.12 Kirli panel görüntüsü ve TD optimizasyonu için kullanılan I–V ölçümleri .	89
Şekil 4.13 Optimizasyon sürecinde hata ve çözüm değerlerinin değişimi.....	89
Şekil 4.14 Optimizasyon sürecinde iterasyon sayısına bağlı olarak I–V eğrisindeki değişimler ve elde edilen ara çözümler	90
Şekil 4.15 Optimizasyon işlemiyle belirlenen geçirgenlik dağılımının hücre düzeyinde normalize edilmiş ısı haritası.....	90
Şekil 4.16 Optimizasyon tabanlı model sonuçları: a) Ölçülen ve optimize edilen I-V grafikleri (T = 20.8 °C, G = 718 W/m ²) b) Ölçülen ve tahmin edilen I-V grafikleri (T = 18.3 °C, G = 625 W/m ²)	91
Şekil 4.17 IP adımlarıyla elde edilen a) panel, b) köşe koordinatları, c) maske, d) maskelenmiş panel ve e) perspektif düzeltilmiş görüntüsü).....	92
Şekil 4.18 Perspektif dönüştürülmüş panel üzerinde HSV maskesiyle tozlu alanların çıkarımı.....	93
Şekil 4.19 Panelin görüntüsünde TD çıkarımı (9×4 ızgarada hücre düzeyinde toz yoğunluğu ısı haritası)	93
Şekil 4.20 a) optimizasyon, b) ölçekli IP, c) orijinal boyutta IP ile elde edilen TD ısı haritası	94
Şekil 4.21 a) optimizasyon, b) ölçekli IP, c) orijinal boyutta IP ile elde edilen normalize edilmiş TD ısı haritası	95

Şekil 4.22 Kirlenme tespiti için sıralı IP aşamaları (ön işleme → panel sınırı/maskeleme → perspektif düzeltme → HSV tabanlı maskeleme → koordinat çıkarımı).....	98
Şekil 4.23 RTVA rota oluşumu ve optimizasyon evreleri: (a) Açgözlü (Greedy) seçimler; (b) Ana hedef (alt-hedef-1 ile aynı anda); (c) PIO ilk düzeltme; (d) Alt-hedef-2 (kesişimsiz tur)	99
Şekil 4.24 Rota verimliliğinin görsel karşılaştırması: (a) NNA ve (b) NNA + 2-Opt .	100
Şekil 4.25 20 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2))	101
Şekil 4.26 40 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2))	102
Şekil 4.27 100 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2)).....	102
Şekil 4.28 250 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2)).....	103
Şekil 4.29 Saatlik güneş ışıınımı ve sıcaklık verilerinin zaman serisi gösterimi	108
Şekil 4.30 Komşu piksel korelasyon grafikleri	109
Şekil 4.31 (a) Işıınım verisinin (b) Sıcaklık verisinin (c) Sıcaklık türevinin iki boyutlu resim olarak temsili	110
Şekil 4.32 DOA algoritması ile elde edilen en iyi RMSE değerine ait hata yüzey grafikleri	112
Şekil 4.33 09–13 Nisan tarihli ölçümler: üstte periyodik temizlik (mavi) ve otomatik karar (kırmızı) panellerinin referansa göre güç kayıpları; altta zamana bağlı ışıınım, sıcaklık ve referans panel üretimleri (yeşil)	114
Şekil 4.34 09–13 Nisan ölçüm periyodunda verim değişimleri ve elde edilen kirlenme hızı fonksiyonları.....	115

Şekil 4.35 17–20 Nisan döneminde periyodik (mavi) ve otomatik karar (kırmızı) panellerin tahmini kayıpları; altta ısıtım, sıcaklık ve referans panel üretimleri (yeşil) 115

Şekil 4.36 17–20 Nisan döneminde periyodik (mavi) ve otomatik karar (kırmızı) panellerin ölçülen kayıpları; altta ısıtım, sıcaklık ve referans panel üretimleri (yeşil) 116

Şekil 4.37 Ölçülen ve modellenen panel çıkış güçleri korelasyonu..... 117



ÇİZELGELER DİZİNİ

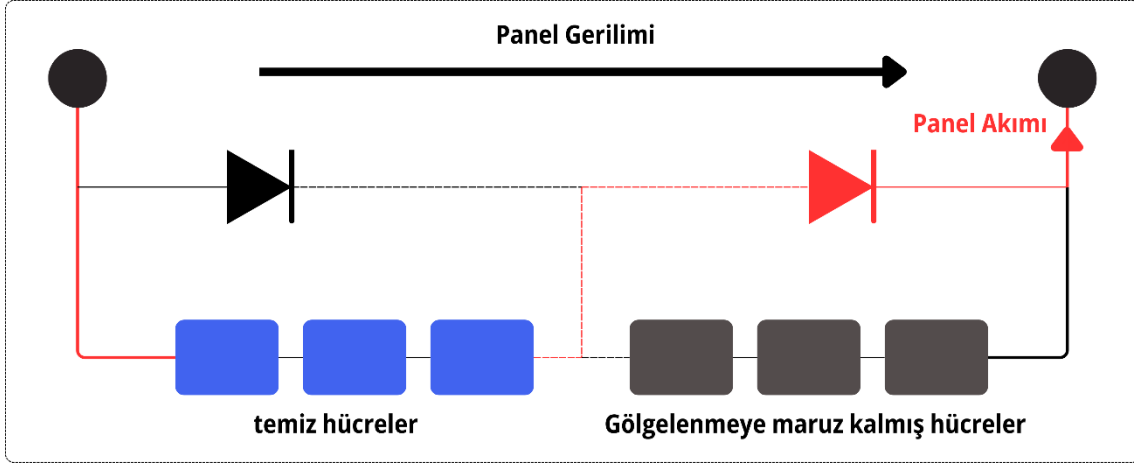
Sayfa

Çizelge 2.1 Fotovoltaik sistemlerde karar verme mekanizmaları üzerine literatür özeti	27
Çizelge 2.2 Mevcut PV panel temizleme yaklaşımlarının karşılaştırmalı özeti.....	29
Çizelge 3.1 Step motor sürücülerinin teknik özellikleri ile güç tüketim parametreleri .	43
Çizelge 3.2 Literatürdeki görüntü ile kirlenme tespit yöntemleri ile bu çalışmanın karşılaştırması.....	47
Çizelge 3.3 Diyot Parametreleri	57
Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan 25 W. Monokristal güneş paneli katalog değerleri ..	57
Çizelge 4.1 PO ile bulunan ECM parametreleri.....	80
Çizelge 4.2 Farklı koşullar altında çıkarılan eğriler için RMSE ve MPP farkları.....	91
Çizelge 4.3 PV kirlenmesinin tespitine yönelik literatür özeti ve bu çalışma ile karşılaştırma	95
Çizelge 4.4 Rota optimizasyonunun geleneksel optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırmalı performansı	100
Çizelge 4.5 Farklı düğüm ölçeklerinde RTVA ve karşılaştırmalı yöntemlerin performansı.....	104
Çizelge 4.6 Mevcut optimizasyon algoritmalarının temel özelliklerinin karşılaştırılması	106
Çizelge 4.7 Meta-Sezgisel algoritmalara göre LPF performansları	111
Çizelge 4.8 Mevcut çalışmalar ile LPF'nin performans karşılaştırması	112
Çizelge 4.9 Karar verme mekanizması test senaryoları için karşılaştırmalı enerji ve verim analizi	117

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynakları arasında en hızlı gelişim gösteren alanlardan biridir. MIT üniversitesinde yapılan çalışmada, 2030 yılında dünya enerji üretiminin %10'unun güneş panellerinden sağlanacağı tahmin edilmektedir (Panat ve Varanasi 2022). Fotovoltaik (PV) sistemlerin yaygınlaşması ile birlikte bu sistemlerin uzun vadeli verimliliklerinin korunması büyük önem taşımaktadır. Ancak sahada kurulu PV paneller, çevresel koşullara bağlı olarak farklı oranlarda kirliliğe maruz kalmaktadır. Toz, kuş pislikleri, polen, endüstriyel atıklar ve yağmur sonrası yüzeyde biriken tortular gibi etkenler, panellerin ışık geçirgenliğini düşürerek üretim kayıplarına yol açmaktadır (Xu vd. 2020). Bu durum yalnızca enerji verimliliğini azaltmakla kalmayıp, yatırımın geri dönüş süresini de olumsuz etkilemektedir.

Literatürdeki çalışmalarda genellikle kirliliğin panel yüzeyi boyunca uniform (homojen) olduğu varsayılmıştır. Oysa gerçek saha koşullarında kirlenme non-uniform (homojen olmayan) dağılım gösterebilmektedir. Panelin alt kısmında toz birikimi, kuş pisliklerinin lokal gölgelenmeye neden olması veya farklı bölgelerde değişen toz yoğunluğu, panelin elektriksel karakteristiklerini karmaşık şekilde etkilemektedir (Ayop vd. 2020). Bu nedenle non-uniform kirlenmelerin modellenmesi ve etkilerinin incelenmesi, PV sistemlerin daha doğru bir şekilde izlenebilmesi açısından kritik bir gerekliliktir. Hücrelerin üzerinde farklı kirlilikler hücrelere nüfus eden güneş ışınımının değerini düşürerek panel çıkışında lineer olmayan, kolay ilişkilendirilemeyen sonuçlar doğurmaktadır. Şekil 1.1'de seri bağlı hücrelerin kısmi gölgelenmeye maruz kalmış durumu verilmiştir. Kirlenmiş yüzey oranı ile panel çıkış gücü arasındaki ilişki, PV modülün lineer olmayan karakteristiği nedeniyle kolaylıkla modellenememektedir.



Şekil 1.1 PV modül hücre dizisinde kısmi gölgelenme ve baypas diyotu aktivasyonu şeması.

Şekilde görüldüğü gibi baypas diyotları bağlı bulunduğu hücrelerin gölgelenmesinden kaynaklı ışınım geçişi azalması neticesinde, bu hücrelerin tüketici olmasını engeller, panel çıkışını ise lineer olmayan bir şekilde değiştirir.

Kirlenme kaynaklı gölgelenme etkilerinin giderilerek sistemin kayıplarının engellenmesi ve gerçek üretim profiline kavuşturulması önemlidir. Bu amaçla, PV panellerin temizlenmesi için geliştirilen yöntemler arasında manuel uygulamalar (Abraim vd. 2023), yarı-otomatik (Yan vd. 2020) ve tam otomatik (Ahmed vd. 2025) robotik sistemler bulunmaktadır. Son yıllarda sensör tabanlı ve yapay zekâ destekli yaklaşımlar (Zhang vd. 2025) ile temizleme takvimleri planlansa da mevcut sistemlerin büyük bir kısmı enerji sarfiyatı, karar verme mekanizmalarının yetersizliği veya işlevsel ve bölgesel kısıtlar gibi sınırlılıklara sahiptir. Bu bağlamda, daha akıllı karar verme algoritmalarına sahip, enerji farkındalığı yüksek ve panel dizileri üzerinde ölçeklenebilir bir temizleme mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, non-uniform kirlenmenin PV paneller üzerindeki etkileri incelenerek, kirlenmenin tespit edilmesi ve temizlenmesi için akıllı sistemler geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında hem panel yüzeyi boyunca geçirgenlik dağılımına (TD) dayalı modelleme yapılmış hem de optimizasyon algoritmaları kullanılarak temizlik işleminde harcanacak enerji sarfiyatı minimize edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla geliştirilen, gömülü sistemlere uyumlu yeni bir rotalama algoritması sayesinde kirli bölgeler en az maliyetle temizlenerek kirlilik kaynaklı enerji kayıpları

giderilmektedir. Önerilen karar verme mekanizması çalıştığı bölgenin zamana bağlı kirlenme hızını modelleyerek gelecek zaman kayıplarını tahmin etmektedir. Ayrıca, özellikle çatı uygulamalarında görülen yer kısıtı ve işçi sağlığı endişelerine çözüm olarak geliştirilen temizleme robotunun optimize edilen enerji sarfiyatı, gelecekteki üretim kaybı ile karşılaştırılarak her zaman enerji verimliliğine dayalı kararlar almaktadır. Böylelikle hem teorik hem de uygulamalı katkılar sağlayan bütüncül bir yaklaşım ortaya konulmuştur.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Fotovoltaik Sistemlerde Verimlilik Sorunları

Fotovoltaik sistemlerin saha performansı, ideal koşullarda belirtilen değerlerin altında gerçekleşmektedir. Bunun temel nedeni, işletme sırasında farklı kaynaklardan gelen kayıplardır. Literatürde, PV sistemlerde görülen bu kayıplar tabela (nameplate), DC derecelendirme (Rating), diyot ve bağlantı kayıpları, hücreler arası uyumsuzluk (mismatch), DC ve AC kablolama, güneş izleme hataları (panel eğimi ve güneş açısı), gölgelenme ve kirlenme gibi başlıklar altında belirtilmektedir (Maghami vd. 2016).

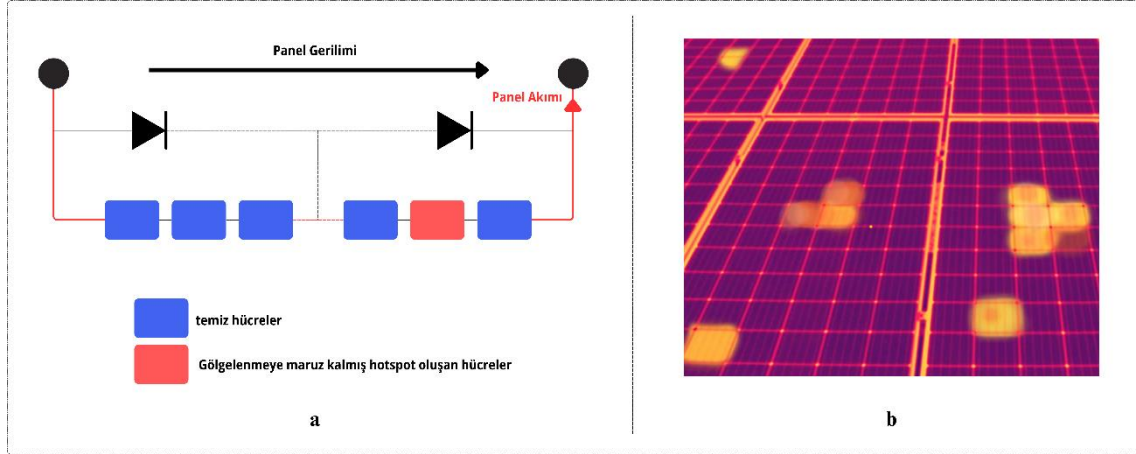
Bu kayıplar arasında özellikle çevresel etkilerden kaynaklanan sıcaklık artışı, gölgelenme ve kirlenme PV modül performansını doğrudan sınırlayan kritik faktörlerdir. (Teo vd. 2012). Hücre sıcaklığındaki yükselme, açık devre gerilimini düşürerek çıkış gücünü azaltırken; gölgelenme, hücreler arasında akım dengesizliklerine ve sıcak nokta (hot-spot) oluşumuna yol açmaktadır. Bu nedenle son yıllarda baypas diyotlarının etkinliği ve hot-spot etkilerini azaltmaya yönelik devre tasarımları üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Baranwal vd. 2025). Benzer şekilde, panel yüzeyinde toz, polen, kuş pislikleri veya endüstriyel partiküllerin birikmesiyle oluşan kirlenme de ışık geçirgenliğini azaltarak uzun vadede ciddi üretim kayıpları doğurmaktadır.

Bu bağlamda, PV sistemlerin işletme performansını artırabilmek için söz konusu kayıpların doğru şekilde modellenmesi, izlenmesi ve minimize edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle kirlenme kaynaklı kayıpların bölgesel iklim koşullarına ve panel konfigürasyonuna bağlı değişkenlik göstermesi, bu alanda yapılan çalışmalara hız kazandırmıştır.

2.1.1 Kirlenme Kavramı

Bir Güneş Enerji Santralinde (GES) verimi azaltan unsurlar, Kırbıyık (2023) tarafından; çevresel koşullar, sistemsel etkenler, ısıtım ve yansıma kayıpları ile birlikte tozlanma, karlanma ve gölgelenme kaynaklı kayıplar şeklinde özetlenmiştir. Kirlenme, PV panellerin yüzeyinde zamanla biriken toz, kum, polen, kuş pislikleri, endüstriyel

partiküller ve diğer çevresel kalıntılar nedeniyle ışık geçirgenliğinin azalması durumudur. Bu durum, panellere ulaşan foton miktarını sınırlayarak hücrelerin elektriksel çıktısını düşürür. Kirlenme, yalnızca ısıtım kaybına yol açmakla kalmaz, aynı zamanda hücreler arasında akım dengesizliklerine sebep olarak yerel ısınma (hot-spot) problemlerini de tetikleyebilir (Şekil-2.1).



Şekil 2.1 PV modüller yüzeyinde kirlenmeye bağlı hot-spot oluşumunun a) Şematik Gösterimi b) Termal Görüntüsü.

Literatürde yapılan çalışmalar, gerçek saha koşullarında kirlenmenin PV modüllerin performansında %40'lara varan üretim kaybına yol açabileceğini göstermektedir (Shenawy ve Ghetany 2021). Bununla birlikte, bu oran; coğrafi bölge, iklim koşulları, panel eğim açısı, yüzey kaplama özellikleri ve kullanılan modül teknolojisine göre büyük farklılıklar göstermektedir. Özellikle toz partiküllerinin boyutu (Zhao vd. 2021), yoğunluğu (Panat ve Varanasi 2022) ve optik (Laarabi vd. 2022) özellikleri kirlenmenin etkisini belirleyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır.

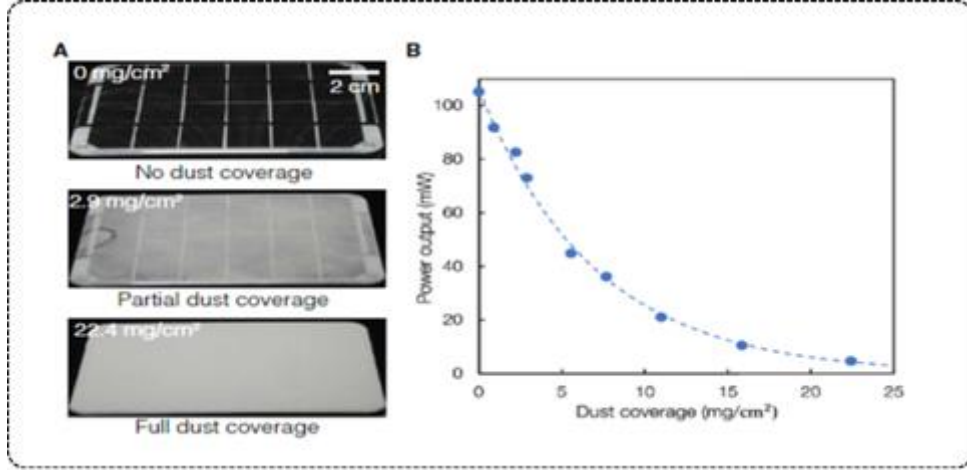
2.1.2 Kirlenmenin PV Performansına Etkisi

Kirlenmenin PV modül performansı üzerindeki etkisi, panel yüzeyine ulaşan ısıtım miktarının azalması ile başlar. Yüzeye biriken toz, polen, kuş pisliği veya diğer partiküller, ışığın bir kısmını soğurmakta veya saçmakta ve kısa devre akımının (I_{sc}) düşmesine yol açarak Maksimum Güç Noktası'nda (Maximum Power Point – MPP) kaymalara neden olmaktadır (Maghami vd. 2016). Non-uniform kirlenme, hücreler

arasında akım dengesizlikleri ve hot-spot oluşumu yaratmakta, bu da hem güç kaybı hem de modül ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır (Baranwal vd. 2025).

Kirlenmenin etkileri panel yüzey kaplaması (Doğan 2024), partikül özellikleri (Chanchangi vd. 2020) ve çevresel koşullara (Zhao vd. 2021)) bağlı olarak değişmektedir. Farklı çalışmalar, kirlenmenin PV performansına etkilerini çeşitli perspektiflerden incelemiştir. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular, kirlenmenin yalnızca ışıınım kaybına değil, aynı zamanda panelin elektriksel ve termal davranışlarına da doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Warsama (2023) ve Gökdeniz (2022) yapay olarak tozlandırılmış panellerde güç kayıplarını gözlemlemiş, Koprle (2023) su püskürtmeli soğutma sistemlerinin performans üzerindeki etkilerini araştırmış, Sulaiman vd. (2015) ve Gürbüz (2018) ise panel eğimi, konumu ve zamanla toz birikimi ile çıkış gücü ilişkisini incelemiştir. Schill vd. (2015) yağmur ve karın yol açtığı parçalı gölgelenmeyi, Zhao vd. (2021) ise toz birikiminin çevresel faktörler ve partikül boyutu ile değişimini modellemiştir. Jiang vd. (2016) çöl ortamında toz birikim yoğunluğuna bağlı olarak gerekli temizleme sıklığını hesaplamış, Semaoui vd. (2015) ise aynı toz partikülünün günün farklı saatlerinde farklı geçirgenlik değerlerine sahip olabileceğini belirtmiştir.

Arazide yapılan saha çalışmaları da kirlenmenin etkisini göstermektedir. Christian vd. (2015) Almanya Freiburg'da 5 aylık doğal kirlenme sonucunda panel veriminde %20 kayıp gözlemlemiş, Benghanem vd. (2018) çöl arazilerinde günlük temizlenen ve temizlenmeyen panelleri karşılaştırmış ve 2 ay sonunda temizlenmeyen panellerde %28 verim kaybı kaydetmiştir. Mostefaoui vd. (2019) Cezayir Sahara Çölü yakınlarında 6 ay içerisinde elektrik üretiminde %32 düşüş gözlemlenmiştir. Shenawy ve Ghetany (2021) aynı çeşit panellerin farklı temizleme periyotlarında temizlenmesi ile farklı üretim kayıplarını rapor etmiştir. Laboratuvar deneylerinde ise yapay olarak tozlandırılan panellerde 25 mg/cm² toz kütlesinin panel üretimini neredeyse durdurduğu gözlenmiştir (Panat ve Varanasi 2022).



Şekil 2.2 Panel üzerinde biriken toz miktarının panel çıkış gücüne etkisi (Panat ve Varanasi 2022).

Bu bulgular, kirlenmenin PV performansı üzerindeki etkisinin sadece toz miktarına değil, kir çeşidine, panel eğimi, temizleme periyodu, çevresel koşullar ve partikül özelliklerine bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla PV sistemlerde kirlenme kaynaklı kayıpların modellenmesi ve minimize edilmesi, enerji üretiminin sürdürülebilirliği ve sistem güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

2.1.3 Non-Uniform Kirlilik

Fotovoltaik panellerde kirlenme çoğu zaman homojen bir dağılım göstermemekte, bunun yerine yüzeyde kısmi bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Non-uniform kirlilik, kısmi gölgelenme etkisine benzer biçimde hücreler arasında akım uyumsuzluğuna yol açarak yalnızca verim kaybına değil, aynı zamanda hot-spot oluşumuna ve panel ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır (Hammad vd. 2018).

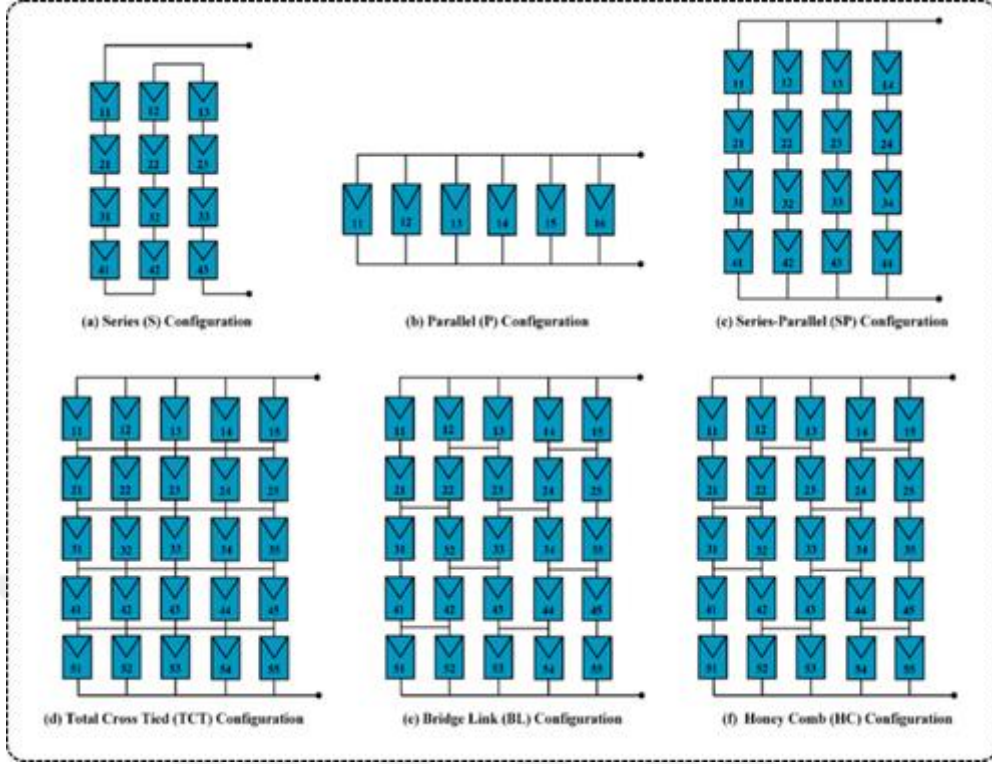
Homojen kirlenme koşullarında kayıplar genellikle doğrusal bir artış gösterirken, non-uniform dağılımda kayıplar doğrusal olmaktan çıkar ve daha karmaşık bir yapıya dönüşür. Jiang vd. (2016), çöl koşullarında yaptıkları çalışmada toz yoğunluğunun panel yüzeyinde eşit dağılmaması durumunda üretim kaybının öngörülenden çok daha yüksek gerçekleştiğini göstermiştir. Non-uniform kirlilik doğrusal olmayan ve konfigürasyona bağımlı elektriksel kayıplara yol açmaktadır. Bu kayıpları minimize etmek için panel konfigürasyonlarının dinamik olarak yeniden düzenlenmesi (örneğin dizi seviyesinde

MPP Takibi – MPPT veya modül eşleştirme yaklaşımları) önerilmektedir.

2.1.3.1 Gölgeleme Etkisi ve Panel Konfigürasyonu

Fotovoltaik modüllerde gölgeleme ve non-uniform kirlilik, panel dizilimlerinin elektriksel konfigürasyonu ile doğrudan etkileşim halindedir. Parçalı gölgeleme veya kısmi kirlenme, modül veya hücre gruplarının farklı seviyelerde ışınlam almasıyla ortaya çıkar ve bu durum, özellikle seri bağlı dizilerde gerilim düşüşüne ve MPP değişimlerine yol açar (Schill vd. 2015, Ayop vd. 2020). Maghami vd. (2016) gölgeleme durumunu yoğun gölgeleme (hard shading) ve yumuşak gölgeleme (soft shading) olarak iki kategoride ayırtmıştır. Yoğun gölgeleme durumunda katı bir nesnenin paneli kısmen kaplaması gerilim tarafını etkilerken, yumuşak gölgeleme toz veya ince birikintiler nedeniyle akım tarafını düşürür. Kar ve yağmur olayları, panel yüzeyinde hem gölge ve hem de geçici temizlenme etkisi yaratarak I-V eğrilerinde karakteristik değişimler oluşturur; biriken toz genellikle panelin alt hücrelerinde birikir ve bu durum hot-spot oluşumuna yol açabilir (Christian vd. 2015).

Panel konfigürasyonu, gölgelemenin etkisini belirleyen bir diğer kritik faktördür. Seri-paralel dizilimlerde, non-uniform kirlilik doğrusal olmayan ve konfigürasyon bağımlı MPP değişimleri yaratır. Bu nedenle hem Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) algoritmaları (Wei vd. 2025) hem de konfigürasyon stratejileri (Ahmad vd. 2025, Riva Sanseverino vd. 2015, Horoufiany ve Ghandehari 2017) geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, kısmi gölgeleme veya non-uniform kirlenme durumunda enerji kayıplarını azaltmayı hedefler.



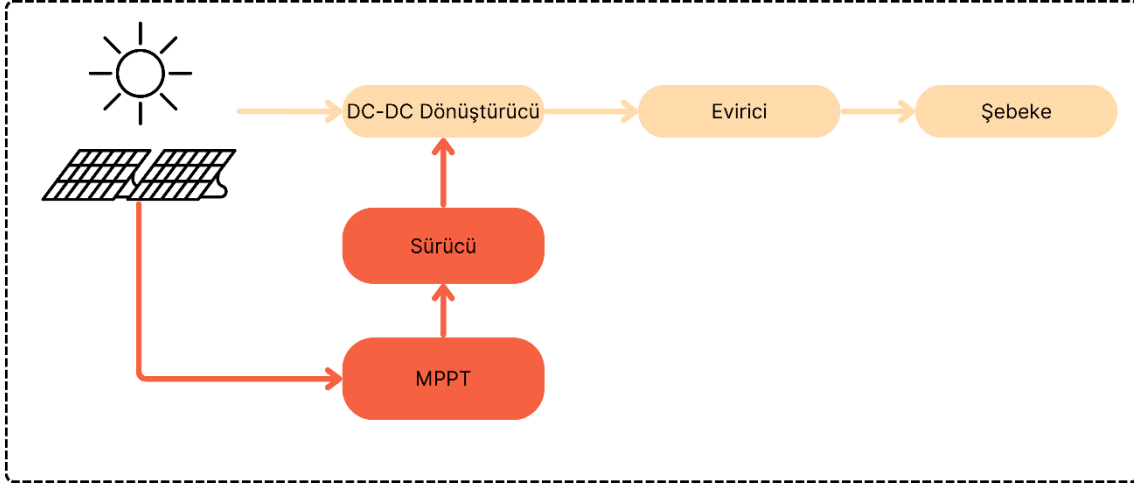
Şekil 2.3 Konfigürasyon stratejileri (Ahmad vd. 2025).

Örneğin, baypas diyotları, gölgelenmiş veya kirlenmiş hücrelerin etkisini sınırlayarak dizinin genel performansını korumaya yardımcı olur. Seri bağlı diziler, paralel dizilere göre gölgelenme ve non-uniform kirlilikten daha fazla etkilenirken, dizilim değişiklikleri ve yeniden konfigürasyon ile enerji üretimi optimize edilebilir.

Sonuç olarak, panel konfigürasyonu ve gölgelenme/kirlilik dağılımı, PV sistem performansını belirleyen kritik faktörlerdir. Temizlik stratejileri, MPPT algoritmaları ve konfigürasyon yaklaşımları tasarlanırken bu faktörler dikkate alınmalıdır.

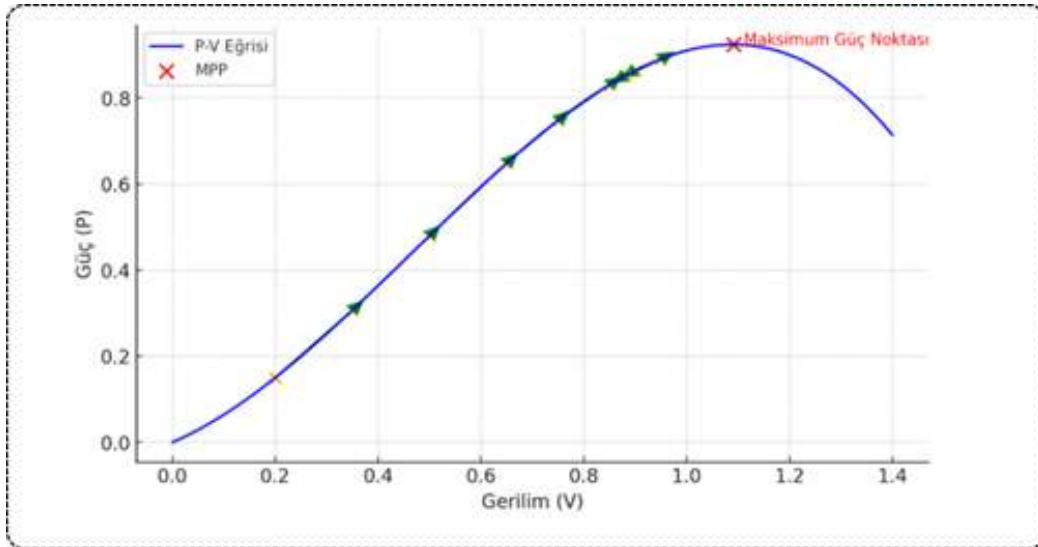
2.1.3.2 Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)

Fotovoltaik sistemlerde MPPT, modüllerin mevcut çevresel koşullar altında maksimum güç üretimini sağlamayı hedefleyen kritik bir kontrol stratejisidir. MPPT algoritmaları, değişken ışınlam, sıcaklık, gölgelenme ve non-uniform kirlilik koşullarında modül çıkış gerilimi ile akım değerlerini izleyerek, MPP'yi dinamik olarak belirler (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 PV sistemlerde MPPT kontrollü güç dönüşümünün blok diyagramı.

Geleneksel MPPT yöntemleri arasında Sars ve Gözle (Perturb and Observe – P&O) ve Artımsal İletkenlik (Incremental Conductance – INC) algoritmaları yaygındır (Şekil 2.5). Ancak bu yöntemler, özellikle non-uniform kirlilik durumlarında, yerel maksimumlara takılma riski taşır (Ishaque vd. 2014). Bu nedenle, modern yaklaşımlar arasında Bulanık Mantık (Fuzzy Logic), Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network – ANN) ve Derin Öğrenme (Deep Learning – DL) tabanlı MPPT algoritmaları (Wei vd. 2025) öne çıkmaktadır. Bu algoritmalar çevresel ve elektriksel verileri işleyerek global MPP’yi belirleyebilir ve sistem performansını artırabilir.



Şekil 2.5 MPP takibi gösterimi.

Non-uniform kirlilik ve kısmi gölgelenme durumlarında, modül dizilerinde birden fazla yerel MPP oluşabilir. Aynı zamanda MPP, güneş ışınım şiddeti ve hava sıcaklığı ile de anlık olarak değişir. Bu, klasik MPPT algoritmalarının yanlış MPP değerini takip etmesine ve enerji kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle, gelişmiş MPPT algoritmaları, global MPP optimizasyonu için önerici modellerle desteklenebilir.

2.2 PV Panel Temizleme Sistemleri

Fotovoltaik panellerin verimliliğini koruyabilmek için düzenli temizleme, enerji üretim kayıplarını azaltan en önemli yöntemlerden biridir. PV sistemlerde temizleme yöntemleri genellikle manuel ve otomatik sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. Manuel yöntemlerde çoğunlukla su kullanılarak yüzey temizliği yapılmakta olup, Abdolzadeh vd. (2009) bu yöntemle yalnızca tozun uzaklaştırılmadığını, aynı zamanda panel sıcaklığının da düşürülerek yaklaşık %3.25 oranında verim artışı sağlandığını belirtmiştir. Öte yandan, aşırı su kullanımı hem maliyet hem de panel yüzeyinde kılcal çatlaklarda birikim gibi uzun vadeli riskler doğurabilmektedir. Bu nedenle, Patil vd. (2017) susuz veya minimum suyla çalışan fırça tabanlı sistemlerin daha verimli ve sürdürülebilir bir alternatif oluşturduğunu belirtmiştir.

2.2.1 Manuel Temizleme Sistemleri

Fotovoltaik panellerde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri manuel temizleme yöntemleridir. Bu yöntem, özellikle düşük maliyetli olması nedeniyle tercih edilmektedir. Manuel temizlikte çoğunlukla su kullanılarak panel yüzeyi temizlenmektedir. Ancak temizleyici cihazların maliyetlerinden dolayı tercih edilse de büyük ölçekli santraller düşünüldüğünde insan gücünün yetersizliği söz konusu olmakta, yapılan hatalar sistemde ciddi kayıplara yol açabilmektedir. Nitekim Christian vd. (2015), Benghanem vd. (2018), Mostefaoui vd. (2019), Shenawy ve Ghetany (2021) ile Bunyan vd. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda panellerin temizliği manuel olarak gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalar çoğunlukla küçük ölçekli test düzeneklerinde yürütülmüştür. Temel amaç, panel yüzeyinde biriken kirliliğin sistem verimine etkisinin ortaya konulmasıdır. Bununla birlikte, şebekeye bağlı büyük ölçekli santrallerde de manuel temizlik uygulamalarına örnekler bulunmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 PV panellerin manuel yöntemle temizlenmesi uygulaması.

2.2.2 Robotik ve Sensör Tabanlı Yaklaşımlar

Son yıllarda robotik ve sensör tabanlı otomatik temizleme sistemleri, özellikle büyük ölçekli PV sahalarında tercih edilmektedir. Bu sistemler hem iş gücü ihtiyacını azaltmakta hem de temizleme verimliliğini artırmaktadır.

2.2.2.1 Yarı Otomatik Temizleme Sistemleri

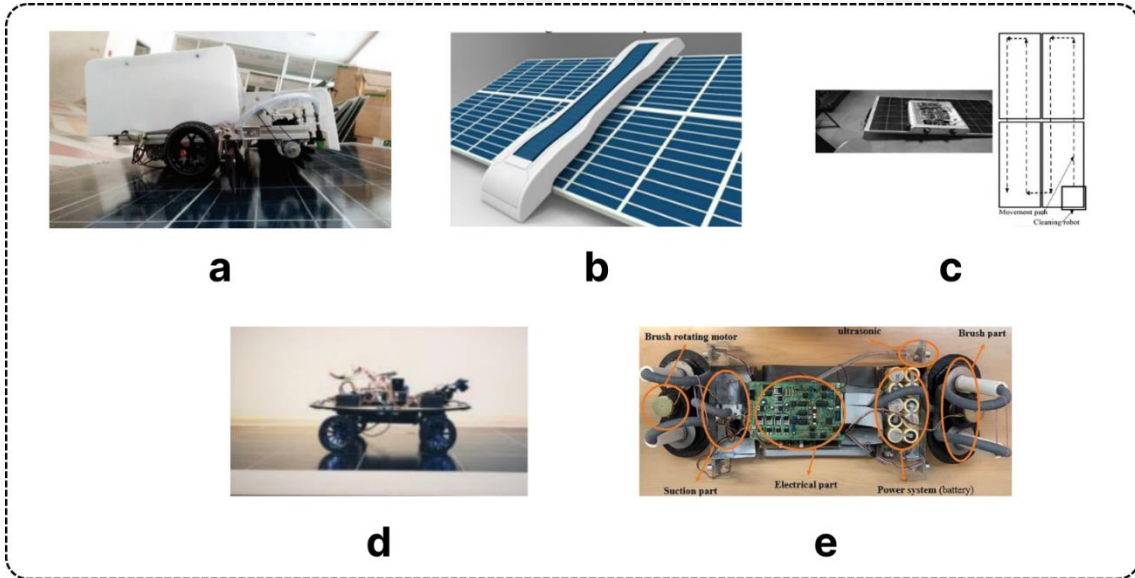
Yarı otomatik sistemler, manuel yöntemler ile tam otomatik sistemler arasında yer alan ara çözümlerdir. Temizlik zamanı genellikle ampirik verilere dayanarak belirlenir ve insan müdahalesi yalnızca temizleyicinin taşınması, yerleştirilmesi veya sistemin başlatılması gibi sınırlı görevlerle sınırlıdır. Bu sistemlerde amaç, panel dizileri üzerinde belirli bir otomasyon desteğiyle hareket eden mekanizmalar aracılığıyla zaman, iş gücü ve su tüketiminden tasarruf sağlamaktır.

Bu tür sistemler, özellikle geniş yüzeyli PV santrallerinde manuel temizlik ihtiyacını azaltırken, hâlen pozisyonlama ve satır geçişlerinde insan müdahalesi gerektirmeleri nedeniyle tam anlamıyla otonom sayılmazlar. Ayrıca, çoğu uygulamada kirlenme düzeyi ölçülmeden belirli aralıklarla temizlik yapıldığı için gereksiz enerji tüketimi ve mekanik aşınma sorunları ortaya çıkmaktadır.

Gezinebilir robotlar, panel dizileri boyunca hareket edebilen, genellikle tekerlekli, raylı veya tırtıllı mekanik sistemlerdir. Bu sistemler sayesinde farklı panel satırlarında temizlik yapılabilir ve temizlik alanı insan müdahalesi olmadan genişletilebilir.

Örneğin, ultrasonik sensörlerle yönlendirilen ve farklı panel boyutlarına uyum sağlayabilen bir robot tasarımı geliştirilmiştir (Ronnaronglit ve Maneerat, 2019). Benzer şekilde, rüzgâr etkilerini azaltacak aerodinamik gövdeye ve devrilmeyi önleyen rüzgâr sensörlerine sahip, hafif yapıdaki robotlar önerilmiştir (Yan vd. 2020). Sundaram vd. (2019) tarafından geliştirilen sistemde ise, büyük ölçekli PV tarlalarında birden fazla panel satırı boyunca hareket edebilen, yüzeyi travers eden otonom temizlik robotu tasarlanmıştır.

Ayrıca Park vd. (2018) tarafından geliştirilen taşınabilir, düşük maliyetli ve hava üfleme temizleme robotu, panel yüzeyindeki tozu hava akımı ile uzaklaştırmayı hedeflemiştir. Yaklaşık 8 kg ağırlığındaki bu robotun kontrolü Arduino ve Raspberry Pi mikrodenetleyicileri ile sağlanmıştır. Bu yaklaşıma benzer biçimde, Mousavi ve Farahani (2022), emme prensibine dayalı bir robot tasarlamış ve toz partiküllerini negatif basınç farkı oluşturarak yüzeyden uzaklaştırmıştır.

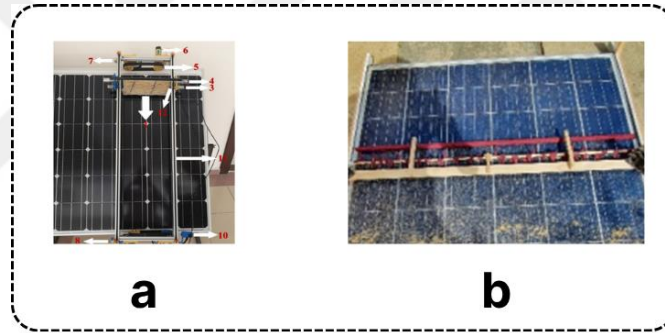


Şekil 2.7 Yarı otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – I: a) Ronnaronglit ve Maneerat (2019), b) Yan vd. (2020), c) Sundaram vd. (2019), d) Park vd. (2018), e) Mousavi ve Farahani (2022).

Bu yaklaşımlar (Şekil 2.7), iş gücü gereksinimini önemli ölçüde azaltmış ve daha geniş kapsama alanı sağlamıştır. Ancak gezinebilir robotlar hâlen panel geçişlerinde konumlandırma zorluğu, yüksek enerji tüketimi ve yüzey teması kaynaklı mikroskobik

çatlak riski gibi sınırlılıklar taşımaktadır.

Bu sınırlılıkları azaltmak ve panel yüzeyine baskıyı engellemek amacı ile panel üzerine monte edilen sistemler geliştirilmiştir. Bu yarı otomatik sistemlerde temizleyici, doğrudan PV modül yüzeyine entegre edilir veya belirli bir panel satırına sabitlenir ve mobilite yerine süreklilik sağlanır. Örneğin, Akyazı vd. (2019) tarafından tasarlanan sistemde, panel üzerine monte edilmiş kayışlı mekanizma ile fırçalı temizlik yapılmış, hareketin sınırları mesafe sensörleri kullanılarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, Habib vd. (2021) tarafından geliştirilen Arduino tabanlı iki aşamalı (hava üfleme + fırça) susuz temizleme robotu, farklı toz ve kum parçacıklarının panel yüzeyinden %87–96 oranında uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Bu tasarım, su kullanımını ortadan kaldırması ve çöl koşullarına dayanıklılığı açısından sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 2.8 Yarı otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – II: a) Akyazı vd. (2019), b) Habib vd. (2021).

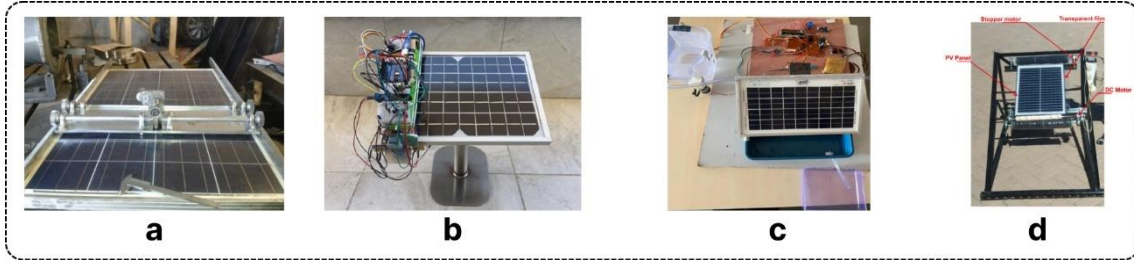
Panel-montajlı sistemler (Şekil 2.8), kurulum kolaylığı ve düşük bakım maliyeti açısından avantajlı olsa da, sınırlı hareket kabiliyeti, panel geçişlerinde adaptasyon eksikliği ve kirlenme yoğunluğuna duyarsız sabit çalışma döngüsü gibi dezavantajlara sahiptir.

2.2.2.2 Tam Otomatik Temizleme Sistemleri

Tam otomatik temizleme sistemleri, insan müdahalesine gerek duymadan çalışan ve panel yüzeyindeki kirlenmeyi algılayarak temizlik kararını otomatik olarak veren sistemlerdir. Bu tür sistemlerde karar verme mekanizması, sensör tabanlı kontrol

stratejileri, Görüntü İşleme (Image Processing – IP) algoritmaları ve son yıllarda yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar ile desteklenmektedir. Bu sistemler, çevresel koşullar ve performans verilerini kullanarak adaptif temizlik kararları oluşturabilmektedir.

Örneğin, Mutluer ve Erat (2019), güç, sıcaklık, kirlilik ve gölgelenme faktörlerini girdi olarak kullanan bulanık mantık tabanlı bir otomatik temizlik robotu geliştirmiştir. Sistem, belirlenen eşik değerleri aştığında otomatik olarak devreye girerek panel üretiminde %17 artış sağlamıştır. Benzer şekilde, Kargacıoğlu (2018), panel etrafına yerleştirilen LDR sensörleri yardımıyla panel çıkış gücünü sürekli izlemiş; verimde azalma tespit edildiğinde tek yönlü hareket eden fırçalı temizleyiciyi devreye alan bir sistem tasarlamıştır. Ayrıca, Borawake vd. (2025), yüzey kirlenme düzeyini ölçmek için optik parçacık sayıcı (toz sensörü) kullanmış ve belirlenen eşik değerinde sulu temizlik mekanizmasını otomatik olarak etkinleştirmiştir. Oufettoul vd. (2025) ise, panel yüzeyine yerleştirilen şeffaf döner film mekanizması ile çalışan su kullanmayan kendi kendini temizleyen bir sistem önermiştir. Bu tasarımda, Ares kir istasyonu (Ares Soiling Station – ASS) verileriyle kirlilik düzeyi ölçülmekte ve belirli bir seviyeyi aştığında film hareket ettirilerek temizlik döngüsü başlatılmaktadır.

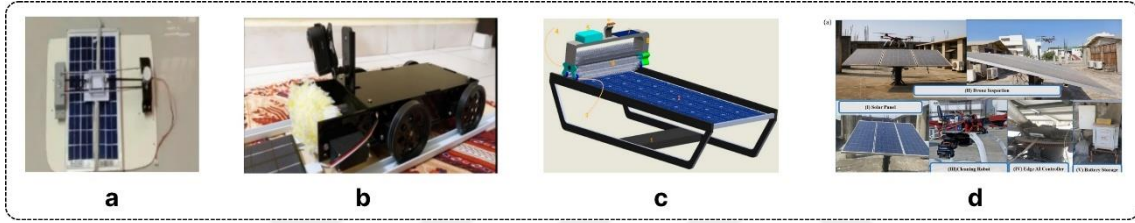


Şekil 2.9 Tam otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – I: a) Kargacıoğlu (2018), b) Mutluer ve Erat (2019), c) Borawake vd. (2025), d) Oufettoul vd. (2025).

Bu tür sistemler (Şekil 2.9), su tasarrufu ve düşük bakım gereksinimi açısından avantaj sağlasa da, mekânsal farkındalık ve enerji optimizasyonu yetenekleri açısından hâlen sınırlıdır. Bu durum, daha seçici ve enerji farkındalıklı robotik sistemlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

IP tabanlı çalışmalar da tam otomatik sistemlerin gelişiminde önemli bir yer

tutmaktadır. Örneğin, Aashika vd. (2020), dron ile elde edilen panel görüntülerini desen eşleştirme yöntemiyle analiz ederek, panellerdeki kirlilik durumuna göre otomatik temizlik karar mekanizması geliştirmiştir. Benzer şekilde, Perarasi vd. (2021) motorlu bir silecek sistemi tasarlayarak, IP algoritmaları yardımıyla panel yüzeyindeki kir tespit edildiğinde sileceğin devreye girmesini sağlamıştır. Ayrıca, Hashim vd. (2019), IP kamera kullanarak panel yüzeyindeki değişimlerin temizlik sırasında izlenebildiği, işlemci ve LDR sensörleriyle desteklenmiş bir robot sistemi önermiştir. Bu sistemde üretim değerleri işlemciye aktarılmış ve elde edilen farklar robotun çalışma tetikleyicisi olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.10 Tam otomatik temizleme sistemlerinden örnekler – II: a) Perarasi vd. (2021), b) Hashim vd. (2019), c) Ahmed vd. (2025), d) Kishor vd. (2025).

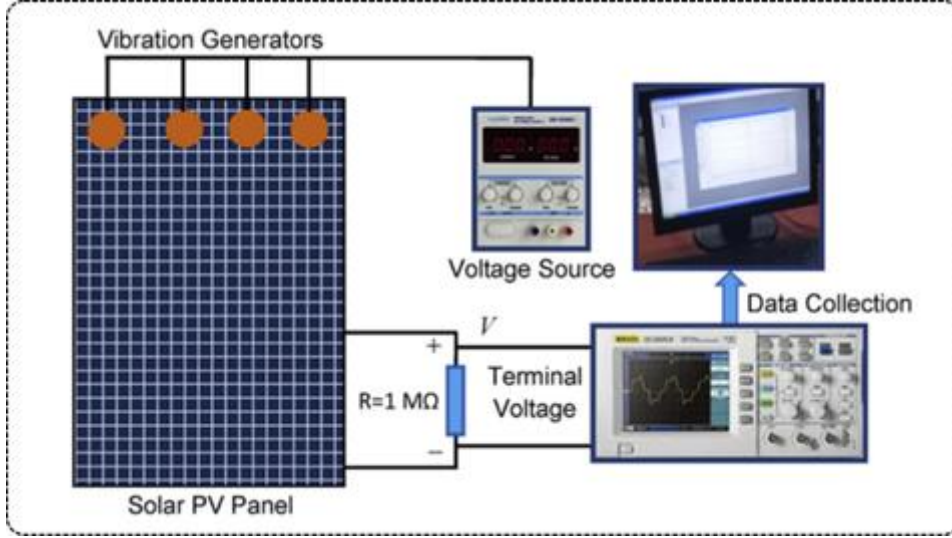
Son dönemde DL tabanlı yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Ahmed vd. (2025), HALCON yazılım çerçevesini kullanarak güneş panellerindeki kirliliği tanıyıp sınıflandırabilen DL tabanlı bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilmiş ANN (Enhanced Artificial Neural Network – EANN) ve Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network – CNN) mimarilerini kullanan sistem, farklı kirlenme desenlerini %99'un üzerinde bir doğrulukla sınıflandırmış, bu sayede temizlik robotlarının gereksiz döngülerden kaçınmasını ve enerji verimliliğinin artmasını sağlamıştır. Benzer şekilde, Kishor vd. (2025) tam otomatik bir güneş paneli bakım sistemi geliştirerek, dron ve kara tabanlı robotların entegre biçimde çalıştığı yapay zekâ destekli bir mimari önermiştir. Bu sistem, panel yüzeyinden alınan görüntülerle kirlenme tespiti yapmakta, toz yoğunluğuna bağlı olarak panel çıkış gücünü tahmin etmekte ve gerekli temizlik eylemini otonom biçimde gerçekleştirmektedir. Bu sistemler (Şekil 2.10), yüksek algılama doğruluğu ve gerçek zamanlı geri bildirim avantajı sunsa da, kirli-temiz sınıflandırma sınırlarına sahip olup non-uniform kirlenmeyi tam olarak adresleyememektedir.

Tüm bu çalışmalar, tam otomatik temizleme sistemlerinin yalnızca panel yüzeyindeki kirlenmeyi gidermeye odaklanmadığını, aynı zamanda enerji üretim kayıplarını azaltacak şekilde akıllı karar destek mekanizmaları ile bütünleştiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut sistemlerin çoğu hâlen eşik değer kontrollü homojen kirlenme varsayımıyla çalışmakta ve gerçek saha koşullarında gözlenen non-uniform kirlenme durumlarında verim kayıplarını tam olarak optimize edememektedir. Bu nedenle, mekânsal farkındalık, enerji farkındalığı ve seçici temizlik kararları sağlayan yeni nesil akıllı robotik sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

2.2.3 Susuz Temizleme Önerileri

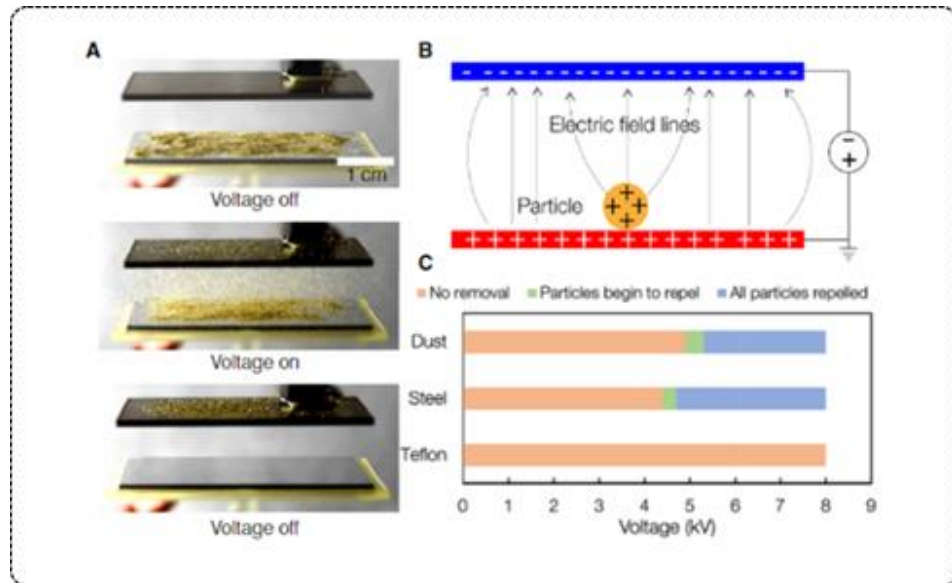
Su tasarrufu ve çevresel etkilerin minimize edilmesi amacıyla, PV panellerin temizliği için elektrostatik veya hava üflemleri yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde temel amaç, su kullanmadan panel yüzeyinde biriken toz ve partiküllerin mekanik, akustik veya elektrostatik kuvvetler aracılığıyla uzaklaştırılmasıdır.

Erişgin vd. (2022), mekanik ve temassız susuz temizleme yöntemlerinin panel performansına etkilerini incelemiştir. Ultrasonik dönüştürücülerle oluşturulan titreşim ve piezoelektrik aktüatörlerin ürettiği yüzey akustik ses dalgalarının kombine kullanımı ile, panel güç çıkışında %68.6 oranında artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, panel eğim açısının temizleme başarımıyla pozitif korelasyon gösterdiği belirtilmiştir. Benzer şekilde, Alagöz vd. (2020), akustik dalga yöntemi ile panel yüzeyindeki 0.1–2 mm büyüklüğündeki toz parçacıklarını temizlemeyi önermiştir (Şekil 2.11). Bulgulara göre, büyük partiküller daha kolay temizlenirken, küçük partiküllerin uzaklaştırılması için daha yüksek frekansta akustik dalga uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2.11 Akustik dalga yöntemi ile temassız temizleme uygulaması (Alagöz vd. 2023).

Panat ve Varanasi (2022), elektrostatik itme kuvveti kullanarak panel yüzeyindeki tozların uzaklaştırılmasını önermiştir. Önerilen sistemde elektrotlar panel yüzeyine yeterli mesafede konumlandırılarak, elektrostatik kuvvet yardımıyla partiküller etkin bir şekilde panel üzerinden ayrılmaktadır (Şekil 2.12). Altıntaş (2021) ise yüksek gerilim tabanlı elektrostatik yöntem geliştirmiş ve panel yüzeyinde küresel, elipsoit ve açılı şekle sahip 50–450 μm boyutlarındaki parçacıkların panellerden uzaklaştırılmasını incelemiştir.



Şekil 2.12 Elektrostatik itme kuvveti ile panel yüzeyinden partikül uzaklaştırma prensibi (Panat ve Varanasi 2022).

Bunlara ek olarak, daha önceki bölümlerde anlatılan hava üfleme ve emme basınç prensibine dayalı robotik uygulamalar da su kullanmadan temizlik yapan sistemler arasında yer almaktadır (Şekil 2.7, Şekil 2.8).

Bu çalışmalar, susuz temizleme yöntemlerinin farklı fiziksel ve elektrostatik yaklaşımlarla uygulanabileceğini, su tasarrufu sağlayarak çevresel etkileri azalttığını ve aynı zamanda panel üretim verimliliğini artırdığını göstermektedir.

2.3 Kirlenme Tespit Yöntemleri

Fotovoltaik panellerin performansını olumsuz etkileyen en önemli unsurlardan biri yüzeyde biriken kirlenme olgusudur. Kir tabakasının tespit edilmesi ve seviyesinin doğru biçimde belirlenmesi, optimum temizlik zamanlaması açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde bu amaçla lokasyon tabanlı çevresel ölçümlerden Makine Öğrenmesi (Machine Learning – ML) algoritmalarına kadar geniş bir yelpazede yöntemler önerilmiştir.

Bu bölümde kirlenme tespit yöntemleri, lokasyon bazlı yaklaşımlar, ölçüm tabanlı yöntemler, IP tabanlı analizler ve ML/DL sınıflandırmaları olmak üzere dört ana başlık altında incelenmiştir.

2.3.1 Lokasyon Bazlı Yaklaşımlar

Lokasyon bazlı yöntemler, panellerin bulunduğu coğrafi konumun çevresel verilerine (sıcaklık, nem, rüzgâr, toz yoğunluğu vb.) dayalı olarak kirlenme etkisini tahmin etmeye yöneliktir. Bu yöntemler düşük maliyetli giriş verilerine dayalı oldukları için pratik avantajlar sunmakta; ancak kirlenme hızı ve çevresel veri değişkenliğinden dolayı genelleme kabiliyetleri sınırlı kalmaktadır.

Örneğin, Shenawy ve Ghetany (2021) tarafından Mısır'da yapılan üç aylık çalışmada, aynı koşullarda tesis edilmiş beş panel farklı periyotlarda temizlenmiş ve haftada bir, ayda bir, iki ayda bir ve üç ayda bir temizlik yapıldığında sırasıyla %2.39, %10.89, %30.16 ve %41.97 oranlarında üretim kaybı yaşandığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde,

Bunyan vd. (2016) Kuveyt'te yürüttükleri araştırmada uygun yıkama periyotlarının belirlenmesi ile panellerin veriminde kayda değer artış sağlandığını göstermiştir.

Türkiye'de yapılan bir başka çalışmada, Kırbıyık (2023) Erzurum ilindeki güneş enerji santrallerinde kış şartlarının (kar ve buzlanma) PV paneller üzerinde olumsuz etkilerini incelemiş ve meteorolojik verilerle desteklenen analizler sonucunda santralde yaklaşık %10 verim kaybı yaşandığını belirtmiştir.

Çöl ikliminde gerçekleştirilen araştırmalarda ise toz birikimi kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Jiang vd. (2016) yıl içerisindeki gerekli temizleme sayısını, panel çıkış gücü, rüzgâr hızı, toz miktarı ve ortalama parçacık büyüklüğüne göre hesaplamış; farklı çevresel koşullar altında temizlik sıklığının önemli ölçüde değiştiğini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Malezya'da yapılan bir saha çalışmasında Sulaiman vd. (2015), gerçek zamanlı ölçümlerle toz birikiminin PV panellerin performansında belirgin düşüşlere yol açtığını ortaya koymuştur. Fathi vd. (2017), Cezayir'in Sahra bölgesinde farklı panel teknolojileri üzerinde yaptıkları ölçümlerle, kirlilik eşiğini %7 olarak tanımlamış ve bu seviyeden sonra temizliğin ekonomik olarak anlamlı hale geldiğini göstermiştir. Hammad vd. (2018) ise Ürdün'de yürüttüğü çalışmada, toz ve sıcaklık verilerini ANN ile ilişkilendirerek panel performansını modellemiş ve optimum temizlik sıklığını tahmin etmiştir. Rodrigo vd. (2020), Meksika'daki saha verilerine dayalı olarak geliştirdiği Dengelenmiş Elektrik Maliyeti (Levelized Cost of Electricity – LCOE) tabanlı yaklaşımda, farklı ölçek ve lokasyonlarda değişen temizlik aralıklarını ortaya koymuştur.

Bu bulgular, lokasyon bazlı yaklaşımların bölgesel iklim ve çevresel faktörlere göre panel temizliği planlamasında yararlı olduğunu, ancak evrensel bir model geliştirme konusunda sınırlı kaldığını göstermektedir.

2.3.2 Ölçüm Tabanlı Yaklaşımlar

Ölçüm tabanlı yöntemlerde panellerden doğrudan alınan elektriksel veya optik parametreler kullanılarak kirlenme tespiti yapılır. Bu yaklaşımlar, kirlenmenin panel performansı üzerindeki etkilerini doğrudan gözlemleme avantajına sahiptir.

Javed vd. (2017) çevresel değişkenleri (rüzgâr, nem) ANN ile işleyerek panellerin temizlenme ihtiyacını sürekli bir indeks (0–1) üzerinden tahmin etmiştir (Soiling Ratio – SR). Benzer şekilde, Costa Silva vd. (2023) farklı ML algoritmalarını (LR, RF, DT, MLP, LSTM) meteorolojik ve operasyonel verilerle birleştirerek sürekli kirlilik oranı üretmiş; yüksek doğruluk elde edilmesine rağmen modelin saha koşullarına özgü kalibrasyon gerektirdiğini vurgulamıştır.

Tozlanma ve sıcaklık etkilerini dikkate alan Hammad vd. (2018) ise regresyon ve ANN kullanarak verim kaybını ve optimum temizlik frekansını tahmin etmiştir. Ölçüm tabanlı sensör yaklaşımlarında, Valerino vd. (2020) düşük maliyetli sensörlerle toz ağırlığını mikroskobik incelemelerle ilişkilendirerek partikül ölçeğinde korelasyon kurmuştur.

Optik ölçüm odaklı çalışmalarda, Micheli vd. (2020) spektroskopik yöntemle belirli dalga boylarında transmisyon kayıplarını incelemiş ve en uygun algılama bantlarını önermiştir. Piedra vd. (2018) ise deneysel ve teorik bir yaklaşımla tozun tek saçılım albedosu (SSA) ve kütlesini kullanarak spektral kayıpları hesaplamıştır. Hibrit ölçüm sistemlerine örnek olarak, Simonazzi vd. (2020) geliştirdikleri akıllı sensörle hem optik hem de elektriksel parametreleri aynı anda ölçerek kir miktarını doğrudan sayısallaştırmıştır.

Son dönemde ise ölçüm tabanlı yöntemler ML destekli otomasyon yaklaşımları ile zenginleştirilmiştir. Hossain vd. (2025) panel çıkış verilerini çevresel ölçümlerle birleştirerek ML tabanlı bir verim tahmini gerçekleştirmiş, belirlenen eşik değerinin altındaki tahminlerde otomatik sulama sistemini aktive etmiştir.

Bunlara ek olarak, daha önceki bölümlerde anlatılan tam otomatik temizleme sistemlerinde de kirlenme düzeyi çoğunlukla güç, sıcaklık, ısıtım ve optik sensör ölçümleri aracılığıyla belirlenmektedir (Kargacıoğlu 2018, Mutluer ve Erat 2019, Borawake vd. 2025, Oufettoul vd. 2025).

Genel olarak, ölçüm tabanlı yöntemler kirlenmenin fiziksel etkilerini doğrudan

gözlemleyebilmeleri sayesinde yüksek güvenilirlik sunmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin hassas sensörler ve ek donanımlar gerektirmesi maliyet ve bakım açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

2.3.3 Görüntü İşleme Tabanlı Yaklaşımlar

Son yıllarda, panel yüzeyine yönelik kamera görüntülerinin işlenmesi kirlenme tespitinde öne çıkan yöntemlerden biri haline gelmiştir. Bu yaklaşım, doğrudan panel yüzeyini gözlemleme imkânı sunduğundan, düşük maliyetli sensörlerle kolayca uygulanabilmekte ve aynı zamanda uzaktan denetleme avantajı sağlamaktadır.

Görüntü tabanlı sınıflandırma yöntemlerine örnek olarak, Abuqaad ve Ferrah (2020) HSV renk uzayında doğrusal sınıflandırma ile kirli panel tespit edilmiştir. Ünlütürk (2019), laboratuvar ortamında farklı kirlilik seviyeleri oluşturarak Gri-Düzey Eş-Oluşum Matrisi (Gray-Level Co-Occurrence Matrix – GLCM) tabanlı 19 özellik çıkarmış ve ANN’i bu verilerle eğiterek %96 doğruluk oranı elde etmiştir.

Li vd. (2016) ise Kinect V2 sensörünü kullanarak panel yüzeyindeki farklı kirlilikleri üç boyutlu olarak haritalamış, böylece daha hızlı ve güvenilir bir temizlik otomasyonu sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Pivem vd. (2019) ise panel görüntülerinde RGB histogramları ve bölge segmentasyonu yöntemlerini kullanarak uniform ve non-uniform kir tiplerini ayırt etmeye çalışmıştır. Görüntü iyileştirme ile RGB histogram eşitleme mantığı ile toz miktarının tahmin edildiği yöntemler de bulunmaktadır (Fan vd. 2022). Daha yakın tarihte Hwang vd. (2023) temiz, az kirli ve çok kirli yüzey sınıflarını istatistiksel analizlerle belirleyerek bu bilgiyi karar verme mekanizmasına aktarmıştır.

Görüntü tabanlı yöntemler yalnızca tespit için değil, doğrudan temizlik sistemlerinin kontrolü için de kullanılmaktadır. Perarasi vd. (2021) panel yüzeyinden alınan görüntüleri işleyerek motorlu silecek sistemini kontrol ederken, Park vd. (2018) kamera ile elde edilen renk değişimlerini analiz ederek mobil temizlik robotunun yönlendirilmesini sağlamıştır. Benzer şekilde, Aashika vd. (2020) dron ile elde edilen görüntülerden faydalanmış, verim kaybı belirli bir eşik değerin altına düştüğünde IP ile kir tespiti yaparak otomatik temizlik ihtiyacını belirlemiştir.

Bu tür yaklaşımlar, düşük maliyetli donanımlarla uzaktan ve gerçek zamanlı denetim olanağı sunmaları nedeniyle pratik çözümler olarak öne çıkmaktadır. Görüntü tabanlı yöntemler panel yüzeyinde kirlenmenin görsel olarak tespitinde etkili olsa da, son yıllarda bu yaklaşımların daha ileri bir aşaması olan yapay zekâ tabanlı adaptif sınıflandırma yöntemleri ön plana çıkmıştır.

2.3.4 Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Tabanlı Sınıflandırmalar

Görüntü işleme yöntemlerinin ileri adımı olarak, yapay zekâ tabanlı sınıflandırma teknikleri son yıllarda yoğun ilgi görmektedir. Bu yaklaşımlar, farklı kir türlerini ayırt edebilme, büyük veriyle öğrenebilme ve otomasyon sistemlerine entegre edilebilme avantajlarıyla öne çıkmaktadır. DL yöntemlerinin dron tabanlı gözlemlerle birleştiği çalışmalarda, Ahmed vd. (2025) dış ortam koşullarında panel yüzeyindeki kirlenmeyi sınıflandırmayı başarmıştır.

Literatürde bu alanda çeşitli çalışmalar rapor edilmiştir. Çalışmaların büyük çoğunluğu IP tabanlı yaklaşımları ikili sınıflandırmaya (temiz/kirli) indirgemıştır. Noorussbah vd. (2023), dron ile elde edilen panel görüntülerinde toz ve kuş pisliğini ayırt etmek amacıyla VGG19 CNN modelini kullanmış ve %95 doğruluk elde etmiştir. Benzer şekilde, Abukhait vd. (2024), Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine – SVM) tabanlı sınıflandırma yöntemiyle panellerin temiz veya kirli durumunu %94 doğrulukla tahmin edebilmiştir. Daha ileri bir yaklaşımda, Onim vd. (2023) SolNet adını verdikleri yeni bir CNN mimarisi geliştirmiş ve ResNet50 ile AlexNet gibi yaygın modellerle karşılaştırıldığında daha düşük parametre sayısı ile daha yüksek doğruluk elde etmiştir. Toz birikiminin belirlenmesi için Elman Derin Ağları (Elman Deep Network – EDN) ve ResNet-18, VGG-16, MobileNetV2 tabanlı yaklaşımlar da geliştirilmiştir (Mahmoud vd. 2024, Shao vd. 2024).

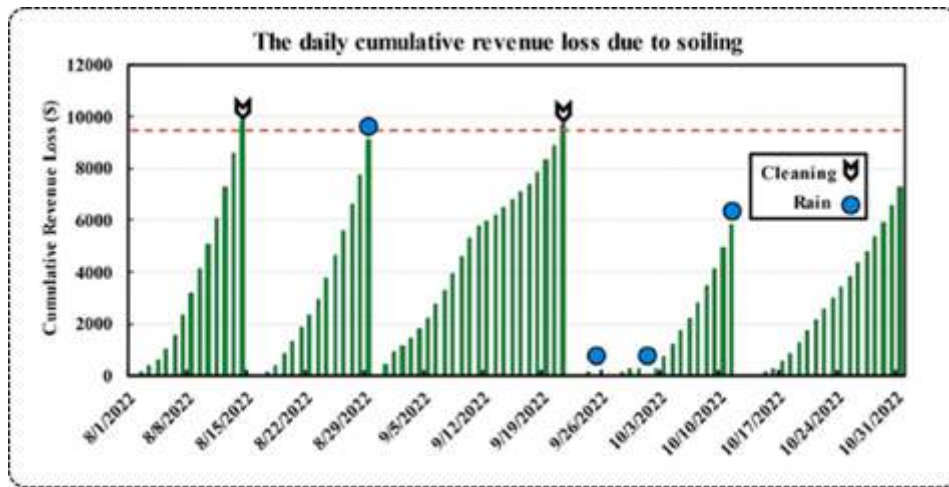
Ancak bu yöntemlerin dezavantajı, büyük eğitim veri setlerine bağımlılık ve yüksek donanım ihtiyacıdır (Rojas vd. 2023). Bu sebepten gerçek zamanlı gömülü sistemlere entegrasyonu zordur.

Bu tür yöntemler, geleneksel IP tekniklerine kıyasla daha yüksek doğruluk, daha iyi genelleme ve farklı kir türlerini ayırt etme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Ancak yüksek doğruluk elde etmek için büyük miktarda etiketlenmiş veri ve yüksek işlem gücü gerektirmeleri, saha uygulamalarında dikkate alınması gereken temel zorluklardır.

2.4 Temizlik Takvimi ve Karar Verme Mekanizmaları

Fotovoltaik panellerin temizliği, yalnızca mekanik sistemlerin etkinliğiyle değil, aynı zamanda doğru karar verme mekanizmaları ile de optimize edilebilmektedir. Karar verme mekanizmaları, temizlik zamanının belirlenmesi, hangi panellerin temizleneceği ve temizleme sıklığının ayarlanması gibi kritik süreçleri kontrol etmektedir. Bu sistemler, sensör verileri, çevresel koşullar ve panel performans bilgilerini entegre ederek, akıllı temizlik robotlarının verimli çalışmasına olanak sağlamaktadır.

Abraim vd. (2023) çalışmalarında referans sistem kullanarak panellerin temizlik zamanını belirlemeye yönelik bir yazılım geliştirmiştir. Bu çalışmada sürekli temiz tutulan referans paneller ile doğal kirlenmeye bırakılan panellerin üretim değerleri karşılaştırılmış, kayıplar zaman serisi halinde kaydedilmiştir. Kritik eşik değerine ulaşıldığında temizlik kararı yazılım tarafından belirlenmiş ve temizlik görevlilerine bildirilmiştir. Ayrıca yağmurun panel temizliği üzerindeki olumlu etkisi üretim kaybı grafiğinde açıkça ortaya konmuştur (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Kirlenmeye bağlı günlük kayıp grafiği (Abraim vd. 2023).

Son yıllarda yapay zekâ tabanlı yöntemler ile temizleme takvimlerinin optimizasyonu yaygınlaşmaktadır. Örneğin Zhang vd. (2025), Varyasyonel Kip Ayrıştırma (Variational Mode Decomposition – VMD) ve Koşullu Üretici Çekişmeli Ağ (Conditional Generative Adversarial Network – cGAN) algoritmalarını birleştirerek optimum temizlik periyotlarını öneren akıllı bir karar sistemi geliştirmiştir. Singh ve Chandra (2023), IP ile panel yüzeyindeki toz tespitini yapan DL modeli geliştirmiş ve bunu yeni bir optimizasyon tekniği (Biyografi Tabanlı Helianthus Optimizasyonu, Biography-Based Helianthus Optimization – HBBHO) ile birleştirerek temizlik zamanlamasını yüksek doğrulukla belirlemiştir. Bu tür modeller, çevresel verileri, elektriksel performansı ve görüntü tabanlı tespitleri bütünleştirerek klasik yöntemlere göre çok daha hassas karar mekanizmaları sunmaktadır. Benzer şekilde, ekonomik boyut da karar verme sürecinde belirleyici olabilmektedir. Fathi vd. (2017), Cezayir'in Sahra bölgesinde farklı panel teknolojileri üzerinde yaptığı çalışmada, kirlilik eşik değerini %7 seviyesinde tanımlamış ve bu seviyeden sonra temizlik işleminin ekonomik olarak anlamlı hale geldiğini göstermiştir. Hammad vd. (2018), toz ve sıcaklık parametrelerini regresyon ve ANN ile ilişkilendirerek panel performansını ve optimum temizlik sıklığını tahmin etmiştir. Rodrigo vd. (2020) ise Meksika'daki saha verilerine dayalı olarak geliştirdiği yöntemle, optimum temizlik aralıklarını LCOE yaklaşımı üzerinden hesaplamış ve farklı ölçeklerde farklı temizlik periyotları önermiştir.

Otomatik temizlik sistemlerinde karar verme mekanizmaları genellikle sensör tabanlı olup, üretim verileri ile çevresel koşullara dayalı kontrol algoritmaları kullanılmaktadır. Bu sistemlerde bulanık mantık (Mutluer vd. 2019) ve eşik değer tabanlı (Kargacıoğlu, 2018) kontrol sistemleri kullanılarak robotların panel verim kaybına göre otomatik olarak çalışması sağlanabilmektedir. Borawake vd. (2025) toz sensörü ile kirlenmenin algılanmasını sağlayarak sulu temizleme sistemini aktive etmiştir. Oufettoul vd. (2025) ise, ASS verileriyle belirlenen kirlilik düzeyi belirli bir seviyeyi aştığında, panel yüzeyine yerleştirilen şeffaf döner film mekanizmasını çalıştırmıştır.

Hossain vd. (2025) ise bu yaklaşımları bir adım öteye taşıyarak panelin verimini ML algoritmaları ile tahmin ederek otomatik su püskürtmeli temizlik sistemini tetikleyen bir karar algoritması geliştirmiştir. Benzer şekilde, Perarasi vd. (2021) IP temelli bir

yaklaşım ile panel yüzeyindeki kirliliği tespit edip, otomatik temizlik sürecini başlatmayı önermiştir. Dron tabanlı görüntüleme sistemleri de karar verme süreçlerinde öne çıkmaktadır (Aashika vd. 2020). Ahmed vd. (2025), HALCON tabanlı DL algoritmalarını kullanarak panellerdeki kirlenme türlerini sınıflandırmış ve temizlik robotlarına veri sağlamıştır. Bu yaklaşım, özellikle büyük ölçekli güneş enerji santrallerinde gerçek zamanlı karar mekanizmaları için umut vadetmektedir.

Villarini vd. (2017), Hata Türleri ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effect Analysis – FMEA) yaklaşımını kullanarak gerçek bakım verileri üzerinden PV sistemlerde arıza modlarını analiz etmiş ve bakım planlarının güvenilirlik merkezli olarak optimize edilebileceğini göstermiştir. Bu yaklaşım, sadece temizlik değil tüm bakım faaliyetlerini daha öngörülebilir hale getirmektedir. Büyük ölçekli santrallerde deterministik ve stokastik optimizasyon yöntemleri öne çıkmaktadır. Castillo vd. (2023), temizlik planlamasında gelir-gider dengesini gözeten iki model önermiş; özellikle stokastik modelin yağış ve ışıınım belirsizlikleri altında daha yüksek kazanç sağladığını göstermiştir. Orta Doğu koşullarına odaklanan Matar ve An (2024) ise, belirsiz hava koşulları altında optimal temizlik sıklığını hesaplamış ve mevcut uygulamalardan daha uzun temizlik aralıklarının ekonomik açıdan avantajlı olabileceğini belirtmiştir.

Dolayısıyla literatürde karar verme mekanizmaları; referans panel karşılaştırmaları, ekonomik eşik tabanlı protokoller, optimizasyon tabanlı programlama teknikleri ve ML tabanlı akıllı sistemler olmak üzere dört ana grupta değerlendirilebilir. Yeni nesil yaklaşımlar, özellikle belirsizlik altında karar verme ve çok kriterli optimizasyon yönünde gelişerek, PV santrallerde temizlik planlarının daha verimli ve sürdürülebilir şekilde uygulanmasına katkı sağlamaktadır.

Ancak bu yaklaşımların çoğu, uniform kirlenme varsayımı üzerine kuruludur. Gerçek saha koşullarında ise panellerin yalnızca belirli bölgelerinde kirlenme oluşabilmekte, bu durum da panel çıkış karakteristiğini doğrusal olmayan şekilde etkilemektedir. Dolayısıyla karar verme mekanizmalarında non-uniform kirlilik dikkate alınmadığında, temizlik zamanlaması ve etkinliği hatalı değerlendirilebilmekte gereksiz temizleme işlemleri uygulanabilmektedir.

Çizelge 2.1 Fotovoltaik sistemlerde karar verme mekanizmaları üzerine literatür özeti.

Çalışma	Yöntem / Yaklaşım	Çalışma Alanı ve Zamanı	Öne Çıkan Bulgular
Temizlik Takvimi Uygulamaları			
Singh & Chandra (2023)	CNN + HBBHO	Görüntü analizi ile temizlik zamanlaması	DL ile toz tespiti yapılmış, optimizasyon ile optimum temizlik aralıkları belirlenmiştir.
Castillo vd. (2023)	Deterministik ve stokastik optimizasyon	PV çiftliklerde temizlik planlaması	Stokastik model, yağış ve ışıınım belirsizlikleri altında %4,6 daha yüksek kârlılık sağlamıştır.
Zhang vd. (2025)	VMD + cGAN tabanlı makine öğrenmesi	Endüstriyel PV çiftlikler	Optimum temizlik periyotlarını öneren yapay zekâ destekli karar sistemi geliştirilmiştir.
Fathi vd. (2017)	Teknik-ekonomik temizlik protokolü analizi	Cezayir Sahra bölgesi, bölgesel	Kirlenme eşiği %7 olarak belirlenmiş, bu seviyeden sonra temizlik ekonomik olarak anlamlı bulunmuştur.
Shenawy ve Ghetany (2021)	Farklı temizlik aralıkları analizi	Mısır, bölgesel	Haftada bir, ayda bir, iki ayda bir ve üç ayda bir temizlik sırasıyla %2.39, %10.89, %30.16 ve %41.97 oranlarında kayıp
Hammad vd. (2018)	Regresyon + ANN	Ürdün, bölgesel	Toz ve sıcaklığın verim kaybına etkileri modellenmiş, optimum temizlik sıklığı hesaplanmıştır.
Rodrigo vd. (2020)	LCOE tabanlı optimum temizlik planlaması	Meksika, bölgesel	LCOE analizine göre 12–31 gün aralığında temizlik yapılması önerilmiştir.
Matar & An (2024)	Simülasyon + optimizasyon temelli planlama	Orta Doğu (Abu Dabi) , bölgesel	Belirsizlik koşullarında optimum temizlik sıklığı 34 gün olarak hesaplanmıştır.
Gerçek Zamanlı Temizlik Kararı			
Kargacıoğlu (2018)	Eşik tabanlı LDR sensör kontrollü sistem	Tek yönlü fırçalı, eşik değer aşıldığında	LDR sensörlerle çıkış gücü izlenmiş, verim kaybı eşiği aşıldığında fırçalı temizlik mekanizması devreye alınmıştır.
Abraim vd. (2023)	Referans sistem temelli karar mekanizması	Green Energy zaman serisi analizi ile geçmiş kayıp, eşik tabanlı	Sürekli temiz referans panel ile doğal kirli panel karşılaştırılmış, üretim kaybı eşiğine ulaşıldığında yazılım otomatik temizlik zamanı belirlemiştir.
Hossain vd. (2025)	ML tabanlı toz tespiti + otomatik sulama	Sulu otomatik temizlik, eşik değer aşıldığında	ML ile verim tahmini (0–1) yapılarak su püskürtmeli temizlik otomatik tetiklenmiştir.
Oufettoul vd. (2025)	ASS verisine dayalı şeffaf film mekanizması	Susuz otomasyon, eşik değer aşıldığında	Ares Soiling Station verileriyle kirlilik seviyesi izlenmiş, eşik değeri aşıldığında döner film hareket ettirilerek temizlik döngüsü başlatılmıştır.
Mutluer & Erat (2019)	Bulanık mantık tabanlı akıllı sistem	PV panel temizliği, kirlilik tespiti anında	Güç, sıcaklık, kirlilik ve gölgelenme faktörlerine dayalı olarak %17 üretim artışı sağlayan otomatik kontrol mekanizması geliştirilmiştir.
Borawake vd. (2025)	Optik toz sensörü tabanlı otomatik sistem	Sulu otomatik temizlik, kirlilik tespiti anında	Optik parçacık sayıcı (toz sensörü) ile kirlilik algılanarak sulu temizlik sistemi otomatik olarak aktive edilmiştir.
Perarasi vd. (2021)	IP tabanlı kontrol sistemi	Akıllı PV izleme, kirlilik tespiti anında	Görüntü tabanlı kir tespitiyle otomatik silecek sistemi devreye alınmıştır.
Ahmed vd. (2025)	Dron + DL (HALCON CNN)	Sınıflandırma, kirlilik tespiti anında	Farklı kir tipleri %99 doğrulukla sınıflandırılmış, robotlara veri sağlanmıştır.

2.5 Literatürdeki Açık Noktalar ve Çalışmanın Katkısı

Literatürde panel temizliği ve kirlenme yönetimi alanında yapılan çalışmalar, çeşitli önemli boşluklar içermektedir. Lokasyon bazlı yöntemler, panellerin çevresel verilerine dayanarak belirli periyotlarda temizlik planlaması yapabilmekte ancak bu yaklaşımların genelleme yeteneği sınırlıdır; farklı saha koşulları ve çevresel değişkenlerde aynı periyotlar optimum sonuç vermeyebilir.

Ayrıca, panel temizliğinde karar verme otomasyonlarında çoğu çalışmada kirlilik uniform kabul edilmekte, kayıplar ve temizlik uygulaması bu varsayıma göre hesaplanmaktadır. Oysa non-uniform kirlenme durumlarında, kayıplar farklı hava koşullarında değişkenlik göstermekte ve mevcut literatürde bu durumların doğru tespiti ve modellenmesi yeterince ele alınmamaktadır.

Temizlik kararları genellikle mevcut kayba dayalı olarak belirli bir eşik değeri ile alınmakta, gelecekte oluşabilecek kayıplar ve temizlik maliyetleri göz önünde bulundurulmamaktadır (Çizelge 2.1). Bu yaklaşım, enerji verimliliği açısından optimum olmayan temizlik zamanlamalarına ve gereksiz sarfiyata neden olmaktadır. Benzer şekilde, toz büyüklüğü ve yoğunluğu üzerinden yapılan analizler, farklı toz türleri ve geçirgenlik değerleri göz önünde bulundurulmadığı için genelleme yeteneği sınırlıdır (Fan vd. 2022).

Görüntü işleme tabanlı çalışmalar çoğunlukla panelleri kirli/temiz şeklinde sınıflandırmakta ve kirli panelin verim kaybını nicel olarak değerlendirememektedir. Bu nedenle, elde edilen sınıflama sonuçları çoğunlukla karar verme mekanizmalarına doğrudan entegre edilememekte ve enerji bazlı analizlerle ilişkilendirilememektedir. Robotik uygulamalarda ise sistemler paneller üzerinde hareket ederek temizlik yaparken hem taşıma zorlukları hem de panel camına uygulanan basınç nedeniyle olası zararlar söz konusu olmaktadır. Özellikle çatı uygulamalarında bu robotik sistemler iş güvenliği açısından riskler oluşturmakta ve kalıcı sabit sistemler bu tür sorunlara çözüm sunabilmektedir.

Çizelge 2.2 Mevcut PV panel temizleme yaklaşımlarının karşılaştırmalı özeti.

Kategori / Yazar	Yöntem / Yaklaşım	Öne Çıkan Katkıları	Temel Sınırlılıklar	Bu Çalışma ile İlişkisi
Manuel Temizlik Mostefaoui vd. (2019), Shenawy ve Ghetany (2021).	Su veya fırça ile elle temizlik	Düşük ilk yatırım, kolay uygulama	İş güvenliği riski, yüksek iş gücü, panel yüzey hasarı riski	Otonom temizliğe geçiş ihtiyacını motive eder
Taşınabilir Yarı Otomatik Sistemler Ronnaronglit & Maneerat (2019), Yan vd. (2020), Sundaram vd. (2019), Park vd. (2018).	Ultrasonik sensörlü, rüzgâr dirençli, travers eden veya hava üflemleri robotlar	Farklı panel boyutlarına uyum, insan müdahalesi olmadan temizlik	Her satır için manuel konumlandırma gerektirir, uniform kirlenme varsayımı yapar	Sabit sistemlerin gerekliliğini ve enerji optimizasyon ihtiyacını destekler
Sabit Yarı Otomatik Sistemler Akyazı vd. (2019), Habib vd. (2021).	Kayıslı veya iki aşamalı (hava üfleme + fırça)	Sürekli temizlik, düşük bakım, su tasarrufu	Mobilite eksikliği, sensör geri bildirimi veya karar algoritması yok, tüm yüzeyde gereksiz temizlik	Bu çalışmadaki panel-montajlı sistemin temelini oluşturur
Tam Otonom Sistemler Mutluer&Erat (2019), Kargacıoğlu (2018), Borawake vd. (2025), Oufettoul vd. (2025).	Bulanık mantık, LDR sensör, optik toz sensörü, Ares soiling station verisi	Gerçek zamanlı kirlenme algısı ve otomatik temizlik	Uniform kirlenme varsayımı, eşik değer, tüm yüzeyde gereksiz temizlik, enerji optimizasyonu yok	RTVA algoritması bu sınırlılığı enerji ve rota optimizasyonu ile giderir, eşik değer varsayımını tahmini kayıp ile genişletir
Görüntü İşleme / Bilgisayarlı Görü Tabanlı Sistemler Aashika vd. (2020), Perarasi vd. (2021), Ahmed vd. (2025), Kishor vd. (2025).	RGB, HSV, CNN, HALCON ve termal tabanlı görüntü analizi	Gerçek zamanlı kir tespiti, uzaktan denetim	Enerji analizi eksikliği, bir çoğu görüntüyü temizlik gerekliliği kararında kullanmıyor,	RTVA öncesi hafif IP ile karar sürecinin temelini oluşturur
Makine Öğrenmesi / Yapay Zekâ Tabanlı Sistemler Hossain vd. (2025).	ML, ANN	Sürekli temizlik indeksi tahmini [0-1] ve otomatik karar üretimi	Eşik değer tabanlı karar verme, yüksek işlem gücü, büyük veri gereksinimi, enerji optimizasyonu yok	Gömülü sistemlerde Sensör + kirlenme hızı destekli karar bütünleştirilmiştir
Bu Çalışma (RTVA Tabanlı Sistem) Üstündağ (2025).	Görüntü tabanlı kirlenme tespiti + Recursive Tabular Validation Algorithm (RTVA)	Non-uniform kirlenmeye duyarlı, enerji optimize rotalama ve gelecek zaman ilişkili temizlik kararı	Büyük ölçekli tesisler	✓

Buna ek olarak, mevcut tam otonom sistemlerin çoğu, sensör veya yapay zekâ temelli olsa dahi hâlâ çeşitli disiplinler arası zorluklar barındırmaktadır. Khalid vd. (2023) tarafından yapılan kapsamlı incelemede, PV panel yüzeylerindeki toz birikiminin

etkileri, matematiksel modelleri, temizlik mekanizmaları ve sürdürülebilir çözümleri değerlendirilmiş; ancak mevcut sistemlerde mekanik stabilite, enerji yönetimi, bakım ve iletişim altyapısı gibi pratik mühendislik sorunlarının hâlâ devam ettiği vurgulanmıştır. Ayrıca, modelleme düzeyinde ıslanım tahmini, kirlenme kayıp indeksleri ve dönüşüm verimi parametrelerinin yeterince bütüncül şekilde ele alınmadığı belirtilmiştir. Bu sınırlamalar, literatürde enerji optimizasyonu ile kontrol basitleştirmesini aynı çatı altında birleştiren bütünlük çerçevesi eksikliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, literatürdeki söz konusu boşlukları gidermeyi hedeflemektedir. Önerilen yaklaşımda kirlenme konumsal olarak tespit edilmekte, panel konfigürasyonu dikkate alınarak non-uniform kirlenme durumlarında dahi mevcut ve gelecekteki enerji kayıpları tahmin edilebilmektedir. Meteorolojik tahminler yardımıyla geleceğe yönelik kayıp projeksiyonları oluşturulmakta, böylece enerji verimliliği esaslı, öngörülü temizlik kararları alınabilmektedir.

Ayrıca geliştirilen iki eksenli, panel üzerine sabitlenebilen robotik sistem, temizlik sırasında enerji sarfiyatını minimize ederek, hareketli sistemlerde görülen gereksiz enerji tüketimini ortadan kaldırmaktadır. Bu donanım, RTVA (Recursive Tabular Validation Algorithm - Yinelemeli Tablo Doğrulama Algoritması) tabanlı rotalama yöntemiyle birlikte çalışmakta; yalnızca kirli bölgelerde temizlik yaparak enerji, zaman ve mekanik yük açısından optimizasyon sağlamaktadır.

Bu bütünlük yaklaşım, hem enerji tüketimi – karar karmaşıklığı dengesini optimize etmekte hem de yerel kirlenmeye duyarlı bir otonom temizleme mimarisi sunmaktadır. Böylece çalışma, literatürde tespit edilen üç temel eksikliği – (i) non-uniform kirlenme modelleme yetersizliği, (ii) sabit sistemlerde rota optimizasyonu eksikliği, (iii) gerçek zamanlı enerji-odaklı karar eksikliği – doğrudan hedef alarak, PV bakım süreçlerinde ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

3. MATERYAL ve METOT

Uygulamada ve literatürdeki önceki çalışmalar incelendiğinde, panel temizliğinin çoğunlukla insan gücü veya insan desteğine ihtiyaç duyan yarı otomatik sistemler ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Özellikle çatıya kurulu santrallerde, proje aşamasında panel temizliği için ayrı bir alan planlanmamakta, planlansa bile bu durum çatıda daha az sayıda panel kurulmasına yol açmaktadır. Ayrıca, insan gücü ile yapılan temizlik işlemleri hem zaman alıcıdır hem de çatı uygulamalarında iş güvenliği açısından ciddi riskler taşımaktadır.

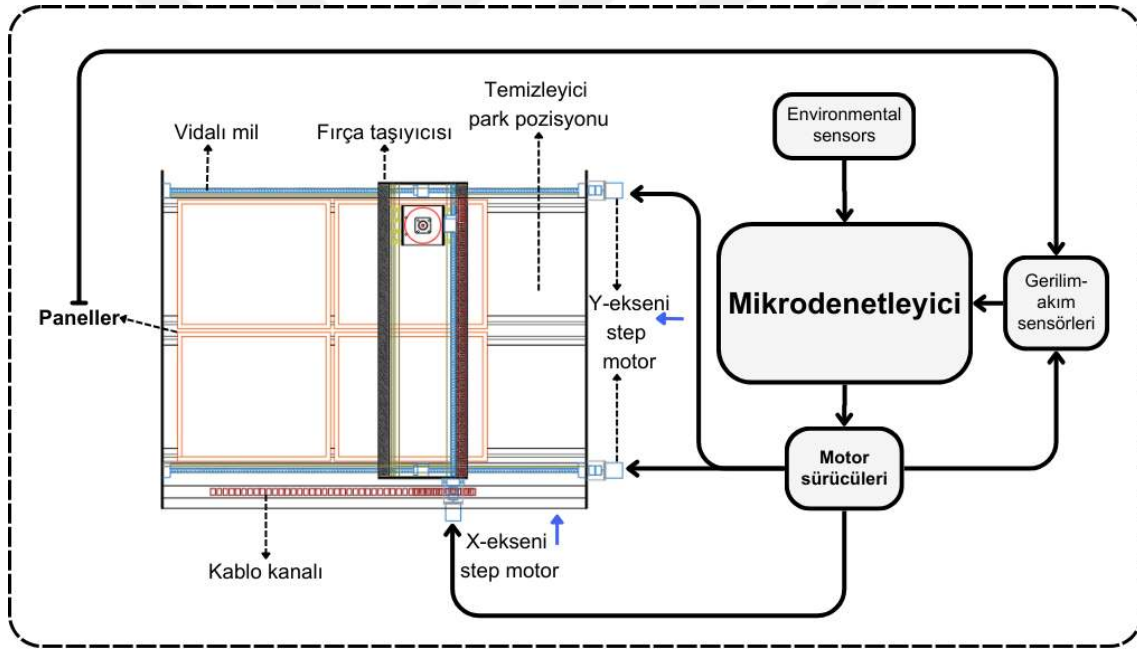
Literatürde geliştirilen tam otomatik sistemler incelendiğinde ise, bu sistemlerin genellikle non-uniform kirliliği tespit etme veya yalnızca kirli noktaların temizlenmesi gibi enerji sarfiyatını optimize eden stratejilere odaklanmadığı görülmektedir. Temizleme kararının çoğunlukla eşik değer tabanlı olması, temizlik sonrası elde edilecek verimin maksimize edilmesini engellemekte ve gereksiz enerji-su kullanımına yol açabilmektedir.

Piyasada çok sayıda panel temizleme robotu bulunsa da bunların büyük bölümü manuel olarak sistem üzerine yerleştirilmekte ve çalıştırılmaktadır. Çatı uygulamalarında ise yer kısıtı nedeniyle bu tür sistemlerin kurulumu zorlaşmakta, makinelerin vinç gibi yardımcı ekipmanlarla çatılara çıkarılması gerekmekte ve bu da tek bir temizlik operasyonunun dahi maliyetini artırmaktadır. Bu sebeplerle panel temizliği çoğu zaman geri planda kalmakta, bu da enerji üretiminde verim kayıplarına yol açmaktadır.

Diğer yandan, güneş panellerinin temizliği sırasında cam yüzey üzerinde yürünmesi ile panellere uygulanan ağırlık, gözle görülmeyen kılcal çatlaklara sebep olabilmekte; bu çatlaklarda biriken yağmur, kar veya temizlik suyu uzun vadede ciddi verim kayıplarına neden olmaktadır. Dolayısıyla özellikle çatı tipi uygulamalarda, panel üzerinde gezinme ihtiyacını ortadan kaldıran, taşıma zorluğu bulunmayan ve panel kasasına doğrudan monte edilebilen tam otomatik robotik sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

3.1 Geliştirilen Temizleme Robotu Tasarımı

Bu çalışmada geliştirilen temizleme robotu, söz konusu ihtiyaçlara çözüm sunacak şekilde tasarlanmıştır. Robot; mekanik yapı, algılama ve karar verme ünitesi ve kontrol-yazılım altyapısı olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Mekanik yapı, panel yüzeyine entegre edilebilen iki eksenli milli sistem üzerine kurulmuş olup, fırça ile yüzeyde minimum basınç uygulayacak biçimde optimize edilmiştir. Algılama ünitesi, IP algoritmaları ve sensörlerle desteklenmiş karar mekanizması sayesinde yalnızca kirli bölgeleri hedef alarak gereksiz temizlik operasyonlarını önlemektedir. Kontrol sistemi ise mikrodenetleyici tabanlı olup, tam otomatik şekilde karar vermesini sağlamaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 İki eksenli otonom panel temizleme sistemi ve kontrol mimarisi şeması.

Bu tasarım sayesinde, çatı tipi PV uygulamalarda iş güvenliği artırılmakta, bakım maliyetleri azaltılmakta ve su-enerji tasarrufu sağlanarak sürdürülebilir bir temizlik yaklaşımı sunulmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen robot, PV panellerin yüzeyinde oluşan kirlenmeyi konumsal tespit yöntemiyle belirleyip, yalnızca gerekli bölgelerde temizlik yapacak şekilde

tasarlanmıştır. Tasarımın temel amacı, mevcut robotik sistemlerde görülen enerji tüketiminin önemsenmediği ve panel yüzeyine zarar verme durumlarının bulunduğu sistemlerde riskleri ortadan kaldırarak, verimli, güvenli ve enerji farkındalığı olan bir çözüm sunmaktır.

Robotun tasarımı üç ana bileşenden oluşmaktadır:

Mekanik Sistem:

İki eksenli hareket kabiliyetine sahip mil tahrikli sistem panellere altlık yapılarak monte edilmiştir. Temizleme ünitesi, fırça, tek eksenli fırça taşıyıcısı ve hareket için kullanılan motorlardan oluşmaktadır.

Algılama ve Karar Verme Ünitesi:

Panel yüzeyindeki kirlenme, kamera tabanlı görüntü işleme ve sensör verileri (elektriksel ve çevresel ölçümler) ile belirlenmektedir. Non-uniform kirlilik durumlarında, kirin bulunduğu konum tespit edilerek robot yalnızca ilgili bölgeye yönlendirilebilmektedir. Karar verme mekanizması, üretim kaybı tahmini ve gelecek zamanlı meteorolojik veriler (örneğin yağmur beklentisi) ile desteklenmiştir.

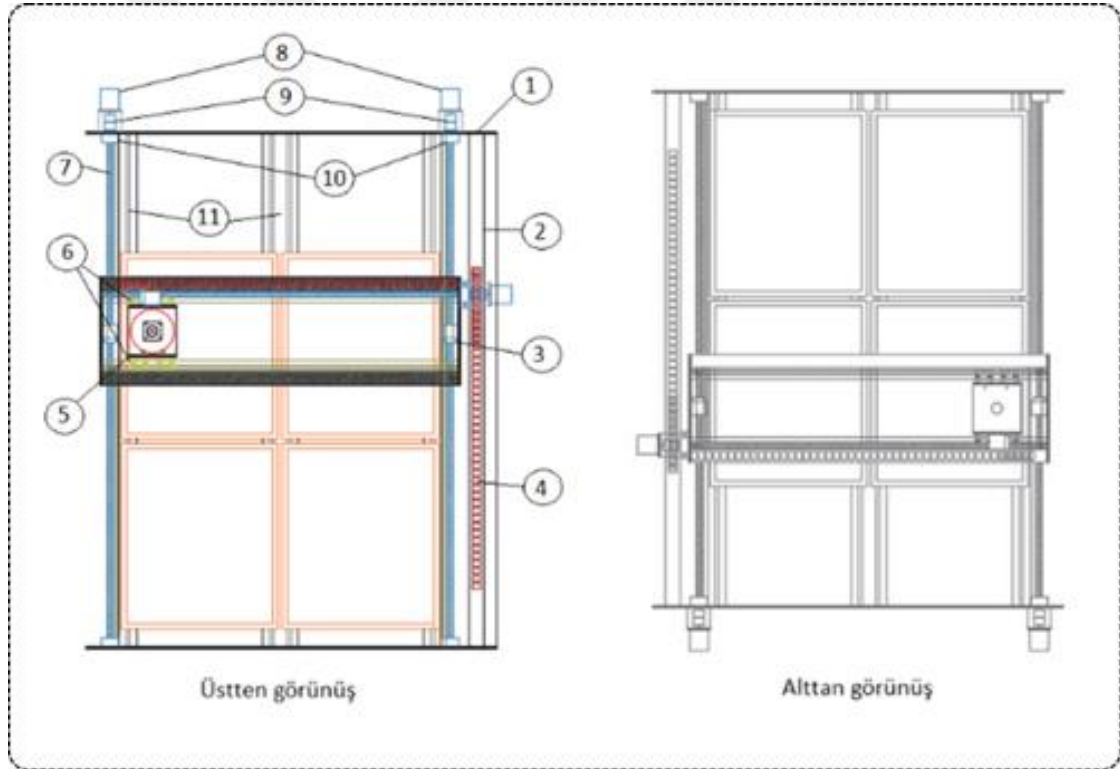
Kontrol ve Yazılım Altyapısı:

Arduino tabanlı mikrodenetleyici ile hareket kontrolü sağlanmaktadır. IP algoritmaları Python/OpenCV tabanlıdır ve panel yüzeyindeki kir desenleri gruplandırılabilir. Sistem, temizleme sarfiyatını minimize edecek şekilde yalnızca gerektiğinde temizlik yapacak biçimde optimize edilmiştir.

Bu tasarım, panel yüzeyinde sabit olarak kurulabilen bir sistem olup, özellikle çatı tipi uygulamalarda iş güvenliği ve bakım kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, geleneksel sürekli temizlik döngüsü yerine, enerji farkındalığına dayalı temizlik kararı ile su ve enerji tasarrufu elde edilmesi hedeflenmiştir.

3.1.1 Mekanik Detaylar ve İmalat Süreci

Robotik temizleme sistemi, panellerin etkin şekilde temizlenebilmesi için gerekli tüm mekanik ve elektronik bileşenleri barındıracak şekilde tasarlanmıştır. İlk aşamada, mekanik tasarım ve ölçülendirme çalışmaları AutoCAD ortamında gerçekleştirilmiş ve sistemin prototip çizimleri hazırlanmıştır (Şekil 3.2). Taşıyıcı yapı, 4 adet 25 W gücündeki panelin toplam yüzey alanını kapsayacak şekilde boyutlandırılmıştır. Ölçeklenebilir bir sistem olup, daha büyük panellerde eksenleri kontrol eden millerin uzatılması ile istenilen ölçülerde hazırlanabilir. Ayrıca, taşıyıcı sistemin park pozisyonunda gölge etkisi yaratmaması için dikey eksen ölçüsü bir miktar daha uzun tasarlanmıştır.



Şekil 3.2 Tasarlanan robotik sistemin CAD çizimleri.

Mekanik aksamın hazırlanması için gerekli Şekil-3.2’de etiketlenen malzeme listesi şu şekildedir; Kırmızı renk ile işaretlenenler güneş panelleri olmak üzere;

- 1- 3mm. metal sac
- 2- Kablo taşıyıcı sacı

- 3- Vidalı mil somun ve gövdesi
- 4- Kablo taşıyıcı
- 5- Fırça arabası (3mm. metal sac)
- 6- Lineer rulman ve alt destekli miller
- 7- Vidalı mil
- 8- Step motor
- 9- Kaplin
- 10- Vidalı mil uç yatakları
- 11- Sigma profil

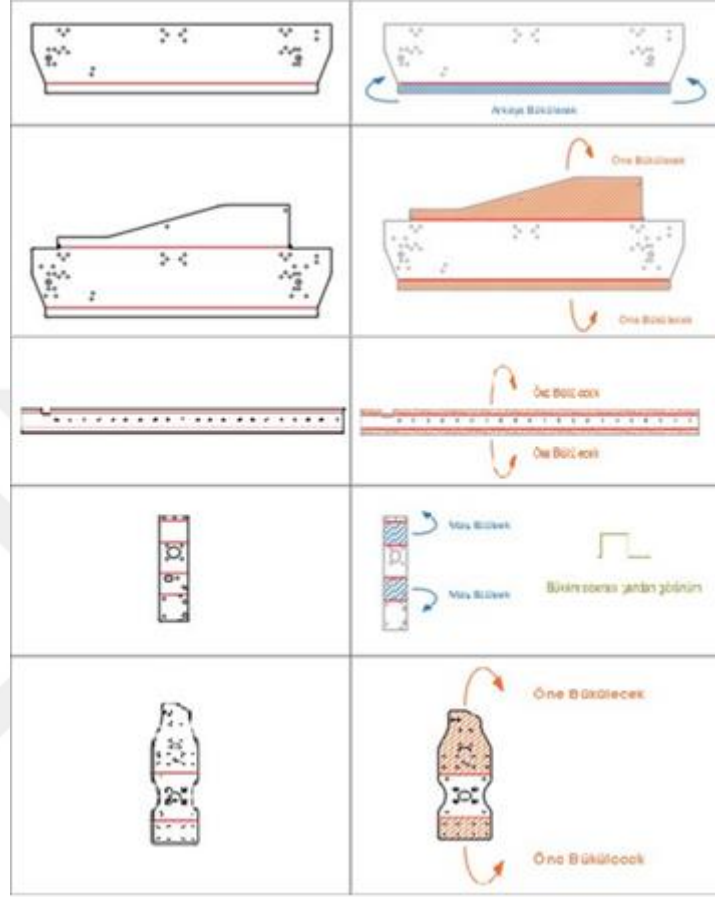
Sistemin bütünleşmesi ve ağırlık dengesinin sağlanabilmesi amacıyla ana taşıyıcı yapı sigma profiller (11) ve 3 mm metal sac (1) kullanılarak oluşturulmuştur. Hareket mekanizmasında ortaya çıkabilecek küçük tolerans farklılıklarının motor performansını etkilememesi için kaplin (9) tercih edilmiştir (Şekil 3.3). Temizleyicinin döner mil üzerinden sorunsuz şekilde hareket edebilmesi için flanşlı somun, mil üzerine binen yükün dengelenmesi için alt destekli mil ve lineer hareketin düzgün bir şekilde sağlanabilmesi için lineer rulmanlar (6) kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Mekanik sistem inşasında kullanılan malzemeler.

Bu tasarım sayesinde mekanik yapı hem dayanıklı hem de uzun süreli kullanımda

titreşim ve yük dengesizliklerine karşı güvenilir bir performans sunacak şekilde optimize edilmiştir.



Şekil 3.4 Metal sacların lazer kesim için CAD çizimi.

Sigma profiller tüm sistemi bir arada tutmak için belirli ölçülerde hazırlandıktan sonra lazer kesim ile hazırlanan metal sac parçaları ile birleştirilmiştir (Şekil 3.4).

Sistemin iki ekseninde hareket edebilmesi için toplamda 3 adet step motor kullanılmıştır. Bunlardan biri, yatay ekseninde fırçanın sağa–sola hareketini sağlarken; diğer iki motor, dikey ekseninde fırça taşıyıcısını yukarı–aşağı hareket ettirmektedir. Step motorların adım kontrollü yapısı sayesinde, fırça belirlenen koordinatlara yüksek hassasiyetle ulaşabilmektedir.

Dikey hareketin sağlanmasında kullanılan vidalı miller, fırça taşıyıcısını doğrudan yukarı ve aşağı yönlendirmektedir. Ancak bu ekseninde yalnızca tek motor ve mil ile

çalışıldığında sistemde kararsızlıklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle iki motor ve iki milin senkronize şekilde çalışması tercih edilmiş, böylece fırça taşıyıcısının dengeli, titreşimsiz ve güvenilir bir şekilde hareket etmesi sağlanmıştır. Bu sayede vidalı millerin hareketinde kararlılık korunmuş ve fırçanın istenilen koordinatlara hassas biçimde ulaşması mümkün olmuştur. Sistemin prototipi, 355×420 mm boyutlarında dört güneş paneli üzerine monte edilen milli mekanik düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapı, her panel üzerinde hareket edebilen iki eksenli bir temizleme mekanizmasına sahiptir. Şekil 3.5'te imalat aşamasına ait fotoğraflar sunulmuştur. Mekanik sistem inşa edildikten sonra yatayla 30 derece açı yapacak şekilde ayak bağlantıları yapılarak resimlerin sonunda görüldüğü gibi Afyon Kocatepe Üniversitesi Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi'ne (GÜRAM) kurulumu yapılmıştır.



Şekil 3.5 İmalat aşaması ve prototipin kurulumu (GÜRAM).

Diğer bileşenlerin montajı ve ikinci eksen taşıyıcısının panel yüzeyini kapatmayacak şekilde ayarlanması sonucunda, taşıyıcı sistem 930×1170 mm boyutlarında tasarlanmıştır. İkinci eksen taşıyıcısı ise 243×814 mm ölçülerinde olup, park konumunda paneller üzerinde gölge oluşturmaması için dikey eksen belirli bir miktar uzatılmıştır. Bu tasarım yaklaşımıyla sistem, hem panel yüzeyinde etkin temizlik yapabilmekte hem de enerji üretiminde gölgelenme kaynaklı kayıpları bertaraf edecek şekilde konumlandırılabilir. Kullanılan PV modül boyutlarına göre üretilen mekanik yapı, kullanılan malzemeler boyutlandırılarak istenilen ölçülerde oluşturulabilmektedir.

3.1.2 Akıllı Karar Verme Mekanizması

Geliştirilen temizleme sisteminin akıllı karar mekanizması; kontrol donanımı, veri toplama – karar akışı ve enerji/üretim kaybı temelli analitik model olmak üzere üç temel bileşen üzerine kurulmuştur. Böylece sistem, yalnızca kirlenmenin varlığını değil, aynı zamanda gelecekte oluşacak enerji kaybını da dikkate alarak temizlik kararı verebilmektedir.

3.1.2.1 Kontrol Mimarisi ve Donanım Gerçekleşmesi

Geliştirilen temizleme sisteminin kontrolü için gerekli elektronik bileşenler, dış ortam koşullarından korunması amacıyla IP54 koruma sınıfına sahip polyster pano içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.6(a)). Bu pano içerisinde:

- mikrodnetleyici tabanlı kontrol kartı,
- step motor sürücüleri,
- sensör arabirimleri,
- güç besleme modülü
- ve haberleşme modülleri

bulunmaktadır.

Kontrol ünitesi olarak Arduino tabanlı bir mikrodnetleyici kullanılmıştır (şekil 3.6(b)).
Bu mikrodnetleyici:

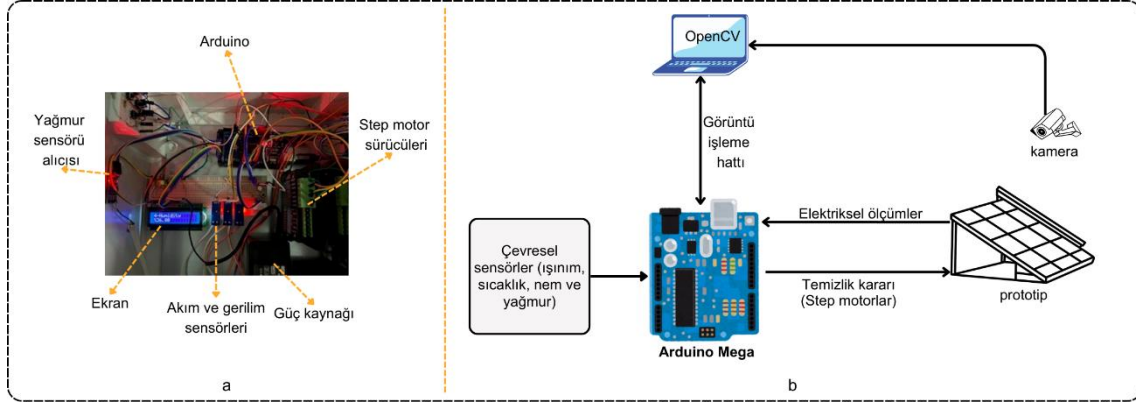
- step motorların sürülmesi (X–Y eksen hareketleri),
- elektriksel ölçümlerin (akım/gerilim) ve çevresel verilerin (sıcaklık, ışıınım vb.) okunması,
- verilerin kayıt edilmesi ve karar verme algoritmasının çalıştırılması

görevlerini eş zamanlı olarak yürütmektedir. Sisteme entegre edilen ESP8266 Wi-Fi modülü sayesinde ölçülen veriler uzaktan izlenebilmekte, gerekirse sistem parametreleri uzaktan güncellenebilmektedir.

Sistemde gerçek zamanlı izleme için birden fazla sensör entegre edilmiştir:

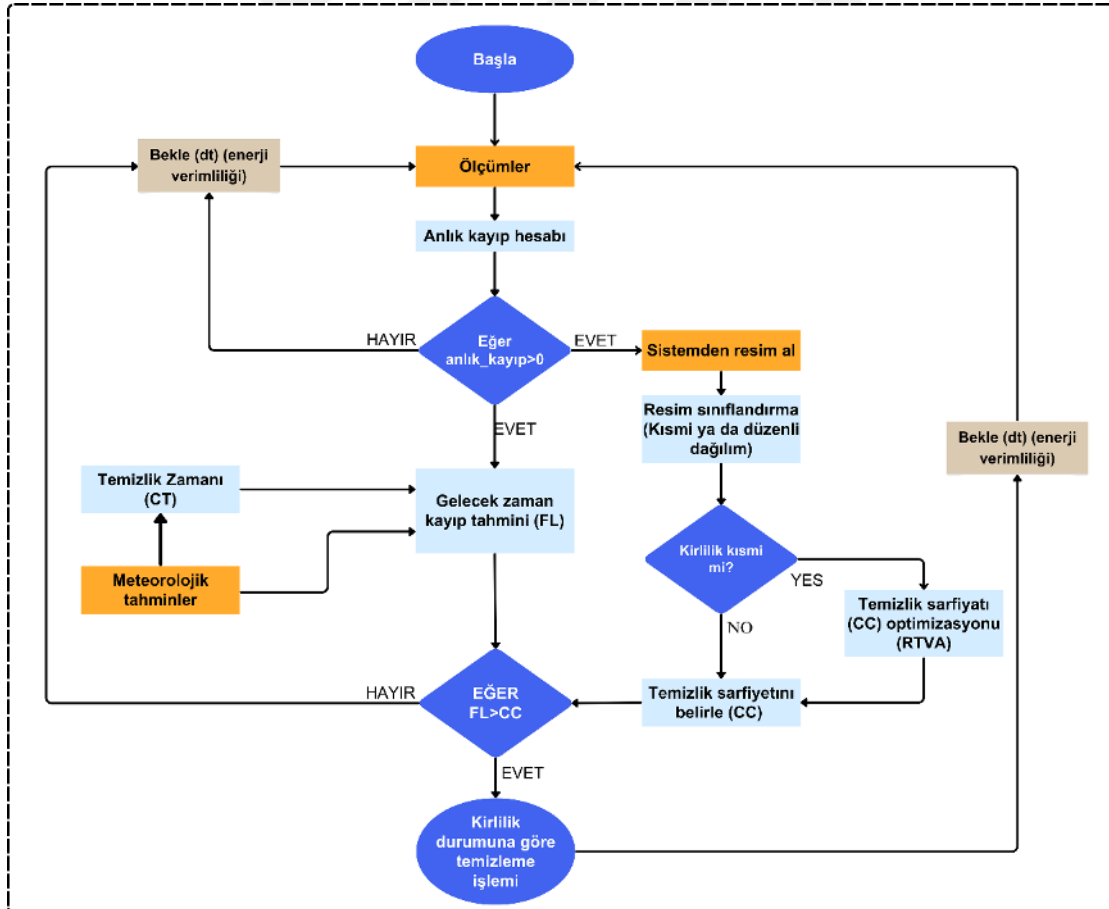
- ortam sıcaklık ve nemi için DHT-22 sensörü,
- panel çıkış gücü ve temizleme sisteminin tükettiğı gücü ölçmek için ACS724 akım sensörleri,
- yağış durumunu algılamak ve yağmur sırasında temizlik yapılmasını önlemek için Arduino yağmur sensörü,
- panel yüzeyinin anlık görüntülerini almak için sabit konumlandırılmış bir kamera.

Bu sensörlerden gelen veriler, şekil 3.6(b)'de şematik olarak gösterilen veri akışı üzerinden mikrodnetleyiciye iletilmekte; kamera görüntüleri ise Python–OpenCV tabanlı bir yapı ile bilgisayarda işlenerek kirlilik haritası ve koordinat bilgisi hâline dönüştürölmektedir. Elde edilen bu konumsal kirlenme bilgisi, temizleme kararının verilmesi ve RTVA rotalama algoritması için temel girdiyi oluşturmaktadır.



Şekil 3.6 Geliştirilen temizleme sisteminin donanım ve kontrol mimarisi: (a) deney düzeneği; (b) veri toplama ve kontrol akışı.

Temizleme ve karar sürecinin genel akış diyagramı Şekil 3.7’de verilmiştir. Bu diyagramda, sensör verilerinin okunması, anlık kayıp tahmini, geleceğe dönük kayıp projeksiyonu ve tam/bölgesel temizlik modları arasındaki geçişler gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Mikrodenetleyici üzerinde gerçekleştirilen kirlenme tespiti ve temizlik aktivasyonuna ilişkin karar akış diyagramı.

3.1.2.2 Enerji Kayıp Tahmini ve Analitik Çerçeve

Karar verme algoritması, enerji farkındalığı esasına göre tasarlanmıştır. Yalnızca “kirli/temiz” sınıflaması yapmak yerine, temizlik işlemi sonunda elde edilecek ek enerji kazancı ile temizleme için harcanacak enerji ve maliyet karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla hem anlık üretim kaybı hem de gelecek zamanlı kayıp tahmini yapılmaktadır.

Herhangi bir temizlik periyodu için (0–CT aralığında) oluşacak toplam enerji kaybı, temiz ve kirli panel güçleri arasındaki farkın zamana göre integrali şeklinde ifade edilebilir:

$$Loss_F = \int_{t=0}^{CT} (MPP_{clean}(t) - MPP_{dirty}(t)) \quad (1)$$

Burada $MPP_{clean}(t)$ ve $MPP_{dirty}(t)$, sırasıyla t anında temiz ve kirli panelin MPP değerleridir. MPP değeri, ölçülen ışınlam ve panel sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki şekilde modellenmiştir:

$$MPP(t) = G(t) \cdot \frac{MPP_{stc}}{G_{stc}} \cdot [1 - \mu_p \cdot (T_p(t) - T_{stc})] \quad (2)$$

$G(t)$ anlık ışınlam, G_{stc} Standart Test Koşulu (Standard Test Condition – STC) ışınlamı, MPP_{stc} referans güç, μ_p ise panelin güç sıcaklık katsayısını ifade etmektedir. $T_p(t)$ panel sıcaklığı, T_{stc} ise STC sıcaklığıdır. Ortam sıcaklığı T_a , bilinmesi durumunda panel sıcaklığı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$T_p = T_a + (T_{NOM} - 20) \cdot 1.25 \cdot \frac{G}{G_{stc}} \quad (3)$$

Farklı lokasyonlarda kirlenme hızı ve kirlenme seviyesi zamana bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Temiz ve kirli panel için kirlenme hızının farklılaşması, kayıp tahmininde kirlenme faktörünün de modele dahil edilmesini gerektirir. Bu durumda,

kirlenme fonksiyonları $S_{clean}(t)$ ve $S_{dirty}(t)$ ile ifade edilerek daha gerçekçi bir kayıp tahmini yapılabilir:

$$Loss_F = \int_{t=0}^{CT} (S_{clean}(t) \cdot MPP_{clean}(t) - S_{dirty}(t) \cdot MPP_{dirty}(t)) \quad (4)$$

Burada $S_{dirty}(t)$ tipik olarak zamanla artan (kirlenme biriken), $S_{clean}(t)$ ise temizleme sonrası sıfırlanan ve belirli bir profile göre yeniden artan bir fonksiyon olarak modellenenir.

Bu çerçevede:

- Elektriksel ölçümler ile anlık güç ve verim düşüşü,
- Çevresel sensörler ile dış koşullar (sıcaklık, ışınım, nem, yağmur),
- IP sonuçları ile konumsal kirlenme dağılımı

eş zamanlı değerlendirilmekte; böylece yalnızca “eşik tabanlı” bir karar yerine, beklenen enerji kazancı – temizlik maliyeti dengesine dayalı çok kriterli karar mekanizması kurulmaktadır.

Bu amaçla sistem, iki farklı çalışma modu ile yapılandırılmıştır:

Tam Temizlik Modu: Panel yüzeyinin tamamı taranarak temizlenir. Genellikle çok yüksek kirlenme ve/veya yüzey genelinde yaygın kir birikimi durumunda çalışır.

Bölgesel Temizlik Modu: IP veya sensör verileriyle belirlenen kirli bölgelerin koordinatlarına göre, fırça yalnızca ilgili alanlara yönlendirilir. Böylece hareket süresi ve enerji tüketimi azaltılır.

Görüntü tabanlı kirlenme tespiti, yalnızca anlık kayıp belirli bir eşiği aştığında devreye alınmakta; bu sayede kamera ve veri işleme tarafında gereksiz enerji ve hesaplama yükü de minimize edilmektedir. Elde edilen kir haritası, RTVA tabanlı rota optimizasyonu için giriş verisi hâline dönüştürülmektedir.

3.1.2.3 Hareket Sisteminin Enerji Tüketim Modeli

Temizleme kararının enerji farkındalıklı olabilmesi için, yalnızca enerji kaybı değil, hareket sisteminin harcadığı enerji de analitik olarak modellenmiştir. Bu amaçla, sistemin tüm panel yüzeyini taraması için gereken toplam adım sayısı ve buna karşılık gelen enerji tüketimi hesaplanmıştır.

X ve Y eksenlerinde fırçanın panel yüzeyini tamamen taraması için gereken toplam adım sayıları sırasıyla:

$$S_{x,all} = \left\lceil \frac{H_x - H_b}{r} \right\rceil \cdot \text{ceil} \left[\frac{H_y}{H_b} \right] \cdot \left\lceil \frac{2}{\delta} \right\rceil \quad (5)$$

$$S_{y,all} = 2 \cdot \left\lceil \frac{H_y}{r} \right\rceil \cdot \left\lceil \frac{2}{\delta} \right\rceil \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada:

- H_x, H_y : panel yüzeyinin cm cinsinden boyutları,
- H_b : fırça yarıçapı veya fırçanın bir geçişte temizlediği genişlik,
- r : vidalı mil adım boyu (mm/devir),
- δ : step motorun adım açısıdır.

Çizelge 3.1 Step motor sürücülerinin teknik özellikleri ile güç tüketim parametreleri.

Parametre	Değeri
δ	$1.8^\circ \pm 5\%$
I_{cc_x}	0.37 A.
I_{cc_y}	$\downarrow 1.07 - \uparrow 1.10$ A.
V_n	24 V.
t_s	1 ms.

Step motor ve sürücülerin anlık güç tüketimi:

$$P_{cc} = V_n \cdot I_{cc} \quad (7)$$

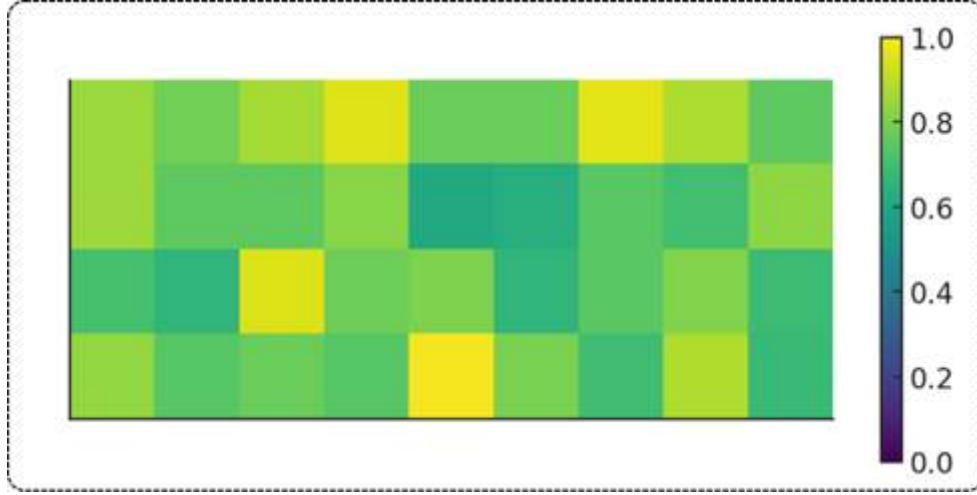
enerji, rota planlamasında maliyet fonksiyonu olarak değerlendirilmekte; böylece sistem, en az enerji tüketimiyle tüm kirli bölgelerin temizlenmesini sağlayacak rotayı seçebilmektedir.

Bu çalışmada non-uniform kirlenmenin belirlenmesi panel görüntülerinin işlenmesi ile yapılsa da panel çıkışına etkisi ve farklı koşullar altında çıkışın tahmin edilebilmesi için elektriksel ve çevresel ölçümler yapılmaktadır. Önerilen model, farklı kirlenme ve gölgelenme türlerine uygulanabilir, genelleştirilebilir bir çerçeve sunmaktadır.

3.2 Non-Uniform Kirlenme Tespiti ve Modellemesi

Toz, polen, kuş pislikleri, yaprak parçaları veya endüstriyel atıklar, panel yüzeyinde non-uniform kirlenmeye sebep olmaktadır. Sadece anlık verimin hesaplanması uniform kirlilik durumlarında farklı koşullardaki kaybın tahmin edilmesinde doğru bir yaklaşım olsa da, non-uniform kirlenmede MPP'nin lineer olmayan değişiminden dolayı bu çeşit kirlenmenin tespiti ve modellenmesi, hem temizlik kararının optimizasyonu hem de panel ömrünün korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada non-uniform kirlenme, panel yüzeyinden alınan görüntülerin işlenmesiyle belirlenmekte; ancak panel çıkış gücüne etkisinin doğrulanması için elektriksel ve çevresel ölçümlerle desteklenmektedir. Çünkü panel çıkışı, kirin konumuna, yoğunluğuna ve ışıyım engelleme kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla yalnızca görüntüye dayalı bir analiz eksik kalmaktadır. Önerilen model, tüm kirlenme ve gölgelenme çeşitlerine uygulanabilecek genel bir geçirgenlik temelli yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 3.9 Panel yüzeyinde non-uniform kirlenme dağılımının 4×9 hücreli ızgara modeliyle gösterimi.

Şekil 3.9’da panel yüzeyi 4x9’luk bir hücre ızgarası halinde modellenmiş ve non-uniform kirlenme dağılımı görselleştirilmiştir. Bununla alakalı detaylı anlatım Bölüm 3.2.2.3’de verilmiştir. Bu bölümde açıklanan geçirgenlik yaklaşımı, bu dağılıma benzer şekilde panel yüzeyinde tespit edilerek doğrulanmıştır. Önerilen yaklaşım, panel yüzeyinde elde edilen IP verilerini kullanarak yerel geçirgenlik haritaları çıkarmakta ve bu haritaları enerji kaybı tahminleri ile birleştirmektedir. Panel yüzeyinin ızgaralara ayrıldığı bu modelde her ızgara, normalize edilmiş geçirgenlik katsayısı ile temsil edilmiştir. Buna göre, kirlilik yoğunluğu yüksek bölgeler düşük geçirgenlik katsayısı ile, temiz bölgeler ise 1’e yakın katsayı ile modellenmiştir.

Elde edilen geçirgenlik dağılımı, panelin I–V karakteristiği üzerine yansıtılarak MPP kaymaları hesaplanmıştır. Bu sayede, yalnızca genel kirlenme değil, aynı zamanda lokalize kirlenmenin verim üzerindeki etkisi de ortaya konulmuştur.

3.2.1 Görüntü İşleme ile Kirlenme Tespiti

Lokalize kirlenmeler (özellikle kuş pislikleri veya toz yoğunlaşmaları) panel yüzeyinin yalnızca küçük bir bölümünü kapsasa dahi önemli verim kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, kirliliğin yüksek uzaysal doğrulukla tespit edilmesi, hedefe yönelik temizlik kararlarının alınabilmesi ve sistem verimliliğinin korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Bölüm 2.3.3 ve 2.3.4’de yer verilen literatürdeki IP uygulamalarına alternatif yaklaşımlar arasında termal görüntüleme (Mejía vd. 2019) ve ağır ölçekli PV santrallerinde Uzun Dalga Kızılötesi (Long-Wave Infrared – LWIR) tabanlı hava çekimleri (Zefri vd. 2023, Oliveira vd. 2020) bulunmaktadır. Bu yöntemler, panel yüzeyinde toz, kir, salyangoz yolu (snail trail) ya da hot-spot gibi anomalilerin yerleştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Çizelge 3.2 Literatürdeki görüntü ile kirlenme tespit yöntemleri ile bu çalışmanın karşılaştırması.

Çalışma	Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Abuqaoud & Ferrah, 2020	HSV renk uzayında doğrusal sınıflandırma	Basit, düşük işlem yükü	Işık değişimlerinden etkilenir, enerji analizi yok
Ünlütürk 2019	GLCM + ANN (laboratuvar ortamı)	%96 doğruluk, çoklu kirlilik seviyesi ayrımı	Gerçek saha koşullarına genellenemez
El Gallassi vd. 2023	Gece (backscatter) görüntüleme +HSV renk uzayı	Aynalardan saçılan ışığın parlaklığı ile temizlik indeksi korelasyonu	CSP odaklı, PV uyarlanabilirliği düşük
Hwang vd. 2023	İstatistiksel analiz ile temiz/az kirli/çok kirli sınıflandırma	Farklı kir yoğunluklarını ayırt edebilir	Gerçek zamanlı çalışmaya uygun değil
Fan vd. 2022	HSV, geçirgenlik analizi, histogram eşitleme	Hızlı işlem, düşük donanım ihtiyacı	Renk/ışık değişimlerinden etkilenir, genelleme zayıf
Simonazzi vd. 2020	Akıllı kirlenme sensörü (Camera + I-V)	Hibrit (optik + elektrik) ölçüm, I-V eğrisi odaklı	Kalibrasyon gerektirir, uniform I-V eğrisi
Li vd. 2016	Kinect V2 ile 3B yüzey haritalama	Derinlik verisiyle doğru kir profili	Donanım karmaşıklığı, maliyet
Pivem vd. 2019	RGB histogram & bölge segmentasyonu	Uniform ve non-uniform kirlilik sınıflandırması	Yalnızca renk bazlı analiz, enerji analizi yok
Aashika vd. 2020	Dron tabanlı görüntü analizi	Geniş ölçekli PV tarlaları, kirlilik tespiti anında	Desen eşleştirme algoritmasıyla kir tespiti yapılarak temizlik komutları otomatik oluşturulmuştur.
Perarasi vd. 2021	IP tabanlı kontrol sistemi	Akıllı PV izleme, kirlilik tespiti anında temizlik kararı	Görüntü tabanlı kir tespitiyle otomatik silecek sistemi devreye alınmıştır.
Singh & Chandra 2023	SVM + CNN	HBBHO ile verim düşüşünü toz ile ilişkilendirmek	Tozun kısmen yoğunluğunu belirler, saha doğrulaması yok
Noorussbah vd. 2023	CNN (VGG19) – dron görüntüleri	%95 doğruluk, farklı kir tiplerini ayırt eder	Büyük veri seti ihtiyacı, enerji analizi eksik
Abukhait vd. 2024	Makine öğrenmesi (SVM)	Küçük veri setiyle çalışabilir	Karmaşık yüzeylerde düşük performans, enerji analizi yok
Onim vd. 2023	CNN tabanlı SolNet (transfer öğrenme)	ResNet50 ve AlexNet’ten daha hızlı ve doğru	Eğitim karmaşıklığı, donanım bağımlılığı

Çizelge 3.2 (Devam) Literatürdeki görüntü ile kirlenme tespit yöntemleri ile bu çalışmanın karşılaştırması.

Çalışma	Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Mahmoud vd. 2024	Elman Derin Ağları – toz yoğunluğu tahmini	Kirlenme şiddetini belirleyebilir	Yüksek hesaplama maliyeti
Shao vd. 2024	ResNet-18, VGG-16, MobileNetV2 tabanlı transfer öğrenme	Çok yüksek doğruluk	Enerji analizi eksikliği
Ahmed vd. 2025	Dron + DL (HALCON CNN)	Dış ortamda yüksek doğruluk	Enerji analizi eksikliği
Bu Çalışma	Hafif Görüntü İşleme + DBSCAN + Yusufçuk Optimizasyon Algoritması	Hücre düzeyinde kısmi kirlenmeyi yüksek uzaysal doğrulukla tespit eder, koordinat ve alan bilgisi çıkarır, RTVA algoritmasına doğrudan girdi sağlar	Çok büyük ölçekli panellerde ilk adımda ek optimizasyona ihtiyaç

Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi yapılan çalışmalarda aşağıdaki boşluklar bulunmaktadır.

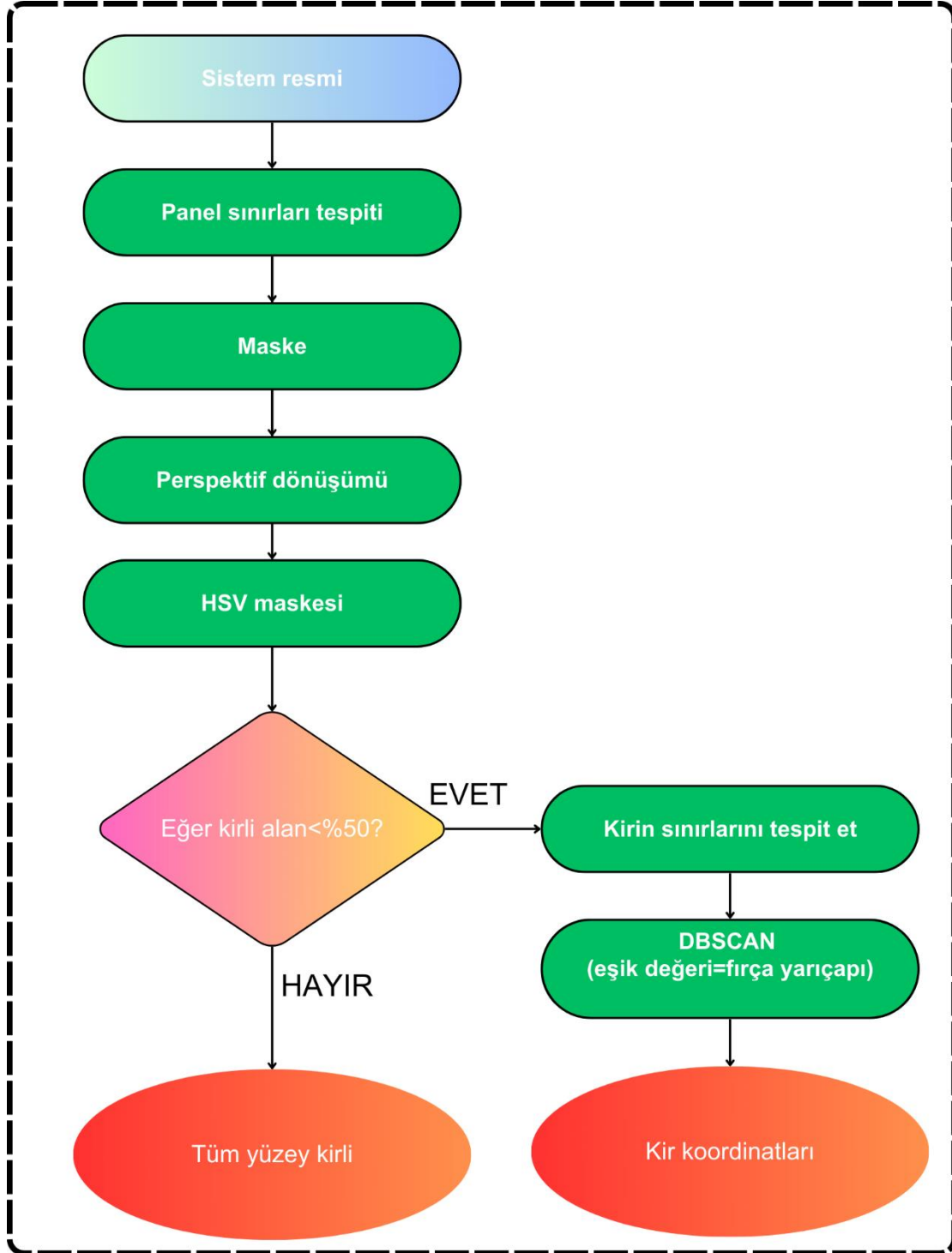
- IP tabanlı ikili sınıflandırmalar genellikle yüksek doğrulukla çalışmakta, ancak enerji kaybı analizini içermemektedir.
- Toz miktarı, yoğunluk tespiti için uygulanan IP yöntemleri doğrudan fiziksel kir yoğunluğu tahmini sağlar, ancak aydınlatma koşullarına duyarlıdır. Aynı zamanda enerji kaybı analizi yapmazlar.
- DL tabanlı sınıflandırmalar yüksek doğruluk sunmakta, fakat panel çıkış gücü veya enerji farkını öngöremezler. Gömülü sistemlerde ekstra maliyetlere neden olurlar.

Bu çalışmada ise literatürdeki ağır DL modellerinin aksine, hafif bir IP yaklaşımı benimsenmiştir. Önerilen yöntem şu özelliklere sahiptir:

- Panel sınırlarını değişen aydınlatma koşullarında tespit eder ve konumsal özelliklerin tanınmasına imkan sağlar,
- Kısmi kirlenmeleri tespit eder,
- Kirli bölgelerin konumlarını (ağırlık merkezi koordinatları) ve alan büyüklüklerini çıkarır,
- Bu bilgiler ile hem enerji-farkındalıklı güzergâh planlama algoritmasına

doğrudan girdi olarak sağlarken, aynı zamanda TD modeline fayda sağlar.

Bu çalışmada uygulanan görüntü işleme ile kir tespiti süreci Şekil 3.10'da verilmiştir.

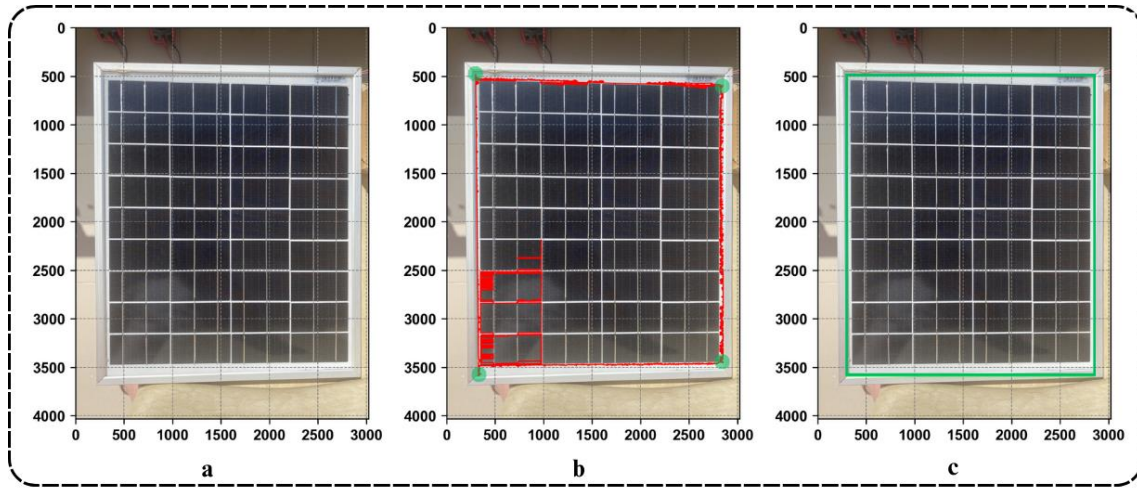


Şekil 3.10 Önerilen temizleme sisteminde kir tespiti ve koordinat çıkarımı için kullanılan IP süreci.

IP iş akışı şu şekildedir.

Panel Sınırlarının Belirlenmesi:

İlk adımda, panelin sınırları belirlenir. RGB kamera görüntüsü gri tonlamaya dönüştürülür ve adaptif eşikleme (adaptive thresholding) uygulanarak farklı ışık koşullarında kenarlar belirginleştirilir. Ardından, panel konturlarını çıkaran algoritma uygulanır. Ancak bazı konturlar panel kenarlarını tam karşılamayabilir. Bu nedenle sonuçların iyileştirilmesi için Douglas–Peucker (DP) algoritması (Prasad vd. 2012) kullanılarak kontur geometrisi sadeleştirilir ve dört baskın köşe belirlenir.



Şekil 3.11 Panel sınırlarının tespiti süreci: (a) orijinal görüntü, (b) dört baskın köşenin (yeşil daireler) bulunduğu en büyük kontur, (c) köşe noktalarından elde edilen yeşil dikkörtgen panel tespiti.

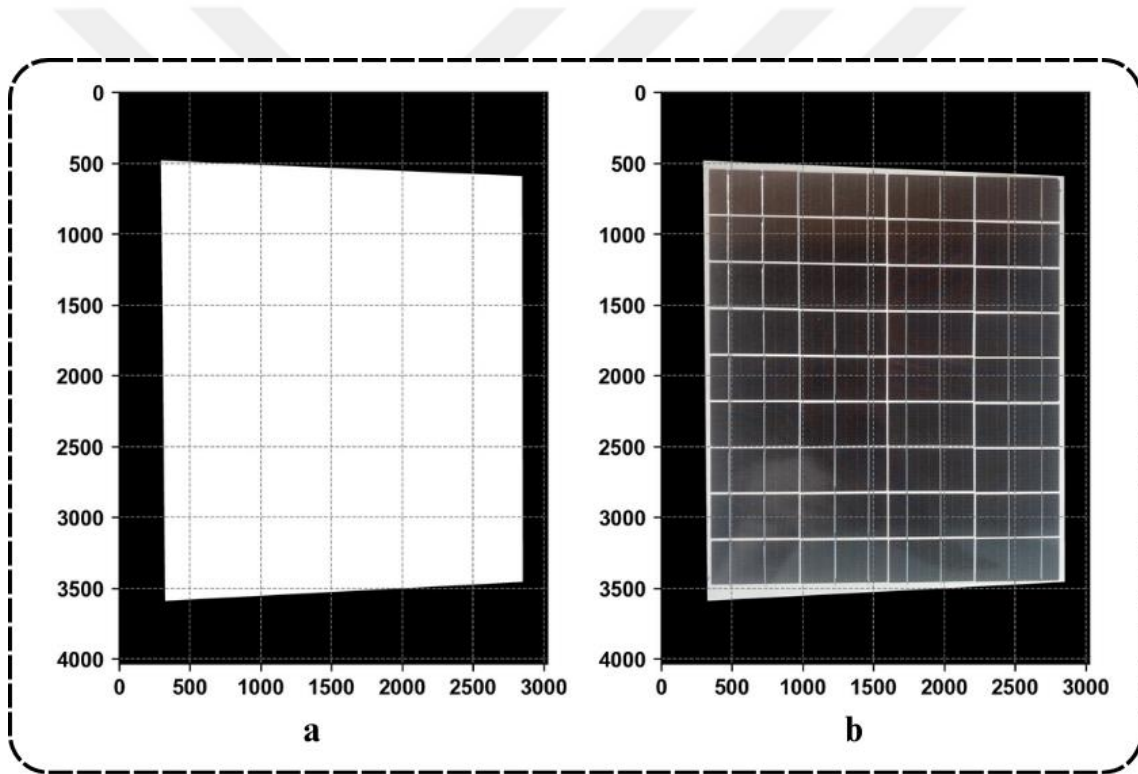
Bu aşamada, panel çerçevesi üzerindeki parlak yansımalar (örneğin güneş ışığı kaynaklı) bazen kontura dâhil olsa da, DP algoritmasının adaptif tolerans yapısı bu sapmaları bastırarak doğru köşe noktalarının belirlenmesini sağlar.

Ancak yine de güneş ışığının panel üzerinde oluşturduğu parlama, gölge ve yansıma farklılıkları sabit eşikleme tekniklerine alternatif olarak K-ortalamları (K-means) yöntemi ile görüntüyü renk benzerliğine göre K adet kümeye ayırarak, panel yüzeyinin istatistiksel olarak ayrışması sağlanmıştır. Özellikle panel yüzeyi, hem RGB renk uzayında hem de HSV parlaklık düzeyinde çevreye göre daha koyu bir dağılım gösterdiğinden, K-ortalamları ile elde edilen kümeler içerisinde en düşük parlaklık

ortalamasına ve yeterli piksel oranına sahip küme otomatik olarak panel bölgesi olarak seçilmiştir. Böylece, sabit eşikleme yöntemlerinin başarısız olabildiği değişken ışık koşullarında bile, panel yüzeyi morfolojik işlemlerle birlikte yüksek güvenilirlikle ayrıştırılmıştır. Ancak K-ortalamları yöntemi adaptif eşikleme yöntemine oranla, daha uzun çalışma süresi ve gömülü sistemlere uygulama sınırlılıklarına sahiptir.

Arka Plan Maskeleme:

Panel sınırları belirlendikten sonra, dört köşe koordinatı kullanılarak ikili maske (binary mask) oluşturulur. Bu maske, gökyüzü, çerçeve veya zemin gibi panel dışı alanları hariç tutar.



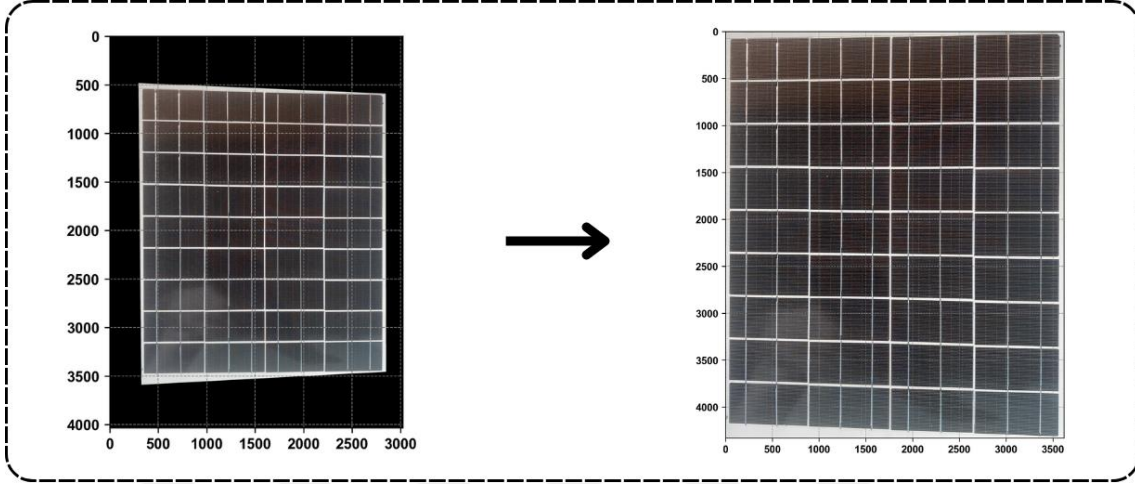
Şekil 3.12 Arka plan maskeleme işlemi: (a) panel köşelerinden üretilen ikili maske, (b) sadece panel yüzeyini gösteren sonuç görüntü.

Bu aşama sayesinde sonraki işlemler yalnızca aktif panel yüzeyi üzerinde gerçekleştirilir.

Perspektif Düzeltme:

Panelin eğik yüzeyi, homografi dönüşümü ile dikey üstten görünümüne çevrilir. Bu sayede

görüntü 3620×4330 piksel boyutuna dönüştürülerek gerçek panel boyutlarıyla orantılı hale gelir.



Şekil 3.13 Perspektif dönüşümü sonucu elde edilen üstten görünüm (3620×4330 piksel).

Bu işlem, hücre boyutları arasındaki orantıyı koruyarak bölgesel kirlenmenin alan bazında hesaplanmasına olanak sağlar.

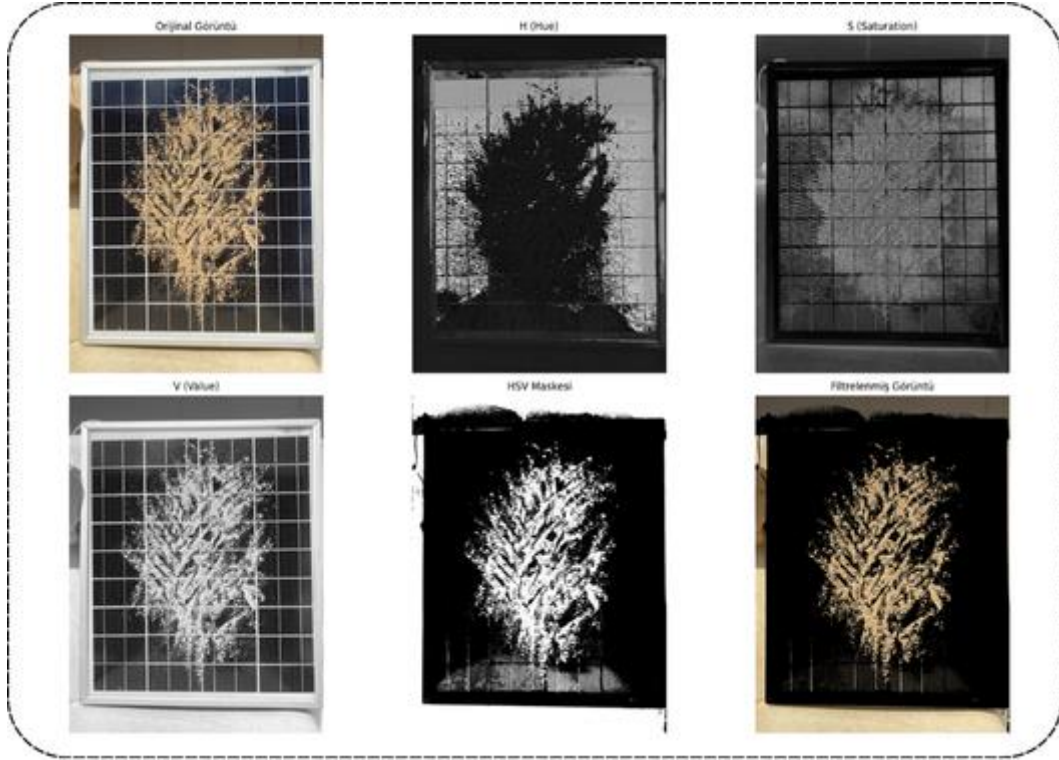
HSV Tabanlı Kir Tespiti:

Dönüştürülmüş görüntü, HSV renk uzayına aktarılır. Toz ve leke renklerini temsil eden ön tanımlı Hue aralığı (Şekil 3.14) uygulanarak kirli bölgeler izole edilir. Hue, Saturation ve Value bileşenleri arasındaki lokal düzensizlikler, global ortalama ile karşılaştırılarak anomali tespiti yapılır.



Şekil 3.14 Toz renk değerlerine karşılık gelen tipik Hue aralığı.

HSV temsili, RGB'ye göre aydınlatma değişimlerine daha dayanıklıdır. Bu çalışmada eşik değerleri, ortalama $\pm 0.8 \times$ standart sapma yöntemiyle adaptif olarak belirlenmiştir. Böylece farklı aydınlatma koşullarında (sabah, öğle, akşam) dahi tespit performansı %95'in üzerinde tutarlı sonuç vermiştir.



şekil 3.15 Toz birikimli bir PV panel için HSV ayırıştırma ve filtreleme sonuçları.

Özellik ıkarımı, Kümeleme ve Güzergâh retimi:

Tespit edilen bölgelerin merkez koordinatları ve alan büyüklükleri hesaplanır. Gürültüyü ayıklayan yoğunluk tabanlı kümeleme (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise – DBSCAN) algoritması ile, fırça yarıçapı içinde kalan noktalar tek grup altında birleştirilir (Ester vd. 1996). Bu sayede, temizleme mekanizması aynı bölgeyi tekrar tekrar ziyaret etmekten kaçınır.

3.2.2 Geçirgenlik Dağılımı Kavramı

Kirlenme panel yüzeyine homojen olarak yayılrsa dahi, tozun ağırlığı, rengi ve yoğunluğu farklı olduğunda, ışığın geçirgenliği ve PV modülün MPP üzerinde değişken

etkiler yaratabilmektedir. STC ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, $AM=1.5$) bu farklılıkları yansıtmakta yetersiz kalmakta; gerçek ortam koşullarında ışınlm ve sıcaklık ile birlikte kirlenmenin birleşik etkilerini hesaba katacak daha kapsamlı modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Çeşitli çalışmalar, farklı kirlenici etkenlerin (kül, kuş pisliği, kum, tuz vb.) geçirgenlik kayıplarını partikül türü, kalınlığı ve nem içeriğine bağılı olarak farklılaştırdığını göstermiştir (Chanchangi vd. 2020). Toz morfolojisinin ve optik özelliklerinin anlaşılması için mikroskopik analizler kullanılmış (Bomber vd. 2024), farklı toz tipleri ile ışınlm arasındaki ilişkinin orantılı fakat doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğu ortaya konulmuştur (Fan vd. 2021). Spektral ışınlm karakteristiklerini inceleyen çalışmalar, birim yüzey alanına düşen toz kütlesi arttıkça ileriye hemisferik transmisyonun doğrusal şekilde azaldığını rapor etmiştir (Piedra vd. 2018). Nijerya’da yapılan saha çalışmalarında ise yatay yüzeylerde toz birikiminin yıllık %59’a varan geçirgenlik kaybına yol açtığı, eğim açısının doğal temizlenme süreçlerini (ör. yağış) belirgin şekilde etkilediği tespit edilmiştir (Chanchangi vd. 2021).

Dolayısıyla PV performansının modellenmesinde yalnızca toplam toz miktarı değil, aynı zamanda belirli bir birikim yoğunluğunda ışınlmın geçiş oranı ve daha önemlisi, yüzey üzerindeki uzaysal dağılım kritik hale gelmektedir. Örneğin, yağış sonrası panel eğim açısına bağılı olarak tozun aşağı hücrelerde birikmesi, aynı miktar ve tipte toz varlığında dahi farklı MPP kaymalarına sebep olabilmektedir.

Bu etkiyi modellemek için öncelikle panel yüzeyine ulaşan ışınlmın, ortamda ölçülen doğrudan ışınlm değerine göre tanımlanması gerekir:

$$\tau = \frac{G_{in}}{G_a} \quad (10)$$

Burada G_{in} , yarıiletken yüzeye ulaşan ışınlmı, G_a ise çevrede ölçülen doğrudan ışınlmı ifade etmektedir. Önceki çalışmalarda, ışınlm azalması genellikle kirlenme katsayısı ($\beta_{soiling}$) üzerinden tanımlanmıştır (Elminir vd. 2006, Laarabi vd. 2022, Fan vd. 2021):

$$G_{in} = (1 - m \cdot \beta_{soiling}) \cdot G_a \quad (11)$$

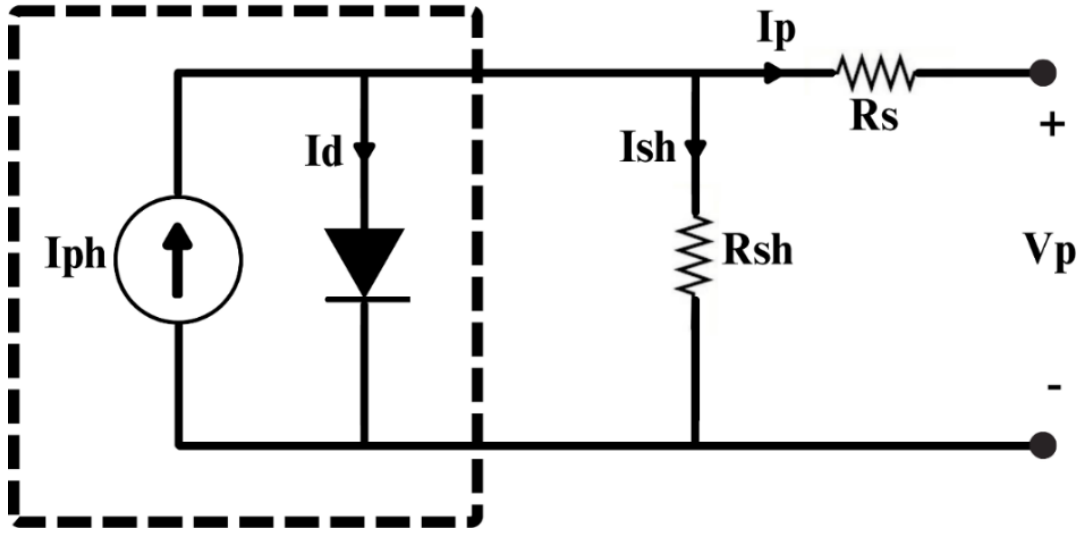
Burada m , yüzeydeki kirlenici parçacıkların miktarını ifade etmektedir.

Önceki modeller çoğunlukla toz kütlesi veya yüzey kaplama oranı üzerinden kayıpları değerlendirmiştir. Bu çalışmada ise farklı kirlenmelerin panel çıkışına etkisini incelemek için Geçirgenlik Dağılımı (TD) yaklaşımı önerilmektedir. TD, kirli modüllerin ölçülen I–V karakteristiklerinin temiz modüllerin eşdeğer devre tahminleri ile karşılaştırılması yoluyla elde edilmektedir. Böylece:

- Kirlenmenin uzaysal dağılımı çıkarılabilmekte,
- Yerel geçirgenlik farklılıkları ile PV performansı ilişkilendirilebilmekte,
- Değişen çalışma koşulları (ışınım, sıcaklık) altında MPP kaymaları hesaplanabilmektedir.

3.2.2.1 PV Hücresi Eşdeğer Devre Modeli

Güneş hücresinin doğrusal olmayan karakteristiği nedeniyle çıkış gücünün hesaplanması önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, tek diyotlu eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit Model – ECM) kullanılmıştır (Şekil 3.16). ECM, yalnızca performans tahminlerinde değil, aynı zamanda arıza tespitinde de sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, Chi vd. (2020) çalışmalarında I–V eğrisinden elde edilen parametrelerin gizli çatlakların, sıcak noktaların ve yaşlanma kaynaklı arızaların tespitinde etkin şekilde kullanılabildiğini ve eşdeğer devre parametreleştirmenin klasik performans modellemesinin ötesinde daha geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra literatürde panel çıkışını modellemek için kullanılan eşdeğer devreler iki diyotlu (Tifidat vd. 2023), üç diyotlu (Singla vd. 2022) gibi varyasyonlar da önerilmektedir. Garcia-Marrero vd. (2025) çift tek diyotlu eşdeğer devre ile parçalı gölgelenme durumlarının modellenilebildiğini göstermiştir.



Şekil 3.16 Güneş hücresinin tek diyotlu eşdeğer devre modeli.

Panel yüzeyine gelen ışınım sonucu oluşan foton akımından (I_{ph}) dolayı fotoelektronların hareketi gerçekleşir. Bu akım diyot, paralel direnç (R_{sh}), seri direnç (R_s) ve yüke dağılır. Hücre çıkışında ise panel gerilimi (V_p) ve panel akımı (I_p) elde edilir. R_{sh} direnci R_s 'den çok daha büyük olduğundan, hassasiyetin kritik olmadığı hesaplamalarda I_{sh} akımı ihmal edilebilmektedir. Kirchhoff'un akım yasasına göre tek diyotlu ECM'de foton akımı şu şekilde ifade edilir:

$$I_{ph} = I_d + \frac{V_p + I_p \cdot R_s}{R_{sh}} + I_p \quad (12)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V_p + I_p \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (13)$$

Burada I_0 diyot doyma akımıdır ve Shockley (1949) eşdeğer devresine göre aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$I_0 = \frac{I_{ph} - V_{oc}/R_{sh}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (14)$$

Çizelge 3.3 Diyot Parametreleri.

Parametre	Değeri	Açıklama
n	?	Diyot ideallik faktörü
k	1.38×10^{-23}	Boltzman sabiti J/K
q	1.6×10^{-19}	Elektron yükü [C]

Bu çalışmada modellenen 25 W gücünde monokristal panelin katalog değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Farklı yük koşulları altında I-V karakteristiklerinin çıkarılabilmesi için eşdeğer devre parametrelerinin katalog verilerinden optimize edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Parametre Optimizasyonu (PO) yapılmış ve bilinmeyen n , I_{ph} , R_s , R_{sh} değerleri belirlenmiştir. Literatürde bazı çalışmalarda I_0 da optimizasyon parametresi olarak kullanılmıştır (Chermite vd. 2025); ancak tek diyot modelinde, katalog verilerinde verilen açık devre gerilimi (V_{oc}) kullanılarak eşitlik 14 ile hesaplanabilir. Böylece optimizasyon algoritmalarında gereksiz hesap yükü ortadan kaldırılmış olur.

Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan 25 W. monokristal güneş paneli katalog değerleri.

Parametre	Açıklama	Değeri
P_{stc}	Nominal güç	25 Wp
V_{oc}	Açık devre gerilimi	24.84 V.
I_{sc}	Kısa devre akımı	1.27 A.
V_{mp}	MPP'deki gerilim	20.70 V.
I_{mp}	MPP'deki akım	1.21 A.
l_x	X eksen uzunluğu	362 mm.
l_y	Y eksen uzunluğu	433 mm.
μ_i	Sıcaklık akım katsayısı	$0.043 \frac{\%}{^{\circ}C}$
μ_v	Sıcaklık gerilim katsayısı	$0.35 \frac{\%}{^{\circ}C}$
μ_p	Sıcaklık güç katsayısı	$0.28 \frac{\%}{^{\circ}C}$
T_{NOM}	Nominal sıcaklık	$45 \pm 2 \text{ } ^{\circ}C$

Foton akımı, PO ile optimize edildikten sonra sıcaklık değişimleri için şu şekilde düzeltilir:

$$I_{ph_{Ta}} = I_{ph_{Tm}} \cdot (1 + \mu_I \cdot \Delta T) \quad (15)$$

$$\Delta T = T_a - T_m \quad (16)$$

Diyot doyma akımı ise sıcaklık için aşağıdaki gibi güncellenir:

$$I_0' = I_0 \cdot \left[\frac{T_a}{T_m} \right]^3 \cdot e^{\frac{q \cdot \varepsilon}{n \cdot k} \left[\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_a} \right]} \quad (17)$$

Burada T_a gerçek panel sıcaklığını, T_m ölçüm sıcaklığını, ε ise yarıiletken bant aralığını ifade etmektedir.

Bu çalışmada, hesap yükünü düşük tutmak ve optimizasyonu sadeleştirmek amacıyla, tek diyotlu ECM tercih edilmiş, çift/üç diyotlu modellerin ayrıntılı analizi kapsam dışında bırakılmıştır. Ayrıca elde edilen I_{ph} , R_s , R_{sh} ve n değerleri, belirli referans koşullar için optimize edilmiştir. Bu parametrelerin doğası itibarıyla:

- I_{ph} (foton akımı): Işınım (G) ve sıcaklığa (T) doğrudan bağlıdır. Işınım arttıkça I_{ph} yaklaşık doğrusal olarak artar.
- R_s ve R_{sh} : Malzeme ve bağlantı direnciyle ilişkilidir; sıcaklık arttıkça R_s hafifçe artabilir, R_{sh} ise azalabilir.
- n (diyot ideallik faktörü): Malzemenin içsel özelliklerine bağlıdır ve sıcaklığa karşı hafif değişim gösterebilir.

Ancak bu değişimler çoğunlukla ikinci dereceden etkiler olduğundan, PO sonucu elde edilen parametreler, normal çalışma aralığında sabit kabul edilmiştir. Ayrıca modelde sıcaklık ve ışınımın doğrudan etkilediği bileşenler (örneğin $I_{ph}(T)$, $I_0(T)$, $V_{oc}(T)$) eşitlik 15–17 ile ayrı olarak güncellenmektedir. Dolayısıyla PO ile bulunan bu parametreler sistemin temel fiziksel karakteristiğini temsil etmekte, çalışma koşullarına göre yalnızca türevsel düzeltmeler uygulanmaktadır.

3.2.2.2 Geçirgenlik Kavramının Eşdeğer Devrede Temsili

Fotovoltaik modüllerde kirlenme, panel yüzeyinde ek bir zayıflatıcı tabaka oluşturarak

yarıiletken yüzeye ulaşan ışınım miktarını azaltır. Bu etkiyi nicelendirmek amacıyla bir kirlenme faktörü (df) tanımlanabilir. Bu faktör, toz birikimi ve yüzey kirlenmesinden kaynaklanan ışınım kaybını ifade etmekte olup literatürde kirlenme indeksi (temizlik indeksi tersi) gibi adlandırılarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$df = m.\beta_{soiling} \quad (18)$$

Buna karşılık, yarıiletken tabakaya etkin biçimde iletilen ışınımın oranı, yani geçirgenlik (τ), şu şekilde ifade edilir:

$$\tau = 1 - df \quad (19)$$

Literatürde benzer kavramlar temizlik indeksi (Cleanless Index – CI) adı altında sunulmuştur (Costa Silva vd. 2023, Javed vd. 2017, Hossain vd. 2025). Ancak bu çalışmalarda geçirgenlik, tüm PV yüzeyi için homojen kabul edilmiş, non-uniform kirlenmenin modül üzerindeki etkilerini ihmal edilmektedir. Bu çalışmada ise, geçirgenlik dağılımı yaklaşımı benimsenerek hücreler arası toz birikiminin uzaysal değişkenliği dikkate alınmıştır. ECM’de yer alan foton akımı I_{ph} , lokal veya ortalama geçirgenlik katsayısı τ ile ilişkilendirilerek, kirlenmenin elektriksel model üzerindeki etkisi parametrik hâle getirilmiştir.

Yarıiletken tabakada ışık absorpsiyonuna bağlı olarak foton yoğunluğu uzaysal olarak homojen değildir; cihaz içinde konuma göre farklılık gösterir (Hajjiah 2025). P–N eklem düzeyinde toplam foton akımı, yüzey boyunca bu yoğunluğun entegrasyonu ile belirlenir. Bu nedenle, ortalama geçirgenliğin tanımlanması, hesaplamalarda pratik bir sadeleştirme sağlar. Bu yaklaşım şu varsayımlara dayanmaktadır:

Doğrusal fotoelektrik üretim varsayımı: Foton akımının, yüzeye gelen foton akısı ile doğrusal orantılı olduğu kabul edilir.

Optik–geometrik sadeleştirmeler: Kirlenme yalnızca lokal geçirgenlik fonksiyonu $\tau(x,y)$ ile modellenmiştir. Saçılma, spektral varyasyonlar ve açısal etkiler ikinci dereceden kabul edilerek ihmal edilmiştir.

Isıl ve elektriksel homojenlik varsayımı: Ortalama geçirgenlik tüm yüzeye eşit dağıtıldığında toplam foton akımının değişmediği kabul edilmiştir. Lokal yeniden birleşmeler, sıcaklık gradyanları veya R_s – R_{sh} varyasyonları dikkate alınmamıştır.

Bu varsayımlar altında ortalama geçirgenlik şu şekilde tanımlanır:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{A} \cdot \iint_A \tau(x, y) \cdot dA \quad (20)$$

Burada A , P–N birleşimin yüzey alanını, $\tau(x, y)$ lokal geçirgenliği göstermektedir.

Eğer ortamda doğrudan ışınım G_a ölçülmüşse, yarıiletken yüzeye ulaşan etkin ışınım:

$$G_{in}(x, y) = \tau(x, y) \cdot G_a \quad (21)$$

olarak yazılır. Sabit kuantum verimi η_q , bir fotonun enerjisi $h \cdot \nu$ olarak kabul edildiğinde lokal foto akım yoğunluğu:

$$j_{ph}(x, y) = \eta_q \cdot \frac{q}{h \cdot \nu} \cdot G_{in}(x, y) \quad (22)$$

şeklindedir. Buradan toplam foto akım:

$$I_{ph}^{total} = \iint_A j_{ph}(x, y) \cdot dA = \eta_q \cdot \frac{q}{h \cdot \nu} \cdot G_a \iint_A \tau(x, y) \cdot dA \quad (23)$$

olarak elde edilir. Ortalama geçirgenlik ile yeniden yazıldığında:

$$I_{ph}^{total} = \eta_q \cdot \frac{q}{h \cdot \nu} \cdot G_a \cdot A \cdot \bar{\tau} \quad (24)$$

Dolayısıyla, herhangi bir $\eta(x,y)$ dağılımı için toplam foto akım yalnızca yüzey alanı A , ortam ışınımı G_a ve ortalama geçirgenlik $\bar{\tau}$ ile belirlenmektedir. Eğer $\bar{\tau}$ sabit kalırsa, bu değerin yüzey boyunca homojen veya heterojen dağıtılması toplam foto akımı değiştirmemektedir.

STC foton akımı:

$$I_{phSTC}^{total} = \eta_q \cdot \frac{q}{h\nu} \cdot G_{STC} \cdot A \cdot \bar{\tau} \quad (25)$$

G_a ortamında ise:

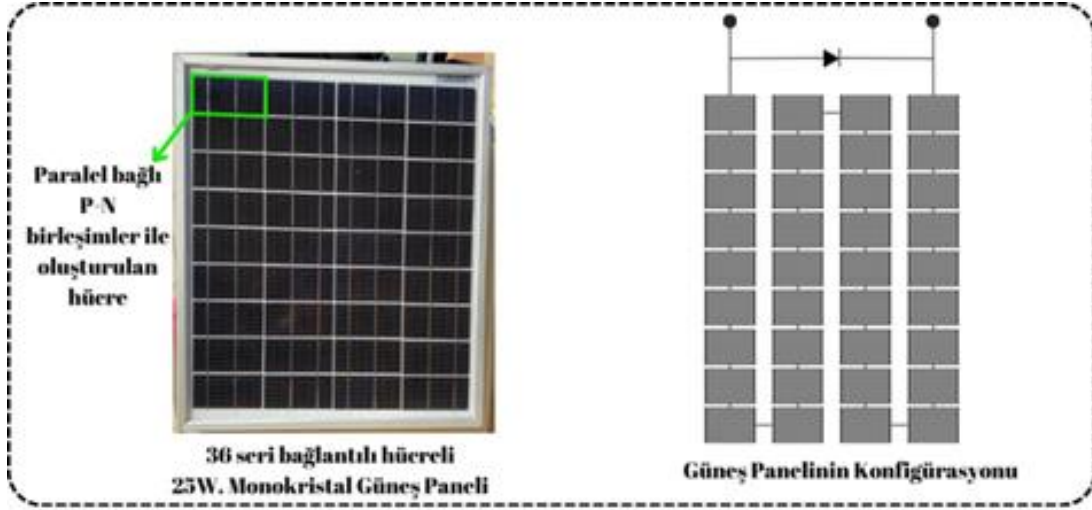
$$I_{ph}^{total} = I_{phSTC}^{total} \cdot \frac{\bar{\tau} \cdot G_a}{G_{STC}} \quad (26)$$

olarak yazılır.

Bir hücre içindeki P–N eklemleri paralel bağlanarak hücre çıkışında istenen akım elde edilir. Panel düzeyinde ise hücreler seri bağlanarak gerilim arttırılır. Tipik bir P–N eklem MPP’de yaklaşık 0.6 V gerilim sağlar. Paralel bağlantı nedeniyle eklem gerilimleri hücre gerilimine eşit olmaktadır.

3.2.2.3 Panel Yüzeyi Boyunca Geçirgenlik Dağılımı

Fotovoltaik paneller seri bağlı hücrelerden oluşur. Bu çalışmada kullanılan 25 W’lık monokristal panel Şekil 3.17’te verilmiştir. Panel, 36 seri bağlı güneş hücresinden oluşmakta ve tek bir baypas diyotu ile korunmaktadır.



Şekil 3.17 Çalışmada kullanılan 25 W monokristal panel.

Buraya kadar geçirgenlik kavramı, PV yüzeyindeki lokal alanlardan P–N birleşim düzeyine kadar genişletilmiştir. Ancak PV gibi seri bağı konfigürasyonlarda durum farklıdır. Seri bağlantıda tüm hücrelerden aynı akım geçmek zorunda olduğundan, lokal geçirgenlik farklılıkları hücreler üzerinde farklı gerilim üretimlerine yol açar. Kirlenmenin düzensiz olduğu koşullarda geçirgenliği düşük hücreler akımı sınırlayan darboğazlar gibi davranır, hatta ters polarmaya girerek baypas diyotunun iletme geçmesine neden olabilir. Bu durumda hücre, diyotun eşik gerilimine karşılık gelen ek bir gerilim kaybına sebep olur ve ek güç kayıpları ortaya çıkar. Sonuç olarak, seri bağı dizinin çıkış gerilimi kirlenmeden doğrusal olmayan şekilde etkilenir.

Panel yüzeyi, modüldeki hücrelerin geçirgenlik katsayılarını içeren bir vektör olarak tanımlanırsa:

$$\mathbf{v} = \{\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \dots, \bar{\tau}_{N_s}\} \quad (27)$$

Non-uniform kirlenmenin etkisini daha iyi karakterize edebilmek için, modül seviyesinde TD, yalnızca ortalama değeri (μ_v) ile değil, aynı zamanda standart sapması (σ_v) ile de ifade edilirse:

$$\mu_v = \frac{1}{N_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_s} \bar{\tau}_j \quad (28)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} (\bar{\tau}_j - \mu_v)^2} \quad (29)$$

Burada N_s modüldeki seri bağlı hücre sayısı olarak çalışmada kullan panel için 36'dır.

Uniform kirlenme senaryosu ($\sigma_v = 0$): Ortalama geçirgenliği aynı olan paneller maksimum çıkış gücüne ulaşabilmektedir.

Non-uniform kirlenme ($\sigma_v > 0$): Yerel kirlilikler (ör. kuş pisliği, opak cisimler) modül çıkış gücünü azaltır. Bu azalma, PV hücresinin I-V karakteristiğinin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle doğrusal olmayan bir eğilim izler.

Dolayısıyla, paralel bağlı PV konfigürasyonlarında yalnızca ortalama geçirgenlik μ_v performans tahmini için yeterliyken, seri bağlı modüllerde hem μ_v hem de σ_v kritik öneme sahiptir. Bu tezde önerilen TD yaklaşımı, özellikle seri bağlı modüller için bu iki parametreyi birlikte ele almayı mümkün kılmaktadır.

3.2.2.4 Yusufçuk (Dragonfly) Algoritması ile Yüzeydeki Geçirgenlik Dağılımının Çıkarılması

Son yıllarda yapay zekâ tabanlı meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, PV sistemlerin parametre tahmini ve performans iyileştirme çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, geçirgenlik dağılımı ve eşdeğer devre parametrelerinin deneysel I-V ölçümleri ile uyumlu hâle getirilmesi için Yusufçuk Optimizasyon Algoritması (Dragonfly Optimization Algorithm – DOA) tercih edilmiştir.

DOA, Mirjalili (2016) tarafından önerilen, yusufçuk sürülerinin göç ve avlanma davranışlarını taklit eden bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir. Algoritma, sürüdeki bireylerin birbirleriyle olan etkileşimlerini beş temel kural üzerinden tanımlar:

- Ayrılma (Separation): Bireylerin çarpışmayı önlemek üzere birbirlerinden

uzaklaşması,

- Hizalanma (Alignment): Komşu bireylerin yönelimlerini takip ederek ortak hareket oluşturmaları,
- Uyum (Cohesion): Komşuların konumlarına yaklaşarak sürü bütünlüğünü koruması,
- Yemeğe çekim (Attraction to food): En iyi çözümün bulunduğu yöne yönelme davranışı,
- Düşmandan kaçış (Distraction from enemy): En kötü çözümden uzaklaşma davranışı.

Bu davranışlar belirli ağırlık katsayılarıyla birleştirilerek her bireyin hız ve konum güncellemesi hesaplanır. Böylece algoritma, arama uzayında hem keşif (exploration) hem de iyileştirme (exploitation) süreçlerini dengeleyerek küresel optimuma yakın çözümler elde eder.

Elde edilen ECM, panelin genel elektriksel karakteristiğini doğru biçimde temsil etmektedir. Ancak kirlenme, panel yüzeyinde lokal geçirgenlik ($\tau(x,y)$) farklılıkları oluşturarak, modülün MPP'sini değiştirir. Bu nedenle, her bir hücre veya hücre grubuna ait geçirgenlik katsayılarının deneysel I-V verileriyle tutarlı biçimde optimize edilmesi gerekir.

Optimizasyon işlemindeki kümeler:

- $i = \{1, 2, \dots, N_s\}$
- $k = \{1, 2, \dots, N\}$

şeklinde ile tanımlanmıştır. Burada i i. hücre, N_s seri bağlı hücre sayısı, k ise bir I-V çevrimindeki ölçüm noktalarıdır.

Bu çalışmada, PO yöntemiyle belirlenen sabit ECM parametreleri (I_{ph} , R_s , R_{sh} ve n) korunmuş; yalnızca geçirgenlik dağılımı, DOA kullanılarak ayarlanmıştır. Böylece sistemin fiziksel parametreleri sabit tutulurken, yüzeydeki kirlilik dağılımının etkisi en

iyi biçimde temsil edilmiştir. Diğer sabit parametreler ise:

- G_k : k noktasındaki ölçülen ısıtım (W/m^2),
- T_k : k noktasındaki ölçülen panel sıcaklığı ($^{\circ}C$),
- $I_k^{ölçüm}$: k noktasındaki ölçülen akım (A),
- $V_k^{ölçüm}$: k noktasındaki ölçülen gerilim (V),
- V_k^{model} : k noktasındaki $I_k^{ölçüm}$, TD ve ECM'ye göre modellenen gerilim (V),
- τ_{min} : geçirgenliğin minimum değeri=0
- τ_{maks} : geçirgenliğin maksimum değeri=1

şeklinde özetlenmiştir. Karar değişkenleri ise eşitlik 28 ve 29'da verilen panel yüzeyinin dağılımın ortalaması (μ_v) ve standart sapması (σ_v) istatistikleridir.

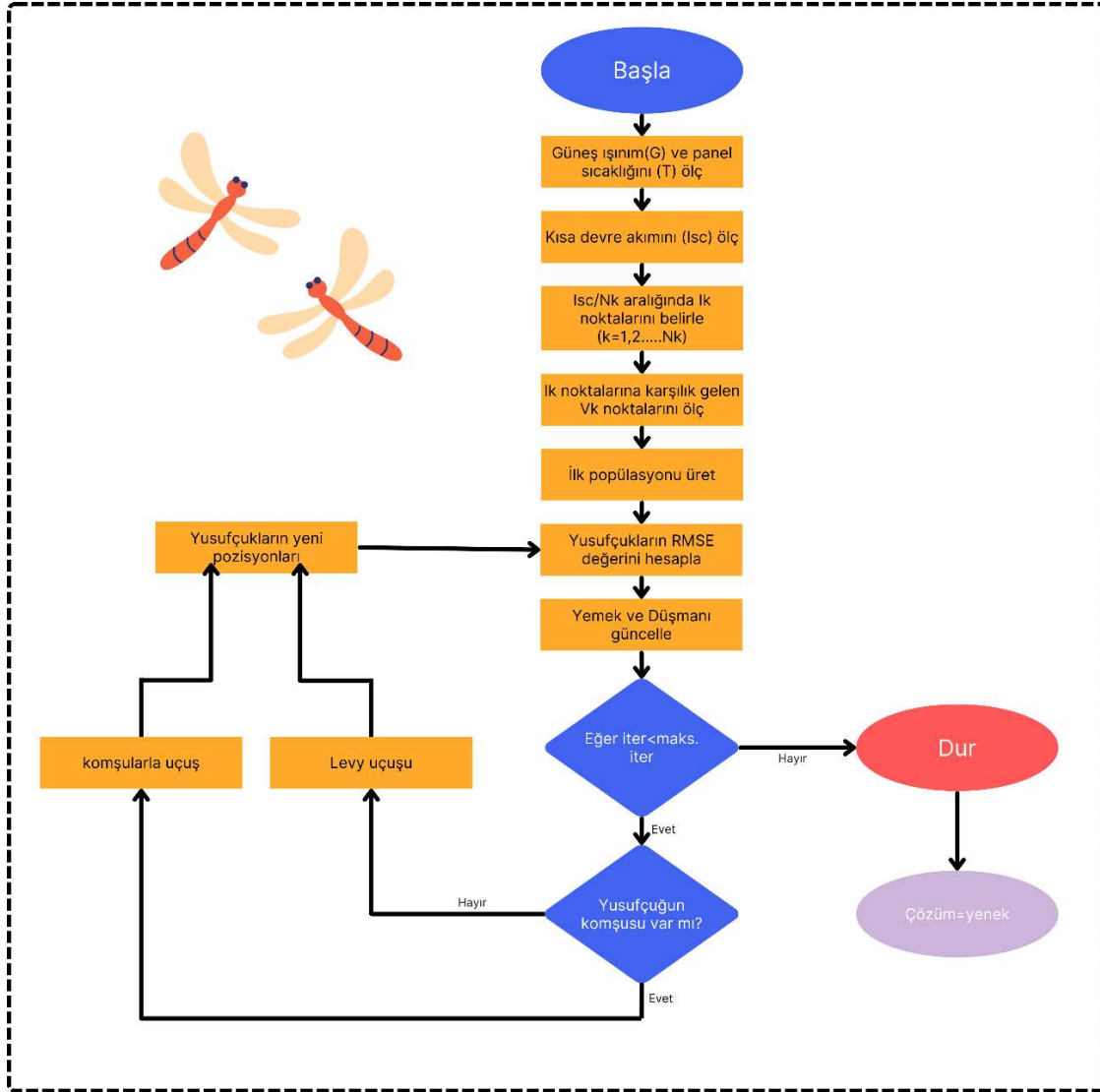
DOA, bu dağılım parametrelerini değiştirerek modelden elde edilen I–V eğrisinin ölçülen eğriye en iyi uyması için çalışır. Bu amaçla, amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$RMSE = \sum_k [V_k^{ölçüm} - V_k^{model}]^2 \quad (30)$$

Amaç fonksiyonunun minimize edilmesiyle, hem ölçülen I–V eğrisiyle yüksek uyum sağlanır hem de non-uniform kirlenme altında her hücreye karşılık gelen geçirgenlik haritası elde edilir.

Optimizasyon çalışmasında, her iterasyonda hücre geçirgenlik vektörü dinamik olarak güncellenmektedir. DOA'nın her iterasyonunda aday çözümler için elde edilen geçici geçirgenlik değerleri kullanılarak vektör ayarlama normalizasyonu, her hücreye ait geçirgenlik katsayılarını yeniden ölçekler. Normalizasyon z-skoru prensibine dayalıdır ve şu şekilde uygulanır:

$$\bar{\tau}_j' = \frac{\bar{\tau}_j - \mu_v}{\sigma_v} \quad (31)$$



Şekil 3.18 DOA ile z-skoru normalizasyonuna dayalı TD optimizasyon sürecinin genel akış diyagramı.

Daha sonra bu normalize edilmiş değerler 0–1 aralığına yeniden ölçeklenir. Bu yöntem sayesinde, tüm panel yüzeyindeki lokal geçirgenlik farkları istatistiksel olarak dengelenmiş olur ve optimizasyon süreci aşırı uç değerlerin (ör. lokal opak lekeler) global sonucu bozmasının önüne geçer. Ayrıca bu yapı, hücreler arası bağımlılığı zayıflatarak algoritmanın yakınsama kararlılığını artırır.

3.3 Sistemin Enerji Sarfiyat Optimizasyonu

Fotovoltaik temizleme robotunun enerji tüketiminin optimize edilmesi için yalnızca temizlik mekanizmasının verimliliği değil, aynı zamanda güzergâh planlaması da kritik

bir faktördür. Panel yüzeyinde kirlenmiş bölgeler tespit edildikten sonra, temizlik fırçasının bu noktaları en kısa mesafe ve minimum enerji harcayarak ziyaret etmesi gerekmektedir. Bu problem, literatürde Gezgin Satıcı Problemi (Traveling Salesman Problem – TSP) olarak bilinen klasik bir NP-zor (NP-hard) problemine indirgenebilmektedir (M'Hallah ve Nejma 2021).

TSP ve türevleri lojistik, araç rotalama, üretim planlama, bakım çizelgeleme ve afet yönetimi gibi çok çeşitli alanlarda uygulanmış (Pop vd. 2024, Wang vd. 2023) çözüm için Genetik Algoritma (Genetic Algorithm – GA) (Toaza ve Kiss 2023), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization – PSO) (Zhong vd. 2018), Yusufçuk Optimizasyon Algoritması (DOA) (Mansour Bahar vd. 2024), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization – ACO) (Delévacq vd. 2013), Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing – SA) (Wang vd. 2009), Tabu Arama (Knox 1994) ve Arı Kolonisi Optimizasyonu (Bee Colony Optimization – BCO) (Marinakis vd. 2011) gibi birçok meta-sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin çoğu yüksek hesaplama maliyeti veya gömülü sistemlerde yavaş yakınsama gibi kısıtlarla karşılaşmaktadır. Bununla birlikte, GA operatörlerini içeren memetik algoritmalar, genel TSP'nin çözümünde kullanılmıştır (Gutin ve Karapetyan 2010). Chen vd. (2017) ise, Ateşböceği Sürüsü Optimizasyonu'nu (Glowworm Swarm Optimization – GSO) klasik yöntemlerle birleştirerek 2-OPT algoritması ile hızlandırılmış bir çözüm önermiştir.

Bu sınırlamaları aşmak amacıyla çalışmada Recursive Tabular Validation Algorithm (RTVA) adı verilen yeni bir iki aşamalı rota optimizasyon yöntemi önerilmiştir. RTVA, başlangıçta açgözlü algoritmalar gibi minimum maliyet seçimleri yapar, ardından yinelemeli doğrulama adımlarıyla enerji açısından daha etkin çözümler elde eder. Böylece hem hesaplama hızı hem de enerji farkındalığı artırılmış olur.

Önerilen problemin kümeleri aşağıda verilmiştir:

- $k = \{1, 2, \dots, N\}$: panel yüzeyindeki kirli bölgeler (düğümler),
- N : toplam temizlenecek kirli nokta sayısı

- $i \in k, j \in k$: düğüm numaraları

Algoritma başında hesaplanan mesafe tablosunun parametreleri ise aşağıdaki gibidir:

- $D(i,j)$: i - j düğümleri arası bağlantı,
- $C(i,j)$: $D(i,j)$ bağlantısı için harcanan enerji maliyeti (eşitlik 9)

Kural tabanlı algoritmanın değişkenleri ise:

- $x(i,j) = x(j,i) = \{0,1\}$: $D(i,j)$ veya $D(j,i)$ mesafesi seçildi mi?
- V_k : düğüm derecesi (k düğümünden diğer düğümlere seçilen bağlantı sayısı)

olarak tanımlandığında amaç fonksiyonu olarak toplam rota maliyetini minimize etmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$Cost = \sum_{i,j} C(i,j) \cdot x(i,j) \quad (32)$$

Bunun için kapalı çevrim bir rota oluşturarak başlangıç düğümünden itibaren tüm düğümlerin tek seferde geçilmesi ve tekrar başlangıç düğümüne dönülmesi kısıtları matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilir:

$$V_k = 2 \quad \& \quad \sum_{i,j} x(i,j) = N, \quad k = \{1, 2, \dots, N\} \quad (33)$$

RTVA'nın avantajı, klasik TSP çözücülerinin karmaşıklığından kaçınarak, gerçek zamanlı çalışabilmesi ve temizlik robotunun enerji verimliliğini doğrudan göz önünde bulundurmasıdır.

3.3.1 Yinelemeli Tablo Doğrulama Algoritması (RTVA)

Klasik TSP çözümlerinde karşılaşılan yüksek hesaplama maliyeti ve gömülü sistemlerde yavaş yakınsama sorunlarını aşmak amacıyla bu çalışmada Yinelemeli

Tablo Doğrulama Algoritması (Recursive Tabular Validation Algorithm – RTVA) geliştirilmiştir. RTVA, enerji farkındalığına sahip rota planlama için tasarlanmış özgün bir iki aşamalı optimizasyon yaklaşımıdır.

Temel Yenilikler

Yol Merkezli Optimizasyon:

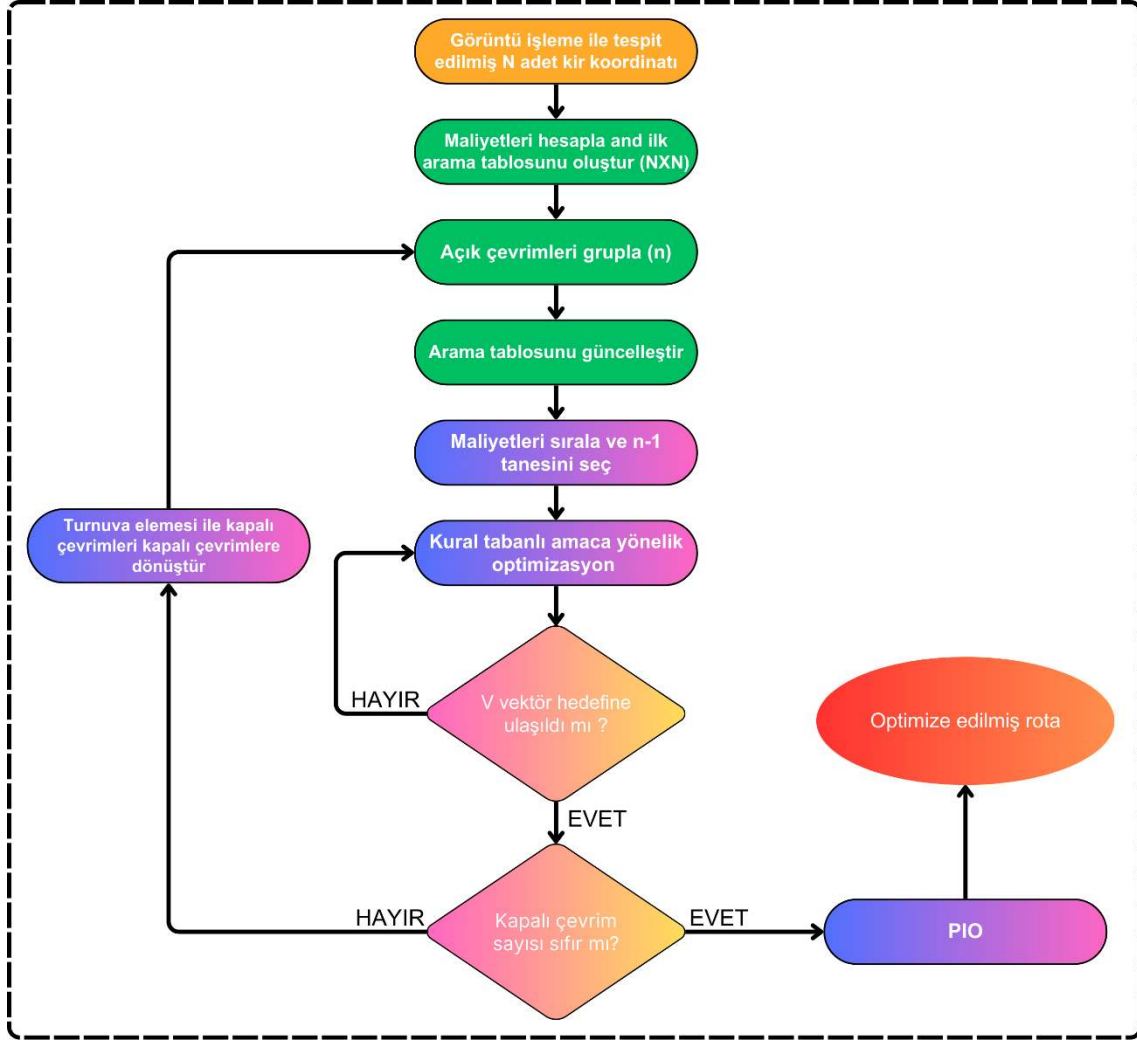
Geleneksel TSP çözümleri genellikle düğüm ziyaret sıralarına odaklanırken, RTVA doğrudan düğümler arası yolları (kenarları) değerlendirir ve enerji açısından verimsiz yolları eler. Bu sayede arama uzayı daraltılır ve yakınsama hızı artırılır.

İki Aşamalı Mimari:

- **Aşama 1 – Yinelemeli Tablo Doğrulama:** Kurallara dayalı yinelemeli bir yapı ile düğümler arası tüm geçişler maliyet tablosuna işlenir. Enerji verimliliği kısıtlarını ihlal eden veya geometrik açıdan uygulanabilir olmayan geçişler tablo dışı bırakılır.
- **Aşama 2 – Yol Kesişimlerinin Düzeltilmesi:** Oluşturulan geçişlerden oluşan güzergâh içinde kesişen yollar tespit edilerek değişim sezgisiyle çözülür. Böylece elde edilen güzergâh hem en kısa mesafeli hem de en düzgün hale getirilir.

RTVA, geleneksel TSP'nin amaçladığı gibi yalnızca bir düğüm sırası aramak yerine, düğümler arası yol seçimlerini yinelemeli doğrulama süreciyle optimize eder. Bu yaklaşım:

- Toplam güzergâh mesafesini kısaltır,
- Enerji tüketimini azaltır,
- Temizlik süresini minimuma indirir.



Şekil 3.19 Önerilen RTVA mimarisinin blok diyagramı.

Ayrıca algoritma gömülü sistemler için tasarlandığından, sınırlı hesaplama kaynaklarında dahi hızlı çalışabilir ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir. Bu yönüyle RTVA, hem hesaplama etkinliği hem de enerji verimliliği açısından klasik meta-sezgisel algoritmalara güçlü bir alternatif sunmaktadır. Bu çerçevenin genel yapısı, Şekil 3.19’da blok diyagramı olarak gösterilmiştir.

3.3.1.1 Rota Planlamasına Tablo Tabanlı İki Boyutlu Yaklaşım

RTVA’nın ilk aşaması, kural tabanlı ve hedef odaklı bir filtreleme mekanizmasıdır. Bu aşama, potansiyel yol seçimlerini sistematik olarak doğrular ve iyileştirir. Geleneksel TSP algoritmaları düğümlerin ziyaret sırasını optimize etmeye odaklanırken, önerilen

yöntem problemi N adet düğüm için $N-1$ geçerli yol (kenar) seçimi olarak ele alır. Böylece çözümün temsil edilmesi basitleştirilir ve erken aşamada verimsiz veya geçersiz rotaların elenmesi mümkün hale gelir.

3.3.1.2 Tablonun Doğrulama Mantığı ve Rota Oluşturma Kısıtları

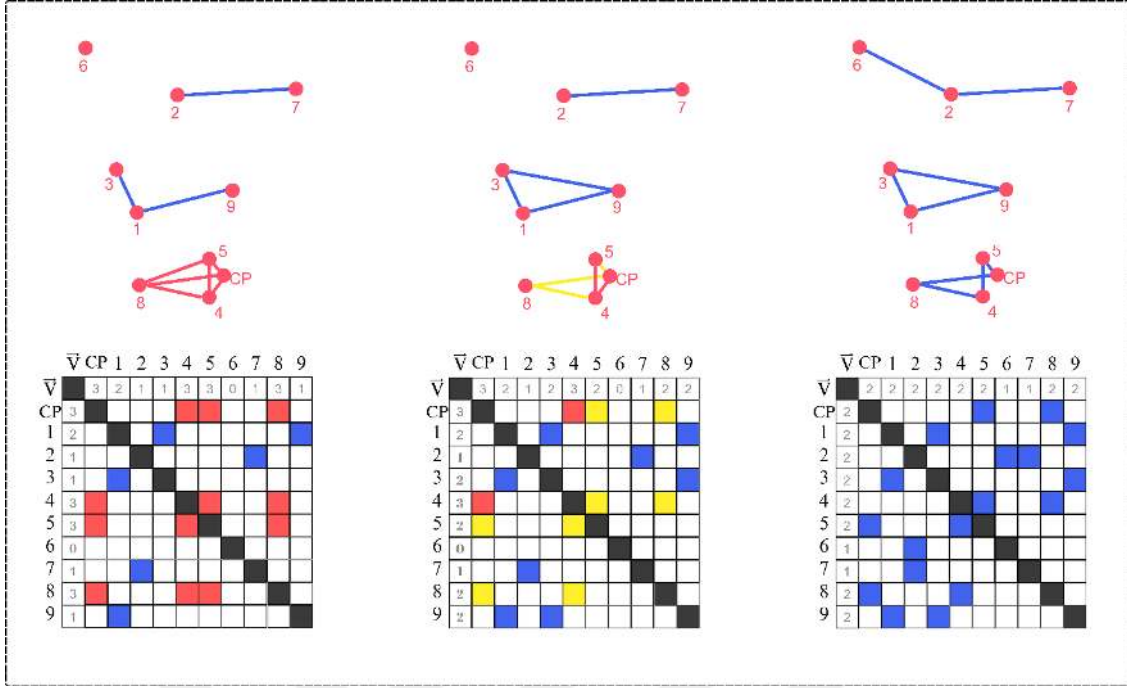
İlk olarak, başlangıç mesafe (veya enerji maliyeti) matrisinden bir arama tablosu (lookup table) oluşturulur (Şekil 3.20). Tablo üzerindeki her hücre, iki düğüm arasındaki potansiyel yönlendirilmiş bir yolu temsil eder. Seçilen yollar, algoritmanın kural setine göre renklendirilerek sınıflandırılır:

- Kırmızı: İki ihlalli düğümü bağlayan ve düğüm derecesini $V_k > 2$ yapan geçersiz yollar.
- Sarı: Yalnızca tek bir düğüm açısından kural ihlali oluşturan yarı-geçersiz yollar.
- Mavi: Mevcut aşamada kurallara uygun ve kabul edilen yollar.

Düğümlerin bağlantı durumunu izlemek için bir vektör V_k tutulur. Bu vektör k düğümünden diğer tüm yollara seçilen yol sayısını dinamik şekilde saklar. Algoritma, tabloyu yinelemeli olarak inceler ve öncelikle kırmızı yolları (katı ihlaller) ortadan kaldırır. Kırmızı yol kalmadığında, sarı yollar (yumuşak ihlaller) elenir. Böylece yalnızca mavi yollar seçilerek ilerleme sağlanır.

Bu hiyerarşik yol eleme süreci, hem topolojik doğruluğu sağlar hem de yakınsama hızını artırır. RTVA'nın ana hedefi, düğüm bağlantılarında şu koşulların sağlanmasıdır:

- Başlangıç ve bitiş düğümlerinin tam olarak bir bağlantıya sahip olması ($V_k = 1$),
- Ara düğümlerin tam olarak iki bağlantıya sahip olması ($V_k = 2$).



Şekil 3.20 RTVA arama tablosunda (lookup table) kural ihlali yapan kenarların elenmesi ve hedef odaklı yol seçimi süreci.

Bu yaklaşım, yalnızca geçerli yönlendirme kısıtlarını karşılayan yol kombinasyonlarına odaklanarak çözüm uzayını önemli ölçüde küçültür. Böylece hem hesaplama verimliliği artar hem de en düşük enerji maliyetine sahip rotaların bulunma olasılığı yükselir. Benzer şekilde, literatürde çözüm uzayını daraltmaya yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, ROE (Reduce-Optimize-Expand) yöntemi arama uzayını bulanık mantık ile dinamik olarak küçülmüştür (Delgadillo vd. 2016). Karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) algoritmalarında yapılan bazı değişikliklerle arama çeşitliliği artırılmıştır (Yan vd. 2017). RTVA ise bu yaklaşımlardan farklı olarak, optimizasyon aşamasına geçmeden önce uygulanabilir olmayan yolları elimine ederek daha hızlı yakınsamayı garanti eder.

3.3.1.3 Turnuva Seçim Yöntemi

RTVA'nın ikinci aşamasında, Turnuva Seçim tabanlı bir mekanizma kullanılmaktadır. Bu yöntem, başlangıçta oluşturulan arama tablosundan türetilen geçerli rotaları yinelenmeli olarak düzeltmek ve iyileştirmek amacıyla uygulanır. Amaç, zaman içinde gelişen bir yol kümesi oluşturarak, en düşük enerji maliyetine sahip tekil bir açık döngü

elde etmektedir.

Turnuva seçim süreci şu adımlarla yürütülür:

- **Aday Yol Kümesi Oluşturma:** Lookup tablosundan seçilmiş geçerli yollar bir aday havuzu olarak belirlenir.
- **Rastgele Alt Küme Seçimi:** Bu havuzdan rastgele küçük alt kümeler (turnuva grupları) oluşturulur.
- **Karşılaştırma ve Seçim:** Her turnuvada, enerji maliyeti en düşük olan yol veya yol bileşimi kazanan olarak belirlenir. Enerji maliyetleri, yalnızca geometrik mesafeye değil aynı zamanda adım motorlarının gerçek hareket maliyetine göre hesaplanmaktadır.
- **Yinelemeli İyileştirme:** Kazanan yollar korunarak bir sonraki turda diğer yollarla tekrar karşılaştırılır. Kaybeden yollar ise elenir veya düşük öncelikli hale getirilir.

Bu iteratif süreç sonucunda, yüksek maliyetli veya topolojik olarak uygunsuz yollar sistematik biçimde elimine edilir ve enerji açısından verimli rotalar korunur. Turnuva seçimi, rastgelelik ve seçiciliği birlikte kullanarak yerel minimumlara takılma riskini azaltır. Ayrıca, bu yöntem gömülü sistemler için uygundur çünkü hesaplama yükünü düşük tutarken hızlı yakınsamaya olanak tanır.

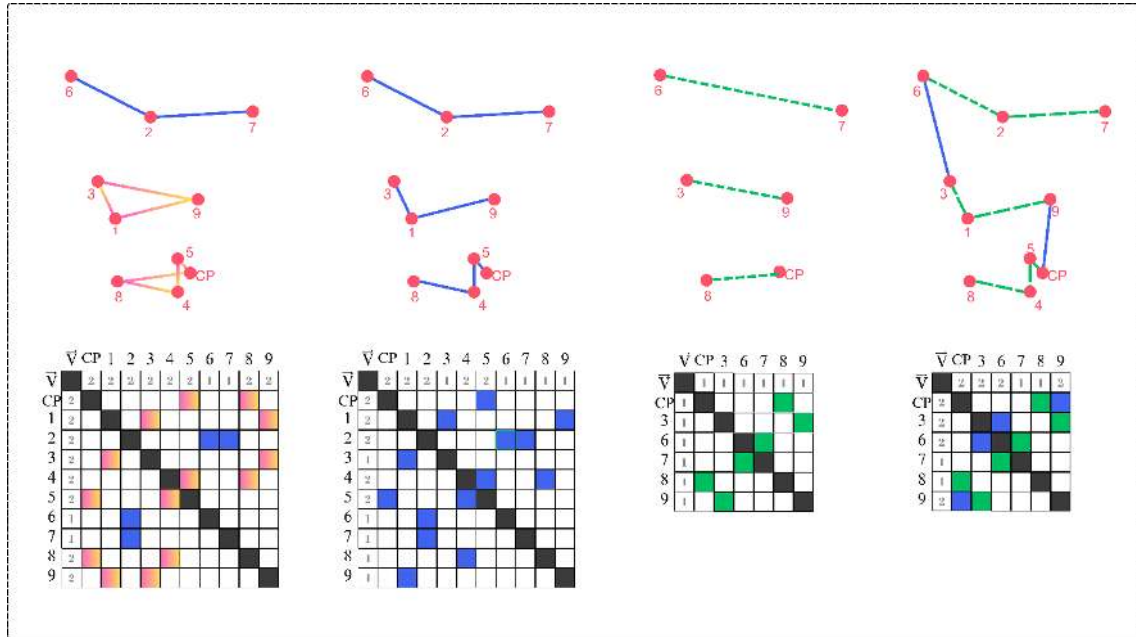
Sonuç olarak, turnuva seçim aşaması ile RTVA, yalnızca geometrik olarak en kısa rotayı değil, enerji açısından en uygun rotayı güvenilir şekilde üretmektedir.

3.3.1.4 Açık Çevrim Başlangıcı ve Yol Seçim Stratejisi

RTVA'nın üçüncü aşamasında, rota planlama süreci açık çevrim başlangıcı ile başlatılmaktadır. Bu yaklaşımda, panel yüzeyinde tespit edilen tüm kirli bölgeler (düğüm) başlangıçta birbirinden bağımsız açık döngüler olarak tanımlanır. Her bir düğüm, yalnızca kendisine ait bir başlangıç noktası şeklinde kabul edilir ve bu yapı, daha sonra birleşmeye uygun bir matris formunda temsil edilir.

Bu aşamada oluşturulan lookup tablosu, yalnızca bu açık döngülerin uç noktalarını (vertex connections) içerir. Tabloda yer alan yollar renk kodları ile işaretlenir:

- Yeşil yollar: Sabit seçimlerdir, algoritmanın ilerleyen adımlarında silinemez ve koruma altında tutulur (Şekil 3.21).



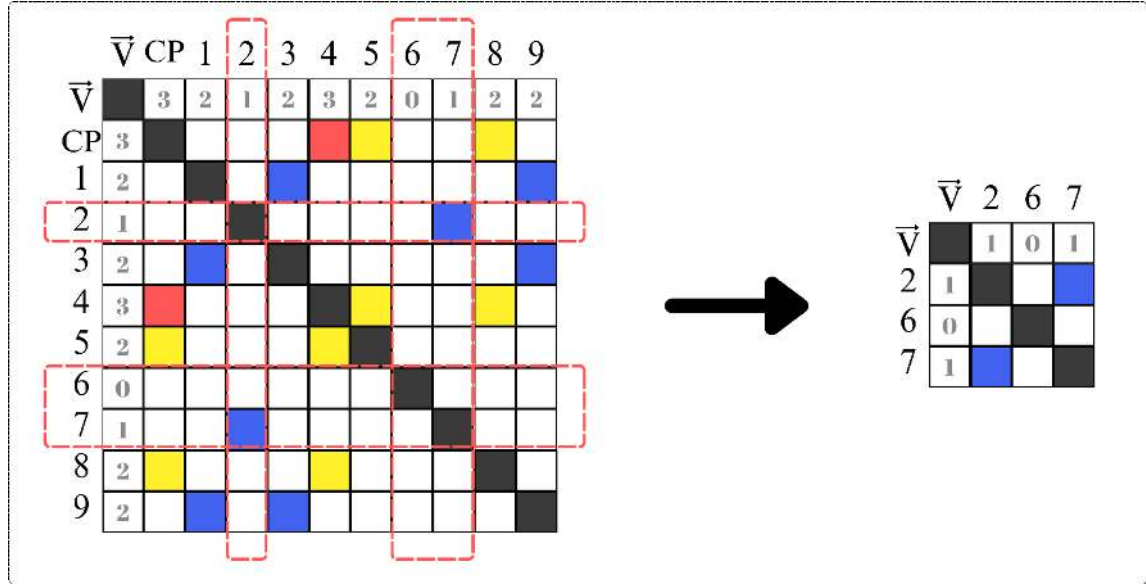
Şekil 3.21 İç bağlantıların daraltılması yoluyla kapalı döngülerin açık çevrimlere dönüştürülmesi.

Yeşil yollar sabitlenip havuz dışına çıkarıldıktan sonra, algoritma kalan adaylar arasından $n-1$ minimum maliyetli bağlantıyı seçer. Burada n , o aşamadaki açık döngü sayısını göstermektedir. Toplamda oluşturulabilecek bağlantı sayısı $n(n-1)/2$ formülü ile ifade edilir.

Her yinelemede, Turnuva Seçim Yöntemi kullanılarak en verimsiz yol (genellikle kırmızı işaretli) silinir ve yerine, tüm bağlantı kurallarını sağlayan en uygun alternatif yol eklenir. Böylece algoritma, döngülerin giderek birleşmesini sağlayarak nihai bir kapalı tur oluşturmaya yaklaşır.

Bu aşamada kullanılan seçilebilir mesafeler matrisi (Şekil 3.22), yalnızca derece kısıtını

(her düğümün en fazla 2 bağlantıya sahip olması) ihlal etmeyen yolları içerir. Böylece, gereksiz hesaplamalar daha sürecin başında elenmekte, arama uzayı küçültülmekte ve algoritmanın yakınsama hızı artırılmaktadır.



Şekil 3.22 Kural tabanlı filtreleme sonrası seçilebilir mesafe matrisi.

Sonuç olarak, açık çevrim başlangıcı ve yol seçim stratejisi, RTVA'nın hızlı ve enerji-verimli rota üretme kabiliyetinin temelini oluşturmaktadır. Bu strateji sayesinde, algoritma hem topolojik geçerliliği hem de enerji optimizasyonunu aynı anda garanti etmektedir.

3.3.1.5 Açık Çevrimlerin Rotaya Dönüştürülmesi

RTVA'nın son aşamalarında, yinelemeler ilerledikçe çözümler içerisinde kapalı döngüler ortaya çıkabilmektedir. Bu durum, düğümlerin en kısa yollar üzerinden bağlandığı Minimum Kapsayan Ağaç (Minimum Spanning Tree – MST) (Held vd. 1971) algoritmasının sonuçlarına benzerlik gösterir. Ancak MST yapılarında tam bir tur garantisi yoktur; düğümler tekrar ziyaret edilebilir veya tur tamamlanmadan sonlanabilir. Oysa TSP tabanlı rota planlamasında kritik gereklilik, tüm noktaların

tekrarsız şekilde dolaşarak açık bir tur oluşturulmasıdır.

Bu sorunu çözmek için RTVA, özyinelemeli döngü kırma stratejisi uygulamaktadır:

- Kapalı döngülerin açılması: Çözümde beliren kapalı döngüler, Şekil 3.21’de gösterildiği gibi turnuva seçimi yöntemi kullanılarak sistematik biçimde açık döngülere dönüştürülür.
- Köşe düğümlerin belirlenmesi: Açık döngülerin uç noktaları tespit edilir ve bunlar yeni bağlantıların aday noktaları olarak kabul edilir.
- Yeni arama tablosunun oluşturulması: Açık döngüler bu kez daha üst seviye düğümler gibi ele alınır ve bağlantı vektörü V_k yeniden yapılandırılır.
- En kısa yolların seçilmesi: Döngüler arası tüm olası bağlantılar içerisinde $n-1$ adet en kısa yol (n : açık döngü sayısı) seçilir ve yeşil kod ile işaretlenerek ilerleyen aşamalarda silinmeleri engellenir.

Bu işlemlerin ardından, turnuva seçimi yeniden uygulanarak alt döngüler kademeli biçimde daha büyük açık döngülere dönüştürülür. Yinelemeler sonunda yalnızca tek bir açık çevrim kalır ve bu yapı, optimal veya optimal yakınsaması yüksek bir TSP rotası olarak kabul edilir. Son aşamada elde edilen bu rota, aynı zamanda robotik temizleme operasyonunun başlangıç ve bitiş istasyonlarını da belirler.

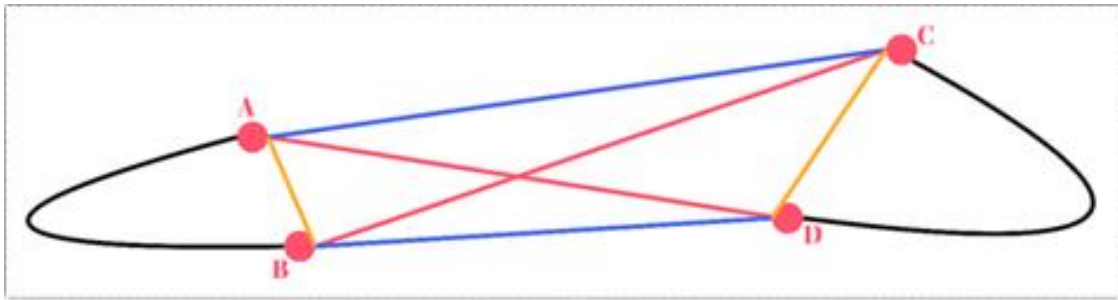
Bu uyarlamalı döngü kırma ve birleştirme süreci, yalnızca çözümün topolojik geçerliliğini garanti etmekle kalmaz; aynı zamanda arama uzayını kural uyumlu yol kombinasyonlarıyla sınırlandırarak hesaplama karmaşıklığını da önemli ölçüde azaltır. Böylece RTVA, klasik optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha hızlı yakınsama ve enerji verimliliği sağlar.

3.3.1.6 Kesişen Yol Optimizasyonu

RTVA’nın ikinci aşaması, oluşturulan rotanın topolojik yapısını iyileştirmeye odaklanır. İlk aşamada elde edilen rotalar, çoğu durumda kesişen yollar içerebilir. Bu durum, hem tekrarlanan yol katetme hem de enerji ve zaman verimsizliği ile sonuçlanır. Dolayısıyla,

bu aşamada Yol Kesişimi İyileştiricisi (Path-Intersection Optimizer – PIO) devreye alınarak rotanın son hâli optimize edilir.

Başlangıç ve bitiş istasyonları bağlanarak tam bir tur elde edildikten sonra, algoritma rotada dört istasyondan oluşan alt dizileri inceler. Bu dizilerdeki ardışık olmayan iki kenarın kesişmesi, kesişim noktası olarak tanımlanır (Şekil 3.23). Bu tür bir yapı, aynı istasyonlar arasında daha kısa alternatif bağlantılar mümkünken fazladan yol kat edilmesine neden olur.



Şekil 3.23 Yol Kesişimi İyileştiricisi (PIO) kavramı. (Siyah yollar mevcut rotaları, kırmızılar kesişimleri, sarı ve mavi yollar ise alternatif bağlantıları göstermektedir).

Kesişimleri çözmek için algoritma şu adımları uygular:

- Kesişen yol çiftlerinin tespiti: Geometrik kontrol mekanizmasıyla, ardışık olmayan iki kenarın kesişip kesişmediği belirlenir. Kesişimler, saat yönü sıralama koşulu kullanılarak tespit edilir. Bu koşul, iki kenarın geometrik yönelimlerini karşılaştırarak onların kesişip kesişmediğini belirler.
- Alternatif yol çiftlerinin hesaplanması: Aynı dört istasyonu bağlayabilecek iki alternatif yol çifti hesaplanır.
- En uygun yol çiftinin seçilmesi: Bu çiftler arasında toplam maliyeti daha düşük olan tercih edilir. Bu yaklaşım, klasik 2-OPT yerel arama yöntemine (Croes 1958) benzer şekilde çalışır. Ancak standart 2-OPT algoritmasından farklı olarak PIO, İyileştirme bulunmasa bile kesişen yolları ortadan kaldırmak için alternatif çiftlerden birini seçer. Eğer düşük maliyetli alternatif çift geçersiz bir kapalı döngü oluşturuyorsa, bu seçenek elenir ve diğer yol çifti tercih edilir.

Böylece algoritma, hem tek bir açık çevrim turunun sürekliliğini garanti eder hem de rotayı geometrik olarak daha düzenli hâle getirir.

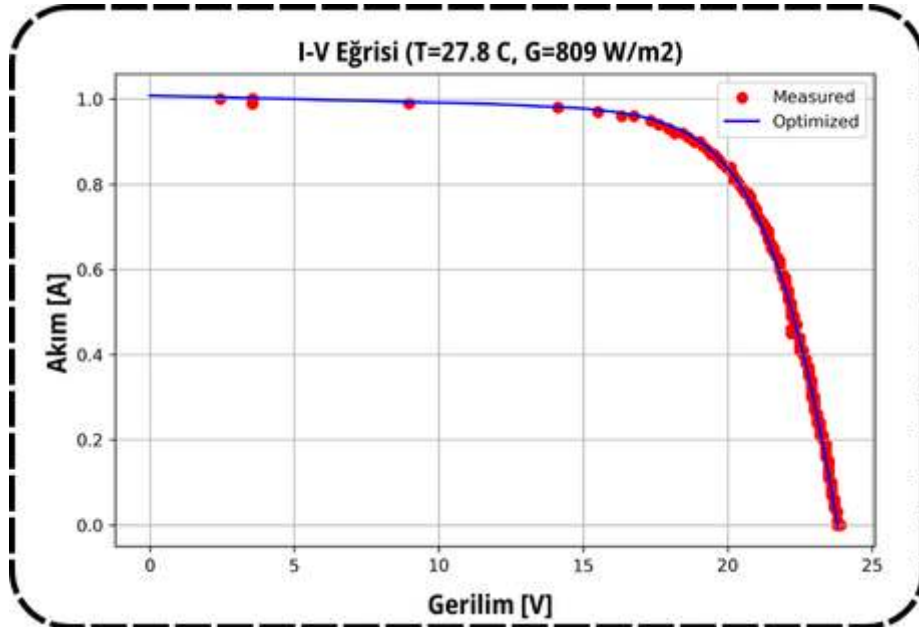


4. BULGULAR

Bu bölüm, çalışma kapsamında yapılan karar verme algoritmasına ait bloklarda uygulanan akıllı geliştirmeleri, düzgün dağılmamış kirlilikle alakalı simülasyon-deney sonuçlarını ve mekanizmanın test sonuçlarını içermektedir.

4.1 Eşdeğer Devre Modellemesi ile Panel Seviyesinde Simülasyonlar

Bu bölümde, ECM kullanılarak 25 W'lık monokristal PV panelin farklı çevresel koşullardaki performansı analiz edilmiştir. Model, tek diyotlu eşdeğer devre temelinde oluşturulmuş ve PO yöntemiyle panelin gerçek ölçümlerinden elde edilen I-V eğrileri yardımıyla kalibre edilmiştir. Ölçüm koşulları $G = 809 \text{ W/m}^2$ ve $T = 27.8 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiş, ardından optimizasyon sonucunda elde edilen parametreler, panelin farklı ışıınım ve sıcaklık koşullarındaki performansının hesaplanmasında kullanılmıştır. PO ile bulunan değerlere göre ölçülen koşullar altında panelin I-V grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Burada G, panel yüzeyine gelen doğrudan güneş ışıınımını, T ise panel sıcaklığını ifade etmektedir.

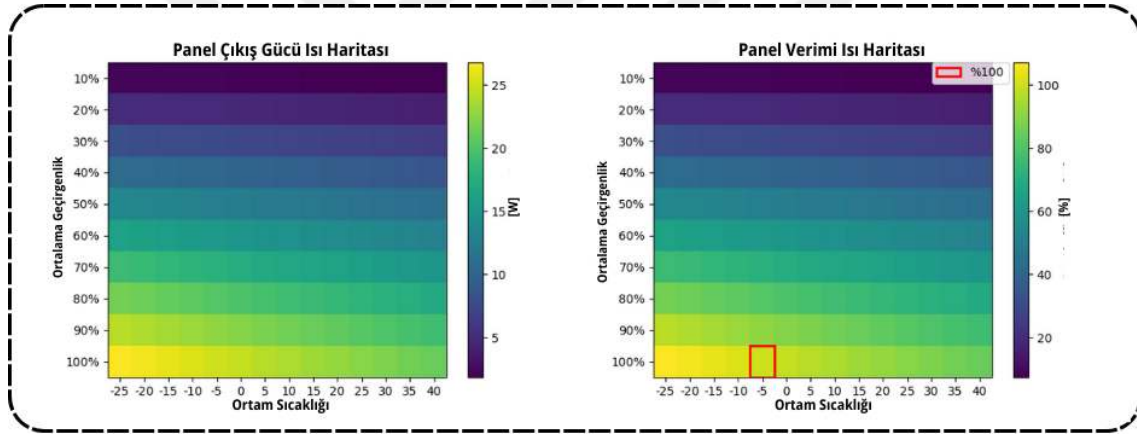


Şekil 4.1 PO ile bulunan I-V eğrisi ve ölçülen I-V eğrisi.

Çizelge 4.1 PO ile bulunan ECM parametreleri.

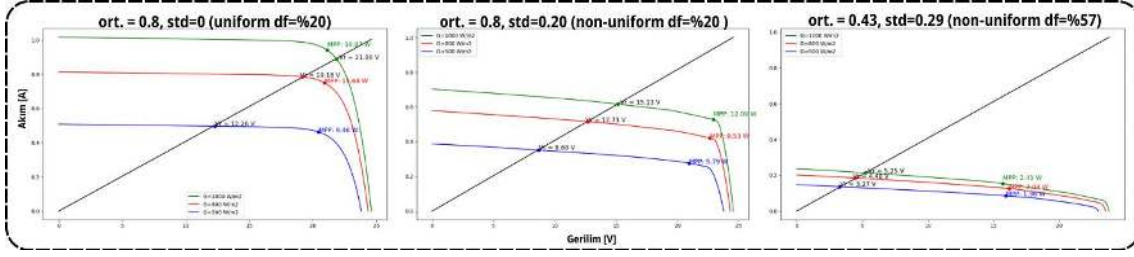
Parametre	Optimize Edilen Değer
n	1.6928
I_{ph} [A]	1.0091
R_s [Ω]	2.42
R_{sh} [Ω]	1806.98

Parametrelerin belirlenmesiyle oluşturulan model, farklı ışıınım (G) ve sıcaklık (T) değerlerinde panelin çıkış gücünü tahmin etmek üzere simülasyonlarda uygulanmıştır. Burada geçirgenlik (τ) kavramı, STC’de temiz panele ulaşan ışıınıma karşılık gelen ve kirlilik nedeniyle yarı iletken yüzeye ulaşan efektif ışıınım miktarını temsil etmektedir.



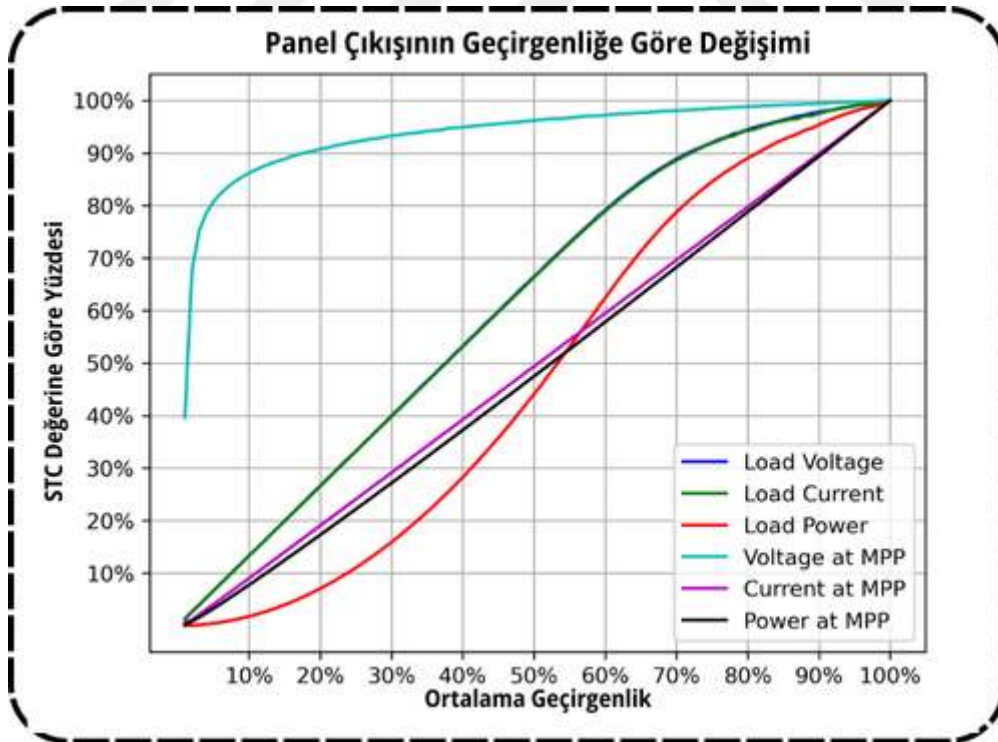
Şekil 4.2 Farklı sıcaklık ve ışıınım koşullarında panel çıkış gücü ısı haritası.

Elde edilen sonuçlara göre, sıcaklık artışı panel çıkış gücünde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Şekil 4.2’de gösterilen ısı haritası, panelin çıkış gücünün hem ışıınım hem sıcaklık değişkenlerine bağlı olarak değişimini ortaya koymaktadır. Burada yatay eksen sıcaklık, düşey eksen ışıınım değerlerini, renk skalası ise çıkış gücünü temsil etmektedir. Sıcaklık yükseldikçe güç kaybı özellikle yüksek ışıınım bölgelerinde daha belirgin hale gelmektedir. Burada ortam ışıınım değeri STC değeri olarak sabit kabul edilerek geçirgenlik ifadesi ile malzemeye ulaşan ışıınımın düşüşü temsil edilmiştir. Aynı zamanda tüm panel yüzeyindeki kirlilik (ya da geçirgenlik) uniform dağılmıştır.



Şekil 4.3 Ortalama %20 kirliliğin a) uniform($\sigma=0$), b) $\sigma=0.20$, ve ortalama %57 kirliliğin c) $\sigma=0.29$ standart sapma değerlerinde dağılımı ile farklı ışınlam değerlerinde I-V eğrileri.

Geçirgenliğin yüzey boyunca uniform olarak %80 (yaklaşık %20 kirlilik) dağılımı durumunda panelin I-V karakteristikleri Şekil 4.3(a)'da verilmiştir. Panel sıcaklığı sabit kabul edilerek (STC değerinde) farklı ışınlam seviyelerinde elde edilen eğriler, MPP konumunun ışınlam şiddetiyle neredeyse doğrusal biçimde arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, MPP gerilimindeki değişim oldukça sınırlı kalmış, bu da ışınlamın daha çok akım bileşenini etkilediğini göstermiştir. Bu etkilerin tüm uniform geçirgenlik değerleri için değişimi Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Farklı ışınlam koşullarında panel çıkış parametrelerinin STC değerlerine göre değişimi.

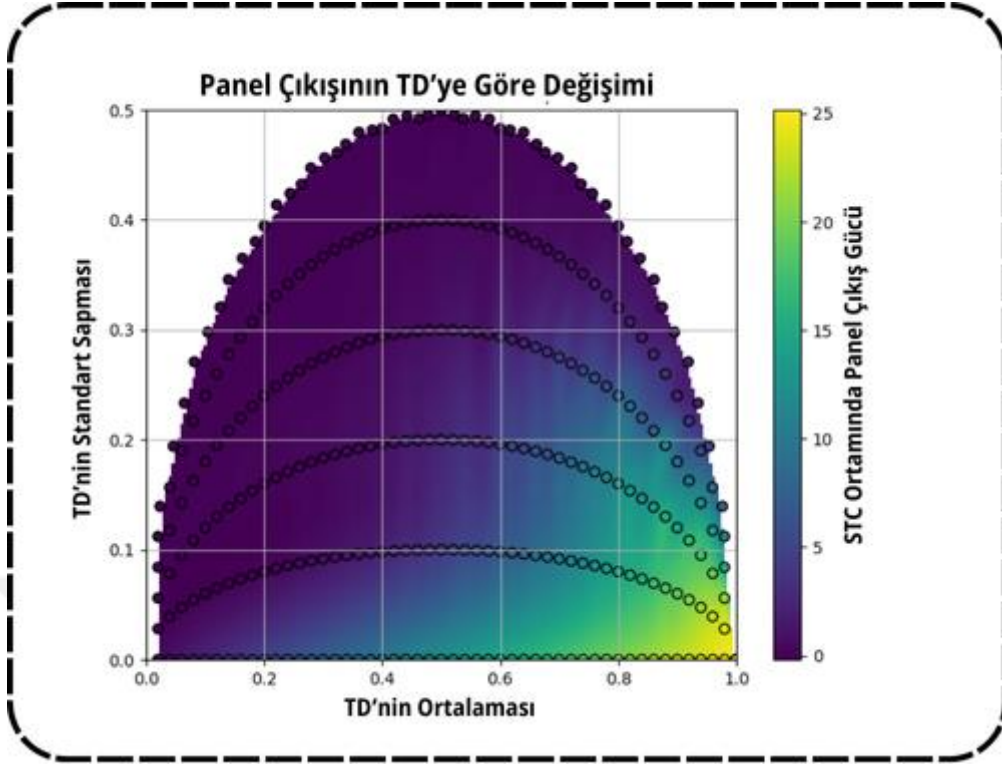
Ancak sabit bir yük bağlandığında yüke aktarılan güç ise ışınlımla ikinci dereceden artış göstermektedir (hem akım hem gerilim değişmekte). Bu bulgulara göre, uniform kirlenmede panel çıkış gücü eşitlik 26'ya benzetilerek eşitlik 34'deki gibi (literatürdeki kirlenme modellerine benzer şekilde) yazılabilir.

$$MPP = MPP_{stc} \cdot \frac{\mu_v \cdot G_a}{G_{STC}} \quad (34)$$

Şekil 4.3(b) ve (c)'de ise non-uniform kirlilik senaryoları ele alınmıştır. Bu şekillerde MPP, uniform dağılımdaki beklenen panel çıkış gücünden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sebepten MPP, eşitlik 34'teki gibi bir modelle ifade edilememektedir. Bu düşüş derecesini standart sapma derecesine ile ilişkilendirmek adına eşitlik 35'teki non-uniform düşüş katsayısı (*NDC*) ile kullanılabilir.

$$NDC = \frac{MPP_{stc}}{MPP} \cdot \frac{\mu_v \cdot G_a}{G_{STC}} \quad (35)$$

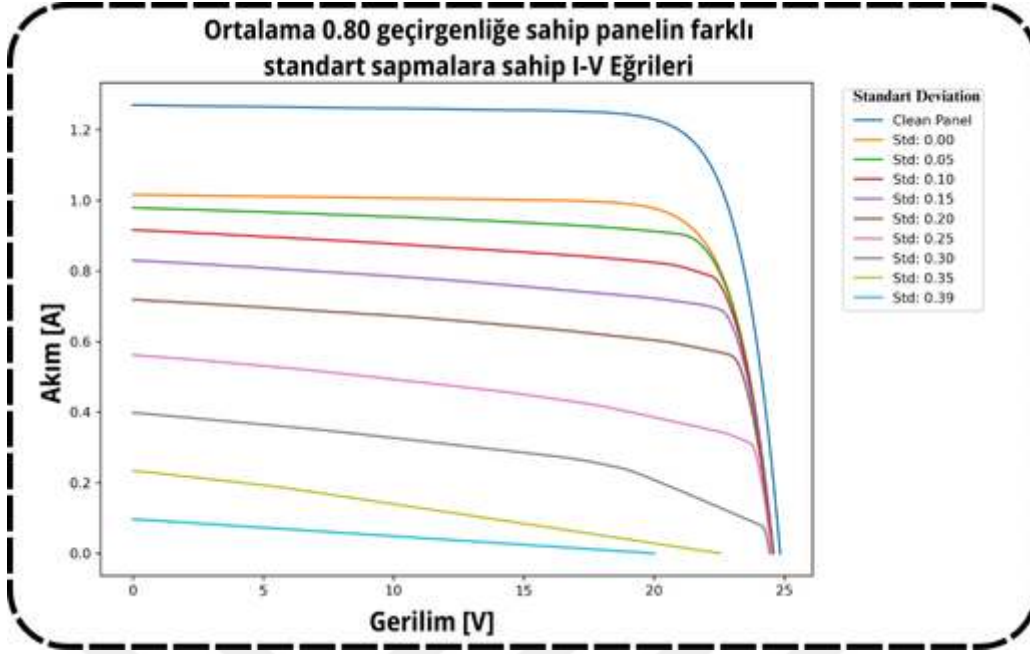
Uniform kirlilikte Şekil 4.3-4.4'te görüldüğü üzere *NDC* ışınlıma ters olarak çok az miktarda azalış gösterse de *NDC* tüm ışınlım şiddetleri için neredeyse 1'e yakındır. Ancak non-uniform kirlilikte ise MPP konumu ışınlım şiddetiyle neredeyse eksponansiyel bir biçimde artmaktadır. STC koşullarında yapılan simülasyonda panel yüzeyinin TD'sine göre oluşacak panel çıkış gücünün değişimi ısı haritası olarak Şekil-4.5'de verilmiştir. Grafikteki paraboller Bernoulli dağılımına göre ortalama değere göre olabilecek en yüksek standart sapma noktalarıdır.



Şekil 4.5 STC’de TD’ye bağlı olarak panel çıkış gücünün değişimi.

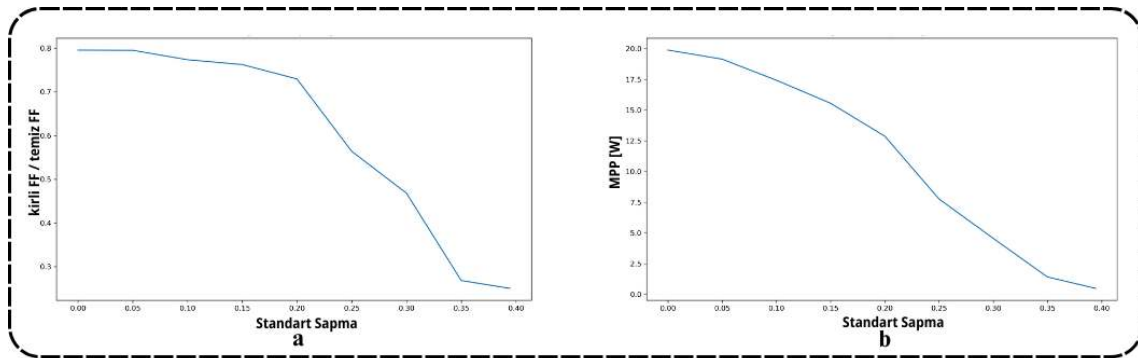
Bu bulgulara göre kirliliğin sapma derecesi ile ışınım şiddeti ve MPP arasında ilişki kurmak zordur. Bu senaryo gerçek dünyada, opak bir maddenin (geçirgenlik katsayısı=0) alanının panel yüzeyi alanına oranı ortalama kirlilik faktörü ($ort.(df)$) olarak, maksimum sapma durumunda bütün olarak panel yüzeyinin bir bölgesini kapladığı (örneğin bir hücre büyüklüğünde opak maddenin yüzeyde ortalama I/N_s kirliliğe $(N_s-I)/N_s$ ortalama geçirgenliğe sahip olması) daha sonra da bu opak maddenin hücre sayısı kadar eşit parçaya bölünerek her hücreye bir parçasının konulması ile uniform kirlilik elde edilmesi ile açıklanabilir.

Kirliliğin panel yüzeyinde istatistiksel bir dağılım olarak ele alınması, aynı ortalama geçirgenliğe sahip panellerin farklı standart sapmalarda farklı performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.6’te, ortalama geçirgenliği %80 olan bir panelin farklı standart sapma değerlerinde I–V eğrilerindeki değişim görülmektedir. Sapma arttıkça eğriler baskılanmakta, yani aynı miktarda kirleticinin daha düzensiz dağılması güç üretimini düşürmektedir.



Şekil 4.6 Ortalama %20 non-uniform kirliliğe sahip panelin STC koşullarında ve farklı standart sapma dağılımına göre I-V eğrileri.

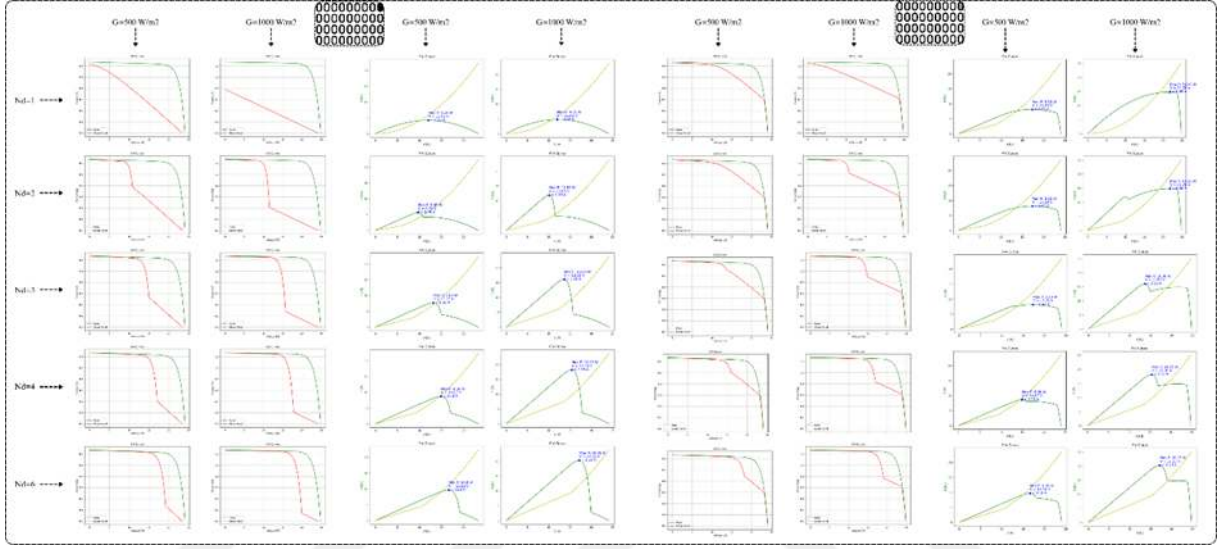
Şekil 4.7’de ise, aynı senaryo için Doldurma Faktörü (Fill Factor – FF) ve MPP değerlerinin değişimi sunulmuştur. Sonuçlar, standart sapma arttıkça hem FF hem MPP’nin doğrusal olmayan biçimde azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.7 Ortalama %20 non-uniform kirliliğe sahip panelin STC koşullarında ve farklı standart sapma dağılımına göre a) Doldurma Faktörü (FF) b) Maksimum Güç Noktası (MPP) değişimi.

Non-uniform kirlilik senaryolarında panel yüzeyinde gölgelenen hücrelerin davranışı, baypas diyotlarının sayısına bağlı olarak da değişmektedir. Şekil 4.8’de, bir hücrenin tamamının veya yarısının ışınım almaması durumlarında, farklı sayılarda baypas diyotlarıyla korunmuş panellerin I–V ve P–V eğrileri sunulmuştur.

Analiz sonuçlarına göre, baypas diyot sayısı arttıkça panelin çıkış gücü artmakta; çünkü bu diyotlar, düşük akımlı hücrelerin etkisini sınırlandırarak akım sürekliliğini korumaktadır. Işınım değişimi, akım artışını doğrudan etkilerken, non-uniform kirlilik koşullarında gerilim bileşeni doğrusal olmayan şekilde kayma göstermiştir.



Şekil 4.8 Farklı baypas diyotları ile panelin korunması durumunda 500 W/m² ve 1000 W/m² ışınım değerlerinde I-V ve P-V grafikleri.

Bu analizler sonucunda elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Sıcaklık artışı panel çıkış gücünü özellikle yüksek ışınım koşullarında düşürmektedir.
- Uniform kirlilik durumlarında MPP, ışınım şiddetiyle neredeyse lineer korelasyon göstermekte, gerilim kayması ise minimaldir.
- Non-uniform kirlilik durumlarında MPP, ışınım şiddeti ile doğrusal olmayan değişim göstermektedir.
- Aynı ortalama kirliliğe sahip ancak farklı standart sapma dağılımlarındaki paneller farklı güç çıkışları göstermektedir; sapma arttıkça eğri baskılanmakta ve MPP değeri düşmektedir. Ancak sapmanın nümerik değeri ile bu değişimi ilişkilendirmek zordur.
- Non-uniform kirlilikte baypas diyotlarının sayısı, güç kaybını belirgin şekilde

azaltmaktadır.

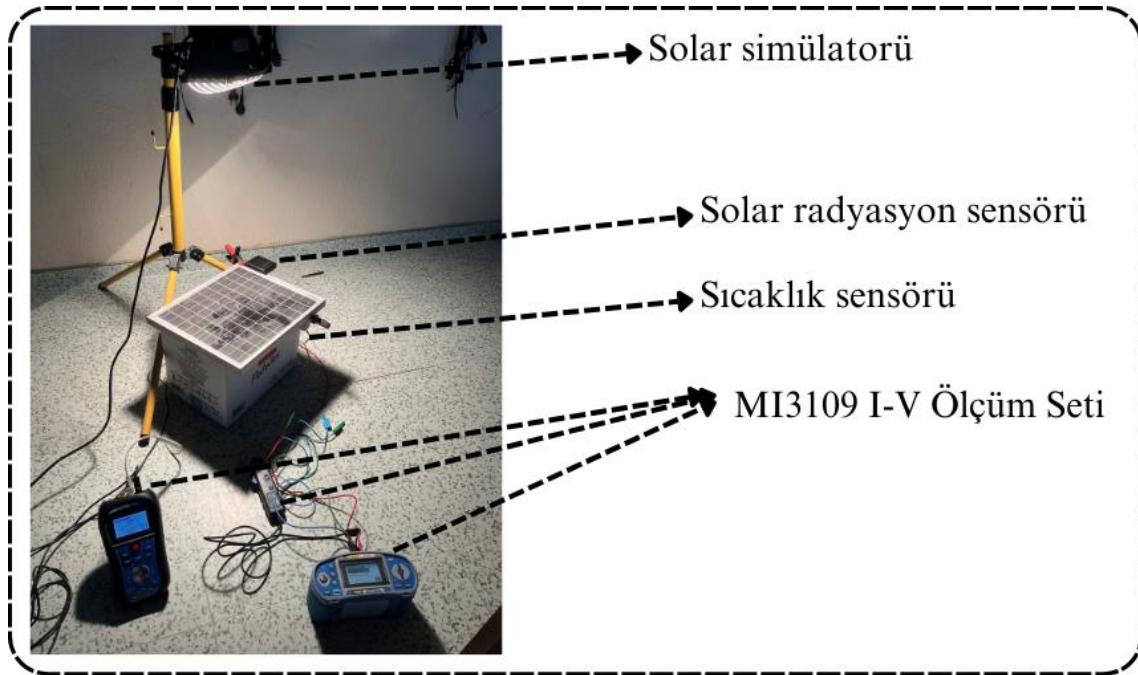
- Geçirgenlik dağılımının ortalama ve standart sapma değerlerinin bilinmesi, farklı çevresel koşullarda MPP değişiminin ECM ile öngörülmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

4.2 Yüzeydeki Geçirgenlik Dağılımının I-V Eğrilerinden Çıkarılması

Bu bölümde, panel yüzeyinde kirlenmeden kaynaklanan ışık geçirgenliği farklılıklarının panel performansına etkisini belirlemek için geliştirilen optimizasyon tabanlı ve IP tabanlı iki yaklaşım sunulmuştur.

4.2.1 Deneysel Kurulum ve Ölçüm Sistemi

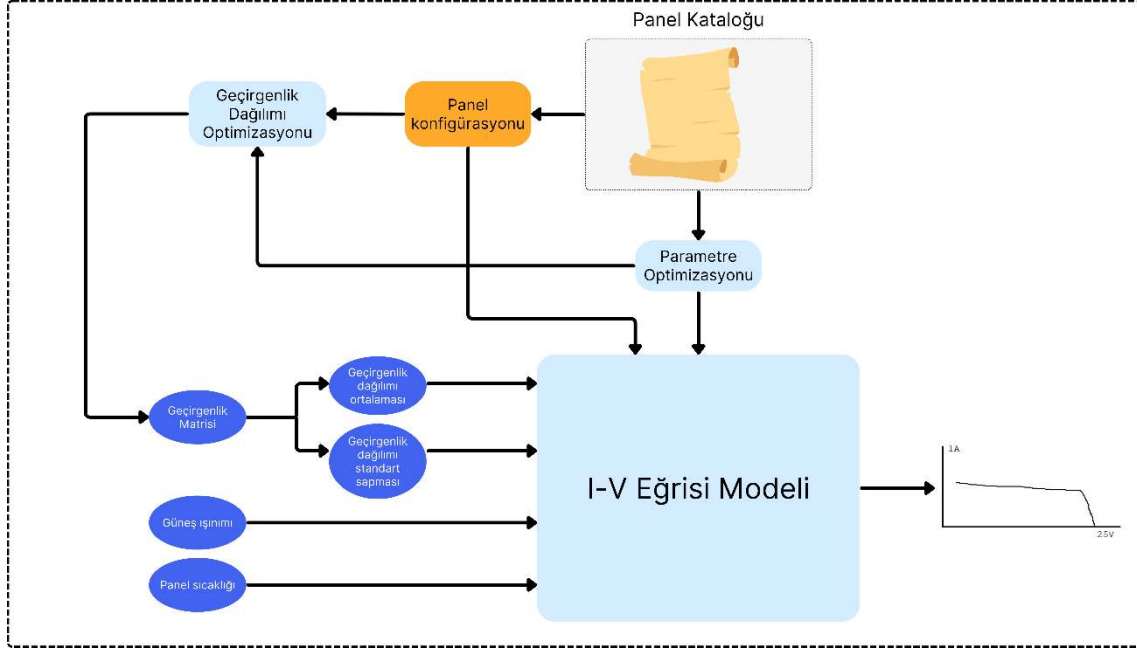
Önerilen yaklaşım, Afyon Kocatepe Üniversitesi Güneş ve Rüzgar Enerjisi Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde deneysel olarak doğrulanmıştır. Şekil 4.9'da gösterilen ölçüm sistemi, kirli panellerin I-V verilerini gerçek çalışma koşulları altında toplamak amacıyla Metrel MI3109 PV Analyzer cihazı ile kurulmuştur. Ölçülen I-V eğrileri daha sonra önerilen TD modelinde analiz edilmiştir.



Şekil 4.9 Ölçüm sistemi.

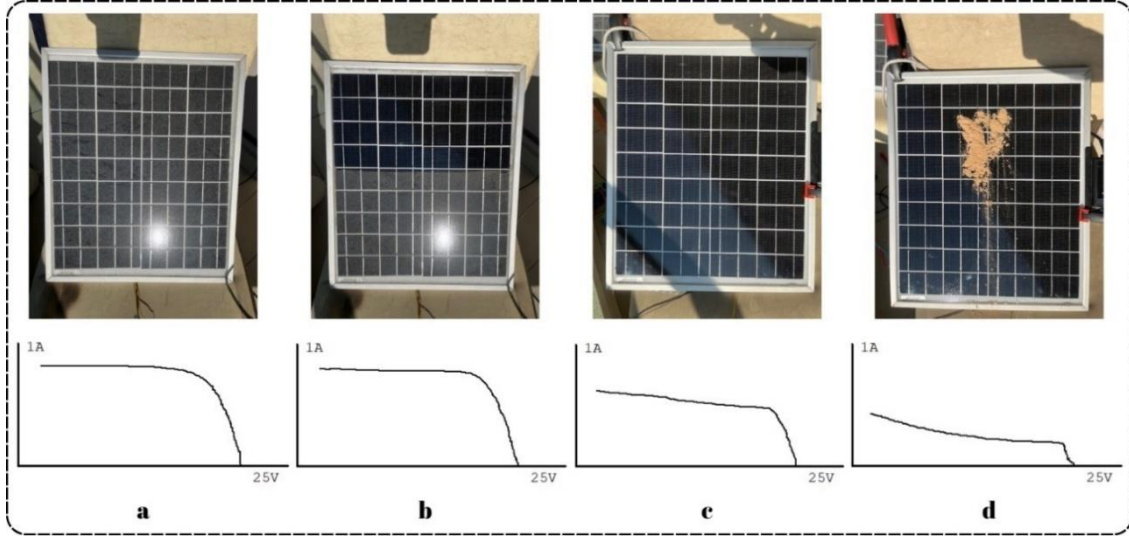
4.2.2 TD'nin Eşdeğer Devre Entegrasyonu

Ölçümden elde edilen veriler, Şekil 4.10'de gösterilen TD tabanlı optimizasyon modeli yardımıyla işlenmiş ve analiz edilmiştir. Model, DOA kullanarak belirli bir çözüm alanı içinde, ölçülen I-V eğrisine en iyi uyan TD parametrelerini (μ_v , σ_v) belirlemektedir.



Şekil 4.10 Çıkarılan TD kullanılarak I-V eğrisi tahmini blok şeması.

Optimizasyon, kısmi ve homojen kirlenme durumlarını aynı anda değerlendirebilmektedir. Bu senaryolar Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11 Farklı kirlenme tiplerine göre temsili panel görüntüleri ve karşılık gelen I–V karakteristikleri: a) Homojen yumuşak kirlenme, b) Kısmi yumuşak kirlenme, c) Temiz modül (kısmi gölgelenme), d) Yoğun kısmi kirlenme.

4.2.3 TD Parametre Aralığı

Optimizasyon sürecinde her bir geçirgenlik değeri $[0-1]$ aralığıyla sınırlandırılmıştır. Kısa devre akımı (I_{sc}) ölçümleri, arama alanını daraltmak ve yakınsama hızını artırmak amacıyla ek kısıtlamalar olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.6’da görüldüğü üzere, maksimum I_{sc} , TD’nin standart sapmasının (σ_v) sıfır olduğu durumda meydana gelir ve doğrudan TD’nin ortalama değeri (μ_v) ile ilişkilidir (Eşitlik 26). μ_v , aynı sıcaklıkta ölçülen $I_{sc}^{ölçüm}$,nin temiz panel fotoakımı (I_{ph}^{temiz}) oranından daha küçük olamaz. Bu durum, Eşitlik 36 ile ifade edilmektedir:

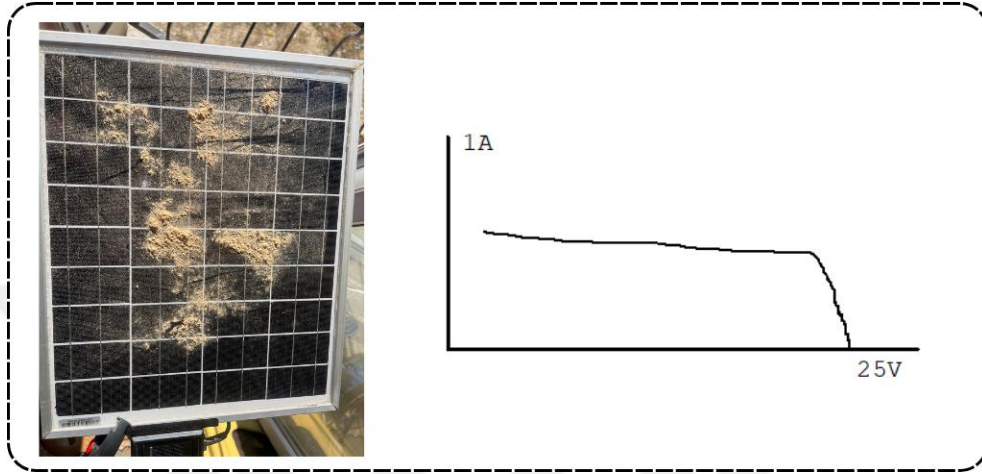
$$\mu_v = \left[\frac{I_{sc}^{ölçüm}}{I_{ph}^{temiz}}, 1 \right] \quad (36)$$

Popoviciu eşitsizliğine göre TD standart sapmasının üst sınırı ise Bernoulli dağılımı varsayımı altında şöyle tanımlanır:

$$\sigma_v = [0, \text{sqrt} [\mu_v \cdot (1 - \mu_v)]] \quad (37)$$

Bu sınırlar çözüm uzayını daraltarak hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmaktadır.

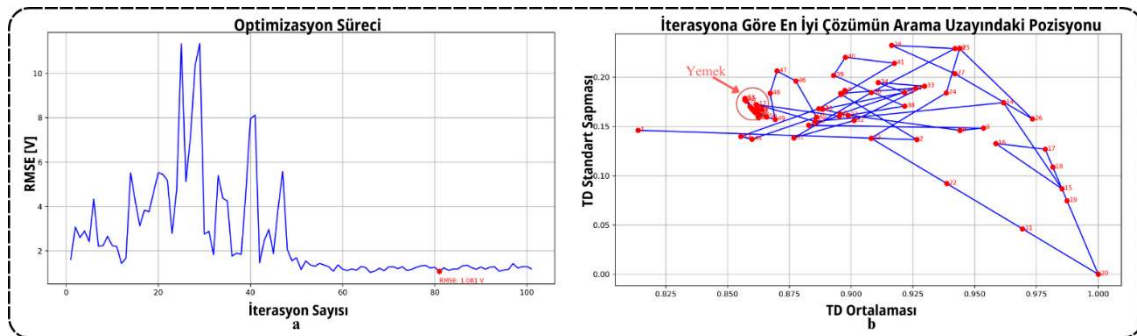
Şekil 4.12’de, $G = 718 \text{ W/m}^2$ ve $T = 20.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ koşullarında yapılan ölçüm ve ilgili panel görüntüsü gösterilmiştir. Bu durumda, minimum TD ortalaması 0.694 ve maksimum standart sapma 0.461 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12 Kirlı panel görüntüsü ve TD optimizasyonu için kullanılan I–V ölçümleri.

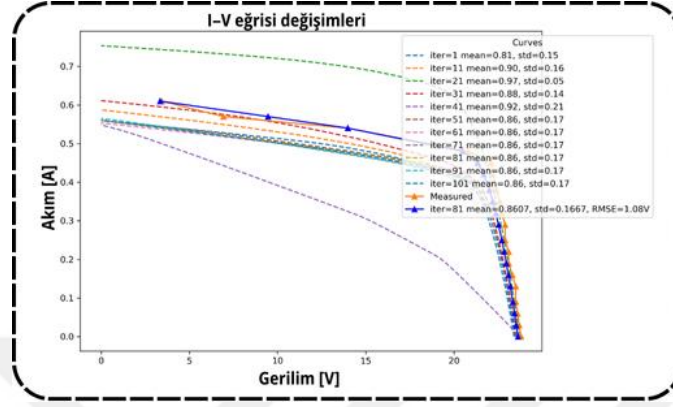
4.2.4 Optimizasyon Süreci ve Yakınsama

DOA, tanımlı arama uzayında Hata Kareleri Ortalamalarının Kökü (Root Mean Square Error – RMSE) değerini minimize etmek üzere uygulanmıştır. Şekil 4.13, iterasyonlar boyunca hatanın azalma eğilimini göstermektedir. Yakınsama sürecinde, algoritma her adımda TD parametrelerini güncelleyerek ölçülen eğriye en yakın simülasyonu elde etmiştir. Sonuç olarak, 81. iterasyonda $RMSE = 1.081 \text{ V}$ değeriyle optimum TD parametreleri belirlenmiştir.



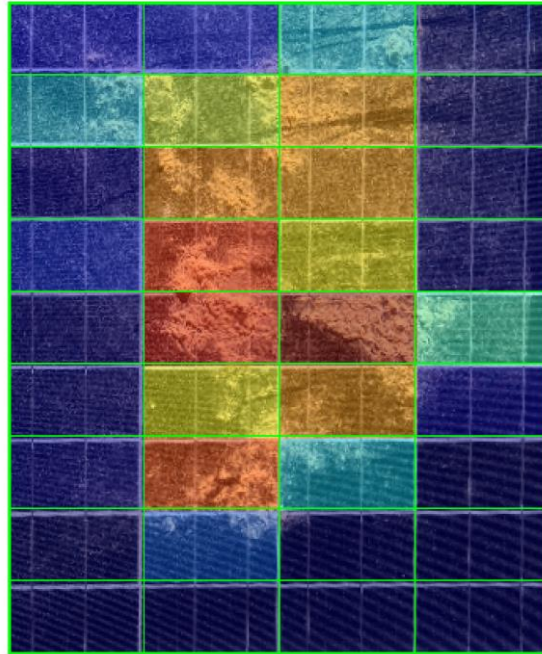
Şekil 4.13 Optimizasyon sürecinde hata ve çözüm değerlerinin değişimi.

İterasyon boyunca elde edilen I–V eğrilerinin evrimi Şekil 4.14’de gösterilmiştir. İlerleyen iterasyonlarla tahmin edilen eğrinin ölçülen eğriye yaklaştığı açıkça görülmektedir.



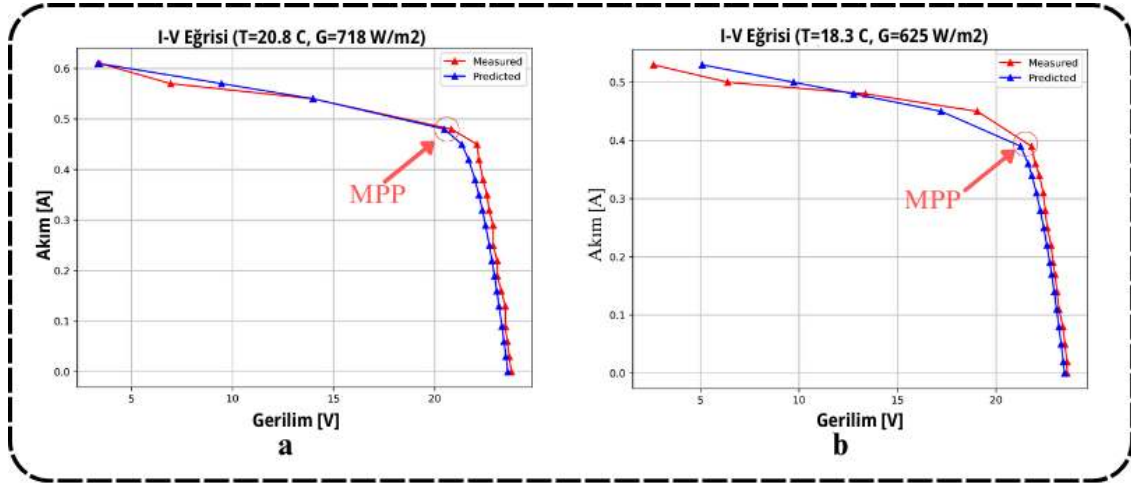
Şekil 4.14 Optimizasyon sürecinde iterasyon sayısına bağlı olarak I–V eğrisindeki değişimler ve elde edilen ara çözümler.

Optimizasyonla elde edilen hücre bazlı TD’nin konumsal dağılımı Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.15 Optimizasyon işlemiyle belirlenen geçirgenlik dağılımının hücre düzeyinde normalize edilmiş ısı haritası.

Optimizasyon tabanlı TD sonuçları, ECM ile ilişkilendirilmiştir. Bu dağılıma karşılık gelen ölçülen ve optimize edilmiş I–V eğrileri Şekil 4.16(a)’da, farklı koşullarda ($T = 18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 625\text{ W/m}^2$) tahmin edilen I–V eğrileri ise Şekil 4.16(b)’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Optimizasyon tabanlı model sonuçları: a) Ölçülen ve optimize edilen I-V grafikleri ($T = 20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 718\text{ W/m}^2$) b) Ölçülen ve tahmin edilen I-V grafikleri ($T = 18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 625\text{ W/m}^2$).

Her iki koşuldaki hata değerleri Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 Farklı koşullar altında çıkarılan eğriler için RMSE ve MPP farkları.

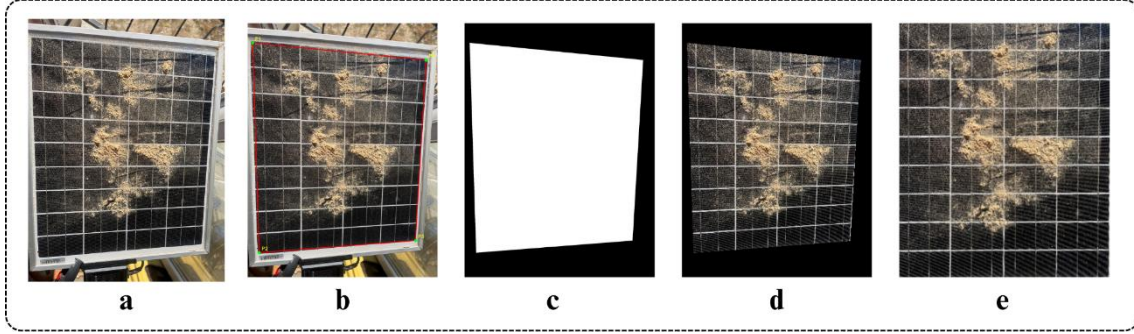
Koşul	RMSE [V]	Δ MPP [W]
Optimize edilen at $G = 718\text{ W/m}^2$, $T = 20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	1.6928	0.16
Tahmin edilen at $G = 625\text{ W/m}^2$, $T = 18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	1.0081	0.22

4.2.5 Görüntü İşleme ile Geçirgenlik Dağılımının Çıkarımı

Optimizasyondan elde edilen TD sonuçlarının doğrulanması amacıyla, aynı panelin görüntüsü işlenerek piksel tabanlı geçirgenlik dağılımı çıkarılmıştır. Bu süreç, panel görüntüsünden doğrudan TD haritası üretilmesi açısından özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

İlk olarak, panel sınırları tespit edilerek maskeleme yapılmış, ardından perspektif

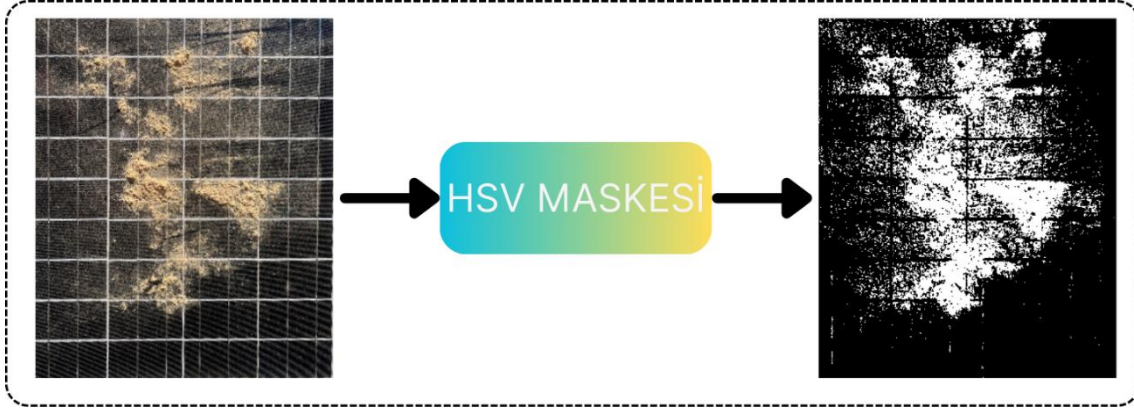
dönüşüm uygulanarak panelin orijinal boyutlarına dönüştürülmüştür. Dönüştürülen panel görüntüsü 9×4 ızgaraya bölünmüş ve her hücre, panelin bir alt bölgesi olarak kabul edilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 IP adımlarıyla elde edilen a) panel, b) köşe koordinatları, c) maske, d) maskelenmiş panel ve e) perspektif düzeltilmiş görüntüsü.

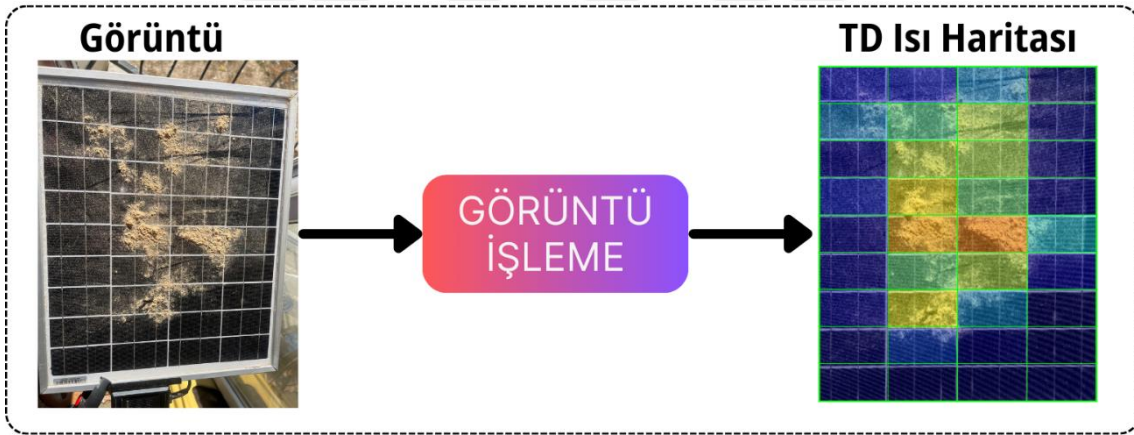
Panel sınırlarının tespit edilmesi için K-ortalamları yönteminden faydalanılmıştır. Algoritmanın daha hızlı çalışması için orijinal görüntü 0.25 oranında ölçeklendirilmiştir, Daha sonra HSV tabanında K-ortalamları ile 0.25 ölçekli görüntü üzerinde 4'lü kümeleme yapılarak en düşük yoğunluğa sahip grup panel yüzeyi olarak seçilmiştir. Bu özellik hem değişken aydınlatma koşullarında daha kararlı tespit hem de bu uygulama özelinde panel çerçevesinin maske dışında tutularak sadece yarı iletken yüzeye yoğunlaşılmasına olanak sağlamıştır. Morfolojik temizlik sonrası kontur analizi ile panelin köşe koordinatları (Şekil 4.15(b)) belirlenmiştir.

Daha sonra, HSV renk uzayında maskeleme yapılarak tozlu alanlar tespit edilmiştir. Bu aşamada toz piksellerine geçirgenlik katsayısı = 0, temiz bölgelere = 1 atanmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Perspektif dönüştürülmüş panel üzerinde HSV maskesiyle tozlu alanların çıkarımı.

HSV tabanlı maske sonrası, panel görüntüsü 9×4 ızgaraya göre hücre düzeyinde analiz edilmiştir. Her hücrede toz yoğunluğu oranı hesaplanmış, sonuçlar bir ısı haritası olarak görselleştirilmiştir (Şekil 4.19).

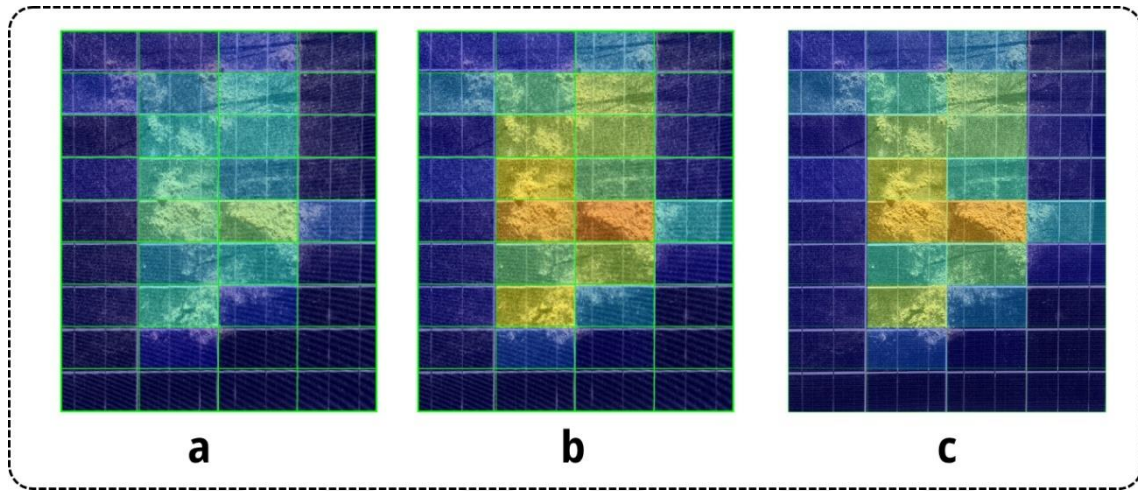


Şekil 4.19 Panelin görüntüsünde TD çıkarımı (9×4 ızgarada hücre düzeyinde toz yoğunluğu ısı haritası).

Bu iş akışı orijinal resim boyutunda daha yüksek çözünürlükte de denenmiştir. Bu yöntemlerde çıkarılan geçirgenlik dağılımı, TD optimizasyonundan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır:

- Optimizasyon tabanlı TD: $\mu = 0.8607$, $\sigma = 0.1667$
- IP tabanlı TD: $\mu = 0.7566$, $\sigma = 0.2421$ (0.25 ölçeklendirilmiş)
- IP tabanlı TD: $\mu = 0.7747$, $\sigma = 0.2232$ (Orijinal boyutta)

Bu durum yüksek çözünürlükte tozlu piksellerle temiz piksellerin daha iyi ayrışması ile görüntü boyutuna göre farklı ortalamalar çıkarılmıştır. Optimizasyon ile elde edilen sonuçlar ile farklılık ise panel sınırlarındaki eksiklikler, hücre ızgara dönüşümünde taşmalar ve hücre aralarındaki boşlukların yüzey alanına dahil edilmesi ile açıklanabilir. Görüntü işlemedeki geometri kullanılarak optimizasyon ile elde edilen TD ızgara görünümüne dönüştürülerek Şekil 4.20’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



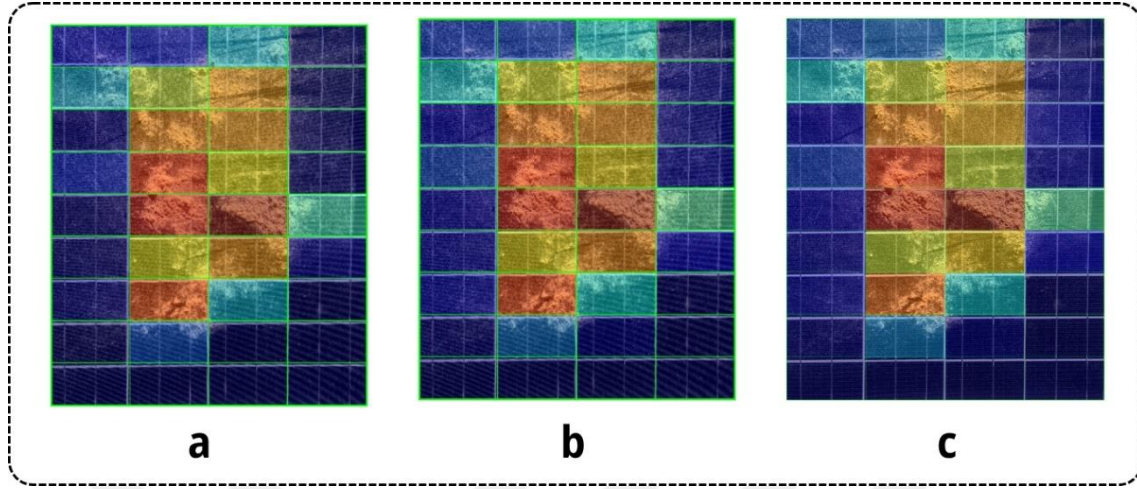
Şekil 4.20 a) optimizasyon, b) ölçekli IP, c) orijinal boyutta IP ile elde edilen TD ısı haritası.

TD istatistiklerindeki görülen farkın olası nedenleri:

- Tozlu piksellerin geçirgenlik katsayısının 0, temiz piksellerin 1 olarak tanımlanması, ara geçirgenlikteki alanları bastırmıştır.
- Hücre sınırlarındaki yansımalar bazı parlak alanların yanlışlıkla “tozlu” olarak sınıflandırılmasına neden olmuştur.
- Perspektif dönüşümdeki küçük geometrik kaymalar, ızgara hücrelerinin gerçek hücre sınırlarından kısmen farklılaşmasına yol açmıştır.
- Yoğun toz bulunan bölgelerde gölgeler HSV pikselleri filtre dışına çıkararak temiz alan olarak algılanmıştır.

Bu nedenle, IP tabanlı dağılım genel eğilimi doğru biçimde yansıtsa da, hücre bazında küçük sapmalar içermektedir. Buna rağmen, Şekil 4.21’de görüldüğü gibi yöntem saha koşullarında panel görüntüsünden doğrudan TD haritası çıkarılması açısından oldukça

kullanışlıdır.



Şekil 4.21 a) optimizasyon, b) ölçekli IP, c) orijinal boyutta IP ile elde edilen normalize edilmiş TD ısı haritası.

4.2.6 Sonuçların Karşılaştırılması

Bu sonuçlar, geliştirilen TD tabanlı modelin hem optimizasyon hem de görüntü tabanlı dağılımlarda panelin gerçek davranışını yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir. Model, kirlenmenin uzaysal dağılımının ölçüm yapılmaksızın görüntüden tahmin edilmesi ve bu dağılımın eşdeğer devre üzerinden gerçek zamanlı performans kestirimi için kullanılabileceğini doğrulamaktadır. Bu yöntem ile literatürdeki diğer kirlenme tespit yöntemlerinin karşılaştırmalı tablosu Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 PV kirlenmesinin tespitine yönelik literatür özeti ve bu çalışma ile karşılaştırma.

Çalışma	Yöntem	Panel Çıkış Gücü Belirleme Yöntemi	Temizlik Kararı	Eksiklikler / Sınırlılıklar
Veri Odaklı Yaklaşımlar				
Mutluer & Erat (2019)	Bulanık mantık tabanlı sensör füzyonu (güç + sıcaklık + toz + gölge)	Yok, Çevresel verilerle panel kirlilik tahmini	✓ Otomatik temizlik, panel kirli kararı ile	Çevresel koşullara duyarlı, Uniform varsayım, enerji farkındalığı yok
Kargacıoğlu (2018)	LDR sensörleri ile ışık şiddeti farkı tespiti	✓ LDR referansı ile verim kaybı tahmini	✓ Otomatik temizlik, eşik aşıldığında devreye giriyor	Sensörün de kirlenmesi, sıcaklık etkisi yok, Uniform varsayım, enerji farkındalığı yok

Çizelge 4.3 (Devam) PV kirlenmesinin tespitine yönelik literatür özeti ve bu çalışma ile karşılaştırma.

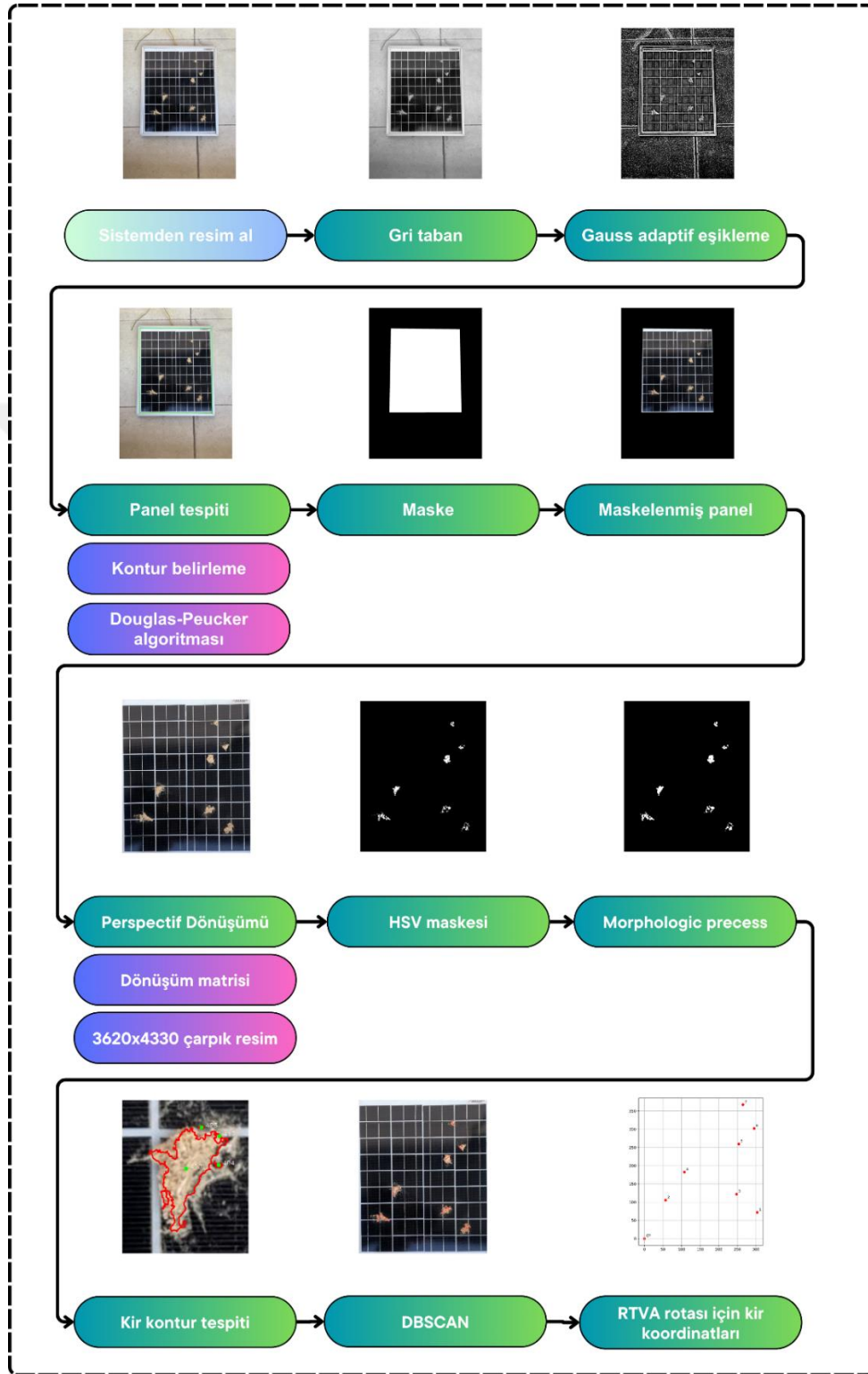
Çalışma	Yöntem	Panel Çıkış Gücü Belirleme Yöntemi	Temizlik Kararı	Eksiklikler / Sınırlılıklar
Veri Odaklı Yaklaşımlar				
Oufettoul vd. (2025)	Döner filmli kendi kendini temizleyen sistem (ASS verisi ile)	✓ Ares Kir İstesyonu verileri ile panel verimi	✓ Otomatik temizlik, eşik aşıldığında devreye giriyor	Uniform varsayım, enerji farkındalığı yok
Hossain vd. (2025)	ML tabanlı verim tahmini	✓ Çevresel verilerle panel verimi	✓ Otomatik temizlik, eşik aşıldığında devreye giriyor	Uniform varsayım, enerji farkındalığı yok
Javed vd. (2017)	ANN tabanlı Soiling Ratio (SR) indeksi	✓ Çevresel verilerden SR → güç kaybı	⚙️ Tespit [0-1] aralığında	Lokasyon bağımlı kalibrasyon gerekli
Costa Silva vd. (2023)	ML modelleri (LR, RF, DT, MLP, LSTM)	✓ Meteorolojik + operasyonel verilerle sürekli kirlenme oranı	⚙️ Tespit [0-1] aralığında	Saha kalibrasyonu zor, enerji farkı belirsiz
Hammad vd. (2018)	ANN ve Lineer Regresyon	✓ Toz ve sıcaklık bilgileri ile verim tahmini	✓ Optimum temizlik sıklığı belirlenmiş	Yalnızca verim tahmini, yüzey haritalama yok
Sensör Tabanlı Yaklaşımlar				
Borawake vd. (2025)	Optik partikül sensörü (toz sayıcı)	Yok	✓ Otomatik temizlik, toz tespit edildiğinde devreye giriyor	Panel çıkış gücü önemsiz, enerji farkındalığı yok
Kishor vd. (2025)	Optik toz sensörü	✓ Toz yoğunluğu ve sıcaklık ile, panel verimi korelasyonu	✓ Otomatik temizlik eşik değeri tabanlı + bakım tespiti	panel çıkış gücü eksik doğrulama
Valerino vd. (2020)	Mikroskopi + ağırlık ölçümü	✓ Toz ağırlığı → güç kaybı ilişkisi	⚙️ Tespit [0-1] aralığında	Mikroskobik, saha ölçeğinde yetersiz
Pulipaka vd. (2016)	NN + regresyon	✓ Parçacık boyutu → panel çıkış gücü tahmini	⚙️ Tespit [0-1] aralığında	Uniform dağılım varsayımı
Micheli vd. (2020)	Spektral optikler – dalga boyu analizi (spectrophotometer)	✓ Işık geçirgenliği spektrumları → soiling index	⚙️ Tespit [0-1] aralığında	Karmaşık kurulum, tekdüze katman varsayımı
Piedra vd. (2018)	Spectrophotometer (SSA + kütle)	✓ Spektral geçirgenlik kaybı	⚙️ Tespit [0-1] aralığında	Ölçeklenebilirlik sınırlı
Görüntü Tabanlı Yaklaşımlar				
Bkz. Çizelge 3.2	ML + DL sınıflandırıcıları	Yok,	⚙️ Kirli-Temiz sınıflandırması	Panel gücü veya enerji etkisi hesaplanmaz
Abuqaoud & Ferrah (2020)	HSV renk uzayında IP	Yok	⚙️ Kirli-Temiz sınıflandırması	Enerji analizi eksik
Ünlütürk (2019)	GLCM + YSA (deneysel)	Yok	⚙️ Kirli-Temiz sınıflandırması	Gerçek ortam validasyonu yok

Çizelge 4.3 (Devam) PV kirlenmesinin tespitine yönelik literatür özeti ve bu çalışma ile karşılaştırma.

Çalışma	Yöntem	Panel Çıkış Gücü Belirleme Yöntemi	Temizlik Kararı	Eksiklikler / Sınırlılıklar
Veri Odaklı Yaklaşımlar				
Pivem vd. (2019)	RGB histogram + segmentasyon	Yok	⚙️ Histogram analizi ile kirlilik sınıflandırması	Enerji bağlantısı yok, yalnızca renk farkı
Hwang vd. (2023)	İstatistiksel sınıflandırma (temiz-az-çok kirli)	Yok, Görüntü istatistiği	⚙️ Kirlili-Temiz sınıflandırması	Enerji ilişkisi kısıtlı
Perarasi vd. (2021)	IP + motorlu silecek	Yok, Renk değişiminden kir tespiti	✅ Otomatik temizlik, toz tespit edildiğinde	Enerji farkı ve maliyet analizi yok
Singh & Chandra (2023)	DL + HBBHO	⚙️ Kısmen, toz varlığı, yoğunluğu üretim kayıpları ilişkisi	✅ Temizlik takvimi	Model karmaşıklığı yüksek, veri setleri ile saha doğrulaması yok
Aashika vd. (2020)	Dron görüntüsü + desen eşleştirme	✅ Akım, gerilim, eşik değeri ile dron aktivasyonu	⚙️ Tespit kirliliğin konumuna odaklanır	Görsel doğruluk yüksek, enerji hesabı zayıf
El Gallassi vd. (2023)	Gece backscatter görüntüleme + HSV renk uzayı	✅ Aynalardan saçılan ışığın parlaklığı ile temizlik indexi korelasyonu	⚙️ Tespit [0-1] aralığında	CSP odaklı, PV uyarlanabilirliği düşük
Fan vd. (2016, 2022)	Görüntü iyileştirme + HSV analizi	✅ Geçirgenlik → toz yoğunluğu korelasyonu	⚙️ Geçirgenlik tahmini	Işık değişiminden etkilenir, genelleme zayıf
Simonazzi vd. (2020)	Akıllı kirlenme sensörü (Camera + I-V)	✅ Hibrit (optik + elektrik) ölçüm	⚙️ Tespit	Kalibrasyon gerektirir, uniform I-V eğrisi
Bu Çalışma	Hafif IP + DBSCAN + TD optimizasyonu + RTVA + Karar Mekanizması	✅ Hem Görüntüden hem de I-V eğrisinden geçirgenlik dağılımı → eşdeğer devre → panel gücü tahmini	✅ Dinamik enerji farkındalıklı otomatik karar	Diğerlerinden farklı olarak hem konumsal hem enerji bazlı tespit sağlar; büyük ölçeklerde ek optimizasyon gerekebilir

Abraim vd. (2023) yaptığı çalışmada, kirlenme indeksini kirli panelin kısa devre akımına oranlayarak, Hossain vd. (2025) ise panelin çıkış gücünü sabit FF ile kısa devre akımı ve açık devre gerilimi üzerinden hesaplamıştır. Bu bölümdeki bulgular bu yaklaşımların özellikle non-uniform kirlilik durumunda kayıp, verim gibi parametreleri tanımlamakta yetersiz olduğunu göstermektedir.

4.3 RTVA Yöntemi ile Optimize Edilmiş Enerji Sarfıyatı (CC)



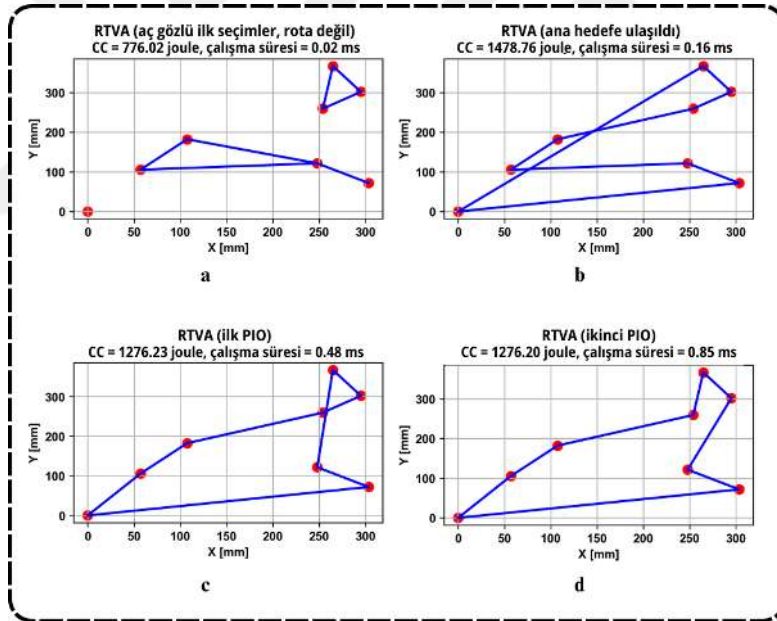
Şekil 4.22 Kirlenme tespiti için sıralı IP aşamaları (ön işleme → panel sınırı/maskeleme → perspektif düzeltme → HSV tabanlı maskeleme → koordinat çıkarımı).

4.3.1 Görüntü İşleme Hattı ile Kirli Dügümlerin Çıkarılması

Önerilen IP hattı ve RTVA ile entegre edilmiş otonom panel temizleme sistemi, gerçek panel görüntüleri üzerinde yürütülen deneylerle değerlendirilmiştir. IP hattı, kirlenmiş bölgelerin koordinatlarını başarılı şekilde çıkarmış; her bir adımın ara çıktıları sırasıyla Şekil 4.22’de sunulmuştur.

4.3.2 RTVA ile Rota Optimizasyonu

Kirlenmiş koordinatlar belirlendikten sonra, rota planlama aşaması RTVA ile yürütülmüştür. Şekil 4.23, güzergâhın kademeli olarak nasıl inşa edildiğini ve doğrulandığını göstermektedir:



Şekil 4.23 RTVA rota oluşumu ve optimizasyon evreleri: (a) Açgözlü (Greedy) seçimler; (b) Ana hedef (alt-hedef-1 ile aynı anda); (c) PIO ilk düzeltme; (d) Alt-hedef-2 (kesişimsiz tur).

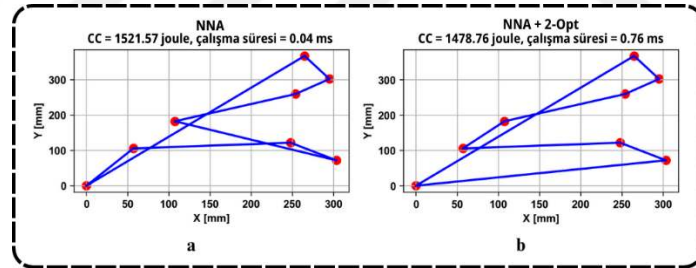
- (a) açgözlü (greedy) başlangıç seçimleriyle ham yol kümesinin oluşturulması,
- (b) ana hedefin sağlanması (V vektörü: uç düğümler 1, ara düğümler 2 derece) — bu örnekte alt-hedef-1 (tek kapalı döngü) de eşzamanlı oluşmuştur,
- (c) PIO’nun başlatılması ve kesişimlerin düzeltilmesi,

(d) alt-hedef-2'nin tamamlanmasıyla kesişimsiz, pürüzsüz tekil turun elde edilmesi. RTVA'nın ikinci aşaması olan PIO, kesişen kenarların neden olduğu alt-optimal segmentleri sistematik biçimde elimine ederek gereksiz tekrarları azaltmış ve güzergâhı enerji açısından daha verimli hâle getirmiştir (bkz. Şekil 4.23 c–d).

Bu iki aşamalı iş akışı, yalnızca IP'ye dayalı başlangıç rotasına kıyasla temizlik enerjisinde ve toplam sürede %19 azalma sağlamıştır. Klasik TSP çözümleri ile karşılaştırmalı analiz Çizelge 4.4'te verilmiştir:

Çizelge 4.4 Rota optimizasyonunun geleneksel optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırmalı performansı.

Algoritma	Temizlik Enerji Tüketimi [J]	İyileşme Yüzdesi	Çalışma Süresi [ms]
IP tabanlı rota	1561	-	
NNA	1521	%3	0.04
NNA + 2-Opt	1478	%6	0.76
RTVA	1267	%19	0.85



Şekil 4.24 Rota verimliliğinin görsel karşılaştırması: (a) NNA ve (b) NNA + 2-Opt.

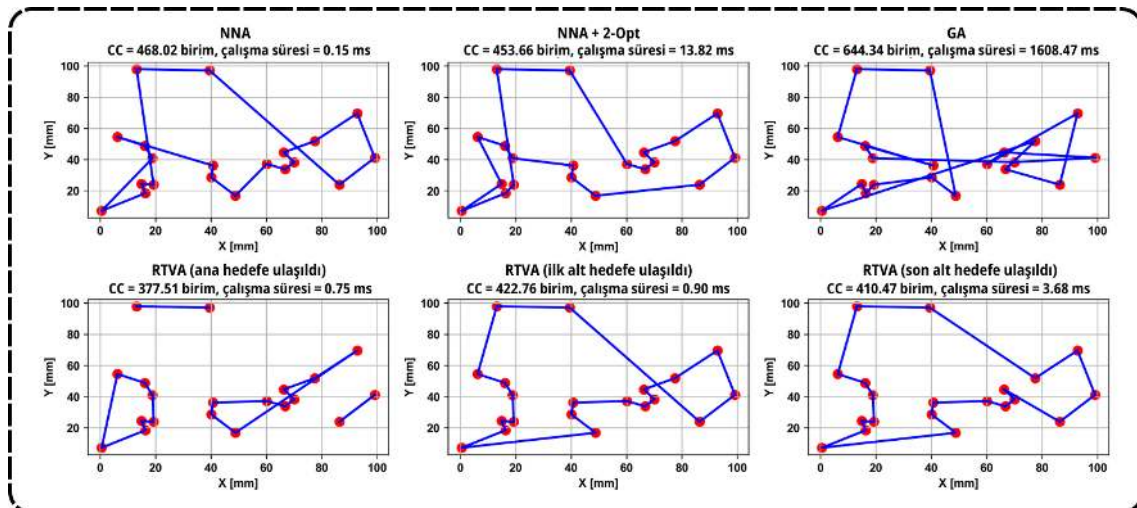
Görüldüğü üzere, En Yakın Komşuluk Algoritması (Nearest Neighbor Algorithm – NNA) hız avantajına karşın açgözlü doğası nedeniyle yerel minimumlara sıkça takılır (Delévacq vd. 2013), 2-OPT başlangıç rotasını iyileştirir ancak etkisi başlangıç kalitesiyle sınırlıdır. RTVA ise doğrulama kurallarını rota inşasına en baştan entegre ederek verimsiz kenarların oluşmasını proaktif biçimde engeller; böylece sonradan düzeltim yerine baştan etkili rota üretir. Bu üstünlük Şekil 4.24'de görsel olarak da açıktır; burada (a) NNA ve (b) NNA + 2-OPT tarafından oluşturulan rotalarda görülen alt-optimal kesişmeler ve daha uzun yollar, RTVA çözümüne kıyasla açıkça fark edilmektedir.

Deney sırasında ölçülen enerji değerleri (IP-sonrası/NNA/NNA+2-Opt/RTVA için 1605/1542/1490/1283 J) ile hesaplananlar arasındaki küçük farklar, şebeke kaynaklı gerilim dalgalanmaları ve kirli noktadaki beklemelerden kaynaklanmıştır.

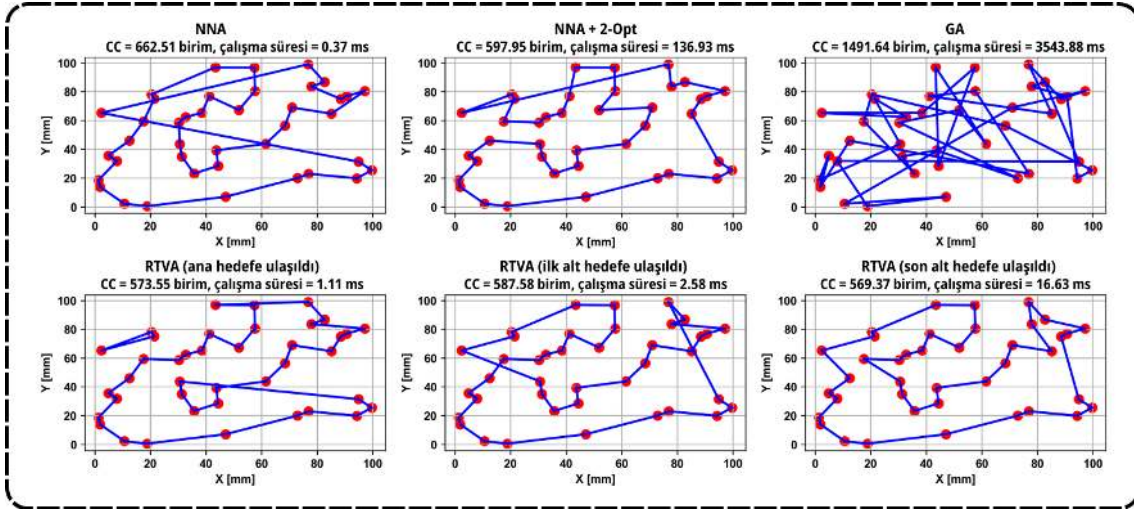
4.3.3 Ölçeklenebilirlik ve Çok Senaryolu Performans Analizi

RTVA'nın ölçeklenebilirliğini ve sağlamlığını değerlendirmek için, sentetik kirlenme senaryolarından oluşan 20, 40, 100 ve 250 düğümlü dört veri kümesi üzerinde testler yapılmıştır. Her veri kümesi altı algoritma ile optimize edilmiştir: RTVA, NNA, NNA + 2-Opt, GA, PSO, ACO. Büyük ölçekli karşılaştırmalarda maliyet, fırça hareket enerjisini temsil eden Öklidyen uzaklık (toplam rota uzunluğu) olarak tanımlanmıştır; böylece rota maliyeti (CC) doğrudan toplam enerjiyle orantılanmıştır.

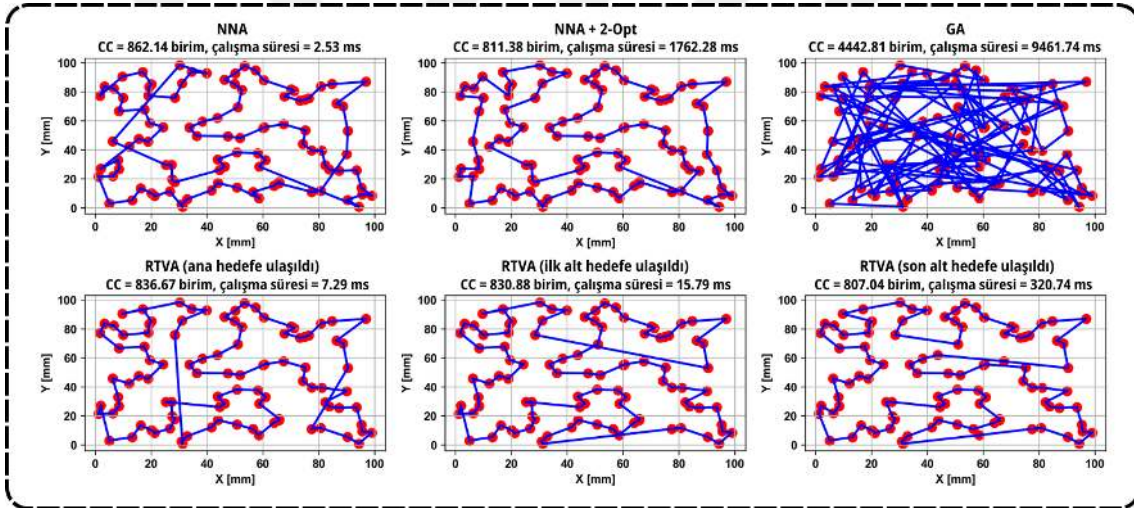
Şekil 4.25–4.28, 20/40/100/250 düğüm senaryolarında üretilen rotaları yan yana göstermektedir. Her bir şekil, sırasıyla şu alt grafikleri içerir: NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2). Bu şekillerde, GA sonuçları meta-sezgisellerin tipik stokastik değişkenliğini sergilerken, RTVA aşamaları olarak sırası ile aç gözlü başlangıçtan doğrulanmış ve kesişimsiz tura kadar deterministik bir yakınsama görülmektedir.



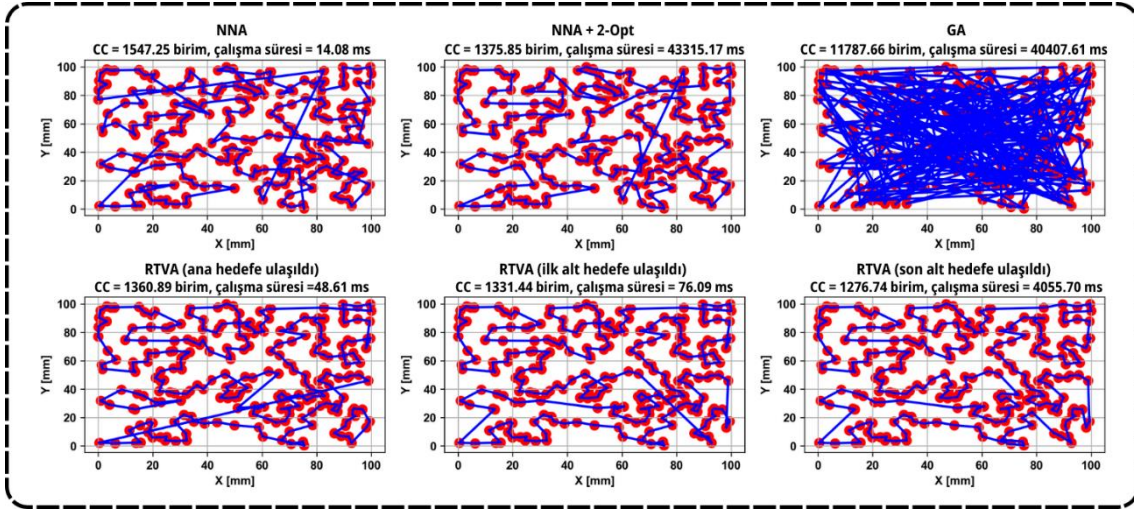
Şekil 4.25 20 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2)).



Şekil 4.26 40 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2)).



Şekil 4.27 100 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2)).



Şekil 4.28 250 düğüm senaryosu için optimize edilmiş rotalar (NNA, NNA + 2-Opt, GA (ilk deneme), RTVA (ana hedef), RTVA (alt-hedef-1), RTVA (alt-hedef-2)).

Meta-sezgiseller için kullanılan parametreler (büyük düğüm sayılarında kararlılık ve yakınsama için önden ayarlandı): GA – popülasyon = 100, iterasyon = 300; PSO – popülasyon = 50, iterasyon = 300; ACO – popülasyon = 20, iterasyon = 100. Düşük popülasyon/iterasyonlar yüksek boyutta erken duraksama ürettiğinden tercih edilmedi. Bu kurulum, yöntemler arası adil ve tekrarlanabilir bir karşılaştırma sağlamaktadır.

Değerlendirme ve karmaşıklık:

- RTVA'nın çalışma süresi, düğüm sayısına göre yaklaşık $O(n^2)$ büyüme sergilemiştir. NNA ile benzer düzende, NNA+2-Opt ise ikili kenar değiştirme yinelemeleri nedeniyle pratikte $O(n^2 \cdot k)$ davranışı göstermiştir.
- GA/PSO/ACO gibi meta-sezgiseller, popülasyon/iterasyon yapılarına bağlı olarak kübik-dördüncü dereceden büyüme eğilimleri sergiler. Büyük düğüm sayılarında yakınsamayı güvenceye almak için artırılan parametreler, stokastik değişkenliği de büyütürken verilen süre sınırları içinde alt-optimal sonuçlara yol açabilmektedir.
- RTVA, kural tabanlı budama + rekürsif doğrulama ile arama uzayını erken safhada daraltıp 2-Opt'tan daha hızlı ve istikrarlı yakınsama göstermiş; bu nedenle gömülü/gerçek zamanlı uygulamalar için deterministik zamanlama ve hesap yükü açısından elverişlidir.

Toplam çalışma süreleri ve rota maliyetleri Çizelge 4.5’te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5 Farklı düğüm ölçeklerinde RTVA ve karşılaştırmalı yöntemlerin performansı.

Algoritma	Düğüm Sayısı	Tekrar Adeti	Çalışma Süresi [ms] (Ort.)	Rota Maliyeti [birim]		
				Min.	Maks.	Ort.
NNA	20	1	0.15	-	-	468.02
	40	1	0.37	-	-	662.51
	100	1	2.53	-	-	862.14
	250	1	14.08	-	-	1547.25
NNA + 2Opt	20	1	13.82	-	-	453.66
	40	1	136.93	-	-	597.95
	100	1	1762.28	-	-	811.38
	250	1	43315.17	-	-	1375.85
ACO	20	10	3264.77	400.85	401.74	401.74
	40	10	7736.28	545.59	569.32	559.11
	100	10	29021	799.87	815.89	808.33
	250	10	129853	1332.06	1380.15	1357.21
PSO	20	10	319.71	593.77	711.54	670.34
	40	10	445.60	1512.72	1622.88	1571.70
	100	10	990.56	4472.59	4650.49	4583.75
	250	10	2350.65	11702.3	12258.23	12095.68
GA	20	10	2060.50	568.66	644.35	611.40
	40	10	3734.32	1435.92	1513.22	1467.36
	100	10	11466	4220.08	4401.46	4320.62
	250	10	50619	11440.7	11806.06	11692.27
RTVA	20	1	3.68	-	-	410.47
	40	1	16.63	-	-	569.37
	100	1	320.74	-	-	807.04
	250	1	4055.70	-	-	1276.74

4.3.4 RTVA Genel Performans Değerlendirmesi

TSP algoritmalarında, yakınsama hızı en az çözüm doğruluğu kadar önemlidir. GA ile NNA arasındaki karşılaştırmalarda, GA’nın büyük ölçekli problemlerde daha etkili

ancak daha yavaş; NNA'nın ise küçük ölçekli problemlerde daha hızlı ve kararlı olduğu görülmüştür (Alslibi vd. 2012).

NNA'nın açgözlü doğası, her adımda en kısa mesafeyi seçmesi nedeniyle yerel minimumlara takılmasına yol açabilir; bu durumu azaltmak için literatürde çeşitli iyileştirmeler önerilmiştir (Ziaur vd. 2024, Islam vd. 2018, Hore vd. 2018, Yong vd. 2010). Açgözlü algoritmalar kısa sürede sonuç verse de, ileri adımlarda daha iyi rotaları kaçırmaya riski taşır.

RTVA, geleneksel grafik tabanlı ve sezgisel algoritmalarla bazı yapısal benzerlikler taşısa da, temel hedefleri ve çalışma biçimi açısından farklılaşmaktadır. Başlangıç aşamasında RTVA, MST algoritmasına benzer şekilde $n-1$ minimum maliyetli kenarı hızla seçer; ancak Prim veya Kruskal algoritmalarının aksine bu aşamada bağlantı veya çevrim kısıtlarını zorunlu tutmaz. Ardından, yinelemeli tablo doğrulama ve alt-hedef (sub-goal) kontrolleriyle bu ön seçimleri doğrular ve geçerli bir TSP rotasına dönüştürür.

MST algoritmaları esas olarak bağlantı optimizasyonu için tasarlanmıştır ve gezgin rota oluşturmaz. Prim yöntemi, açgözlü doğası itibarıyla NNA algoritmasına benzer biçimde, bağlı-bağılantısız düğümleri değerlendirerek bağlantı kurar fakat ziyaret sırası üretmez. Kruskal yaklaşımı ise tüm kenarları sıralayıp döngü oluşumunu önler, ancak tam tur üretme kabiliyetine sahip değildir.

RTVA'nın alt modülü olan PIO, 2-OPT ve Tabu Arama algoritmalarıyla kıyaslanabilir. 2-OPT, ikili kenar değişimi ile kesişimleri ortadan kaldırmaya çalışır; ancak iyileştirme bulunmadığında sonlanır ve her zaman tam kesişimsiz bir rota garanti etmez. Tabu Arama ise yakın çözümleri keşfetmek için önceki rotaları yasaklar (tabu listesi), bu da hesaplama yükünü artırarak gömülü sistemlerde kullanımı zorlaştırır. Buna karşın RTVA-PIO, yinelemeli inşa sürecinde bellek yapısına veya komşuluk taramasına gerek kalmadan deterministik biçimde kesişimleri önler.

Aşağıda, mevcut optimizasyon algoritmalarının temel özellikleri ve RTVA ile

karşılaştırmaları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Mevcut optimizasyon algoritmalarının temel özelliklerinin karşılaştırılması.

Algoritma	Ana Odak	Kesişim Öleme	Çalışma Süresi	Benzerlik	Kısıt / Zayıf Yön
MST (Croes 1958)	Küresel bağlantı sağlama	Kısmi (ancak tam tur oluşturmaz)	Düşük	Kenar seçimi	Yalnızca bağlantı sağlar, TSP rotası oluşturmaz
NNA (Alslibi vd. 2012)	Düğüm sırası seçimi	✗	Düşük	Turnuva seçimi	Başlangıç yoluna bağımlı; yerel minimumlar
2-OPT (Croes 1958)	Yerel kenar değişimiyle iyileştirme	Kısmi	Orta	PIO’ya benzer	Tüm kesişimleri önleyemez
Tabu (Knox 1994)	Yasak bellekli yinelemeli arama	Kısmi	Yüksek	Kurallar ve tabu listesi	Yüksek işlem ve bellek maliyeti; gömülü sistemler✗
Meta-sezgisel (Gutin ve Karapetyan 2010, Zhong vd. 2018, Toaza 2023)	Popülasyon tabanlı düğüm sırası optimizasyonu	✗	Yüksek	✗	Çok sayıda iterasyon gerektirir
RTVA (bu çalışma)	Kural tabanlı, hedef odaklı kenar seçimi	✓	Orta–Düşük	✓	Yürütme süresi, problem (PIO) geometrisine bağlı olarak değişebilir

Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) gibi meta-sezgisel yöntemler, geniş bir rota permütasyonu uzayını tarayarak optimuma yakın çözümler üretir; ancak bu süreç yüksek işlem maliyeti doğurur. RTVA, kural tabanlı gruplama ve doğrulama aşamaları sayesinde arama uzayının gereksiz bölümlerini budayarak yakınsama hızını önemli ölçüde artırır. Ayrıca, pekiştirmeli öğrenme tabanlı yönlendirme yöntemleri etkili rota politikaları üretebilse de, önceden eğitim gerektirir. Bu durum, IP tabanlı anlık kirlenme tespiti veya donanım kısıtlı sistemlerde uygulanabilirliğini sınırlar.

4.4 Karar Verme Mekanizmasının Test Edilmesi

Bu bölümde, Bölüm 3.1.2’de açıklanan karar verme mekanizmasının doğruluğu ve etkinliği deneysel olarak test edilmiştir. Bunun için her biri 25 W gücünde üç adet

monokristal panel kullanılarak bir senaryo oluşturulmuştur. Deneyler, 09–13 Nisan 2024 tarihleri arasında gerçekleştirilmiş ve panellerin çıkış güçleri belirli aralıklarla ölçülmüştür.

Test düzeneğinde:

- 1. panel referans olarak sürekli temiz tutulmuştur.
- 2. panel, sistem tarafından otomatik karar mekanizmasıyla (Bölüm 3.1.2’de verilen algoritma) belirlenen zamanlarda temizlenmiştir.
- 3. panel ise periyodik temizlik planına göre dört günün sonunda temizlenmiştir.

4.4.1 Güneş Işınımı Tahmini ve Meteorolojik Tahminler

Bu çalışmada, temizlik karar mekanizmasının geleceğe yönelik enerji kaybı tahminlerini gerçekleştirebilmesi için güneş ışınımının kısa dönemli tahmini yapılmıştır. Tahminlerde, Doğrusal Tahmin Filtreleri (Linear Prediction Filter – LPF) yaklaşımı kullanılmış olup, modelleme için Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan 2021 yılına ait saatlik güneş ışınımı ve sıcaklık verileri kullanılmıştır (Şekil 4.29).

LPF yaklaşımı, ilk kez Hoccoğlu vd. (2008) tarafından güneş ışınımı tahmininde kullanılması önerilen ve sinyal işlemeye dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, filtre katsayıları belirli bir şablon üzerinden veri üzerinde gezdirilerek optimize edilir. Model performansı aşağıdaki değerlendirme ölçütleri ile analiz edilmiştir:

- Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error – MAPE): Yüzdelik hata oranını verir.
- Determinasyon Katsayısı (R^2): Modelin açıklayıcılık derecesini gösterir.
- Ortalama Sapma Hatası (Mean Bias Error – MBE): Modelin ortalama yanlılık hatasını gösterir.

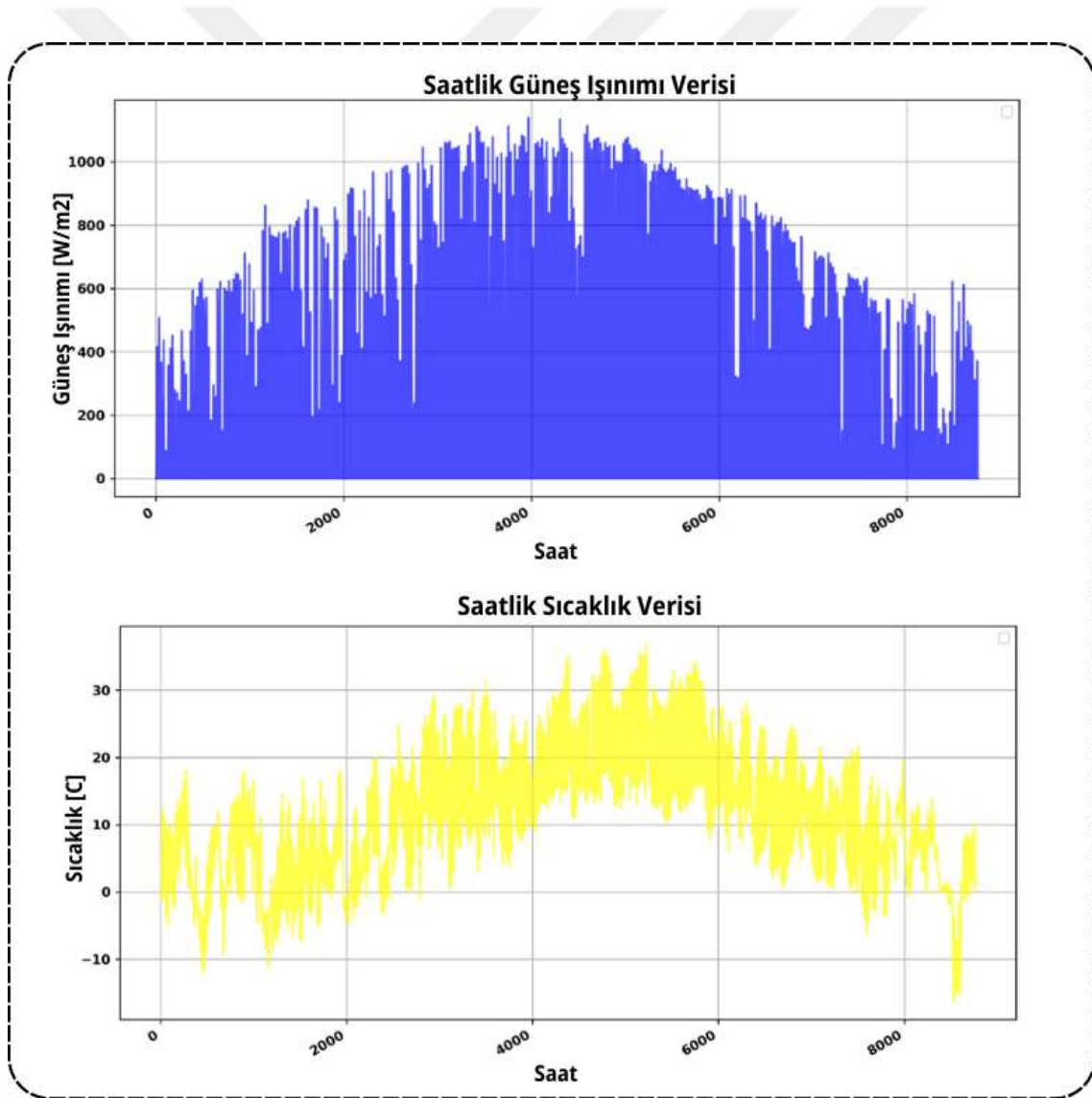
Model değerlendirme kriterleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100 \quad (38)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{l=1}^n (y_l - \hat{y}_l)^2}{\sum_{l=1}^n (y_l - \text{mean}(y))^2} \quad (39)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i \quad (40)$$

Burada y_i ölçülen değerleri, $\hat{y}_i$ tahmin edilen değerleri, n ise veri sayısını ifade eder.

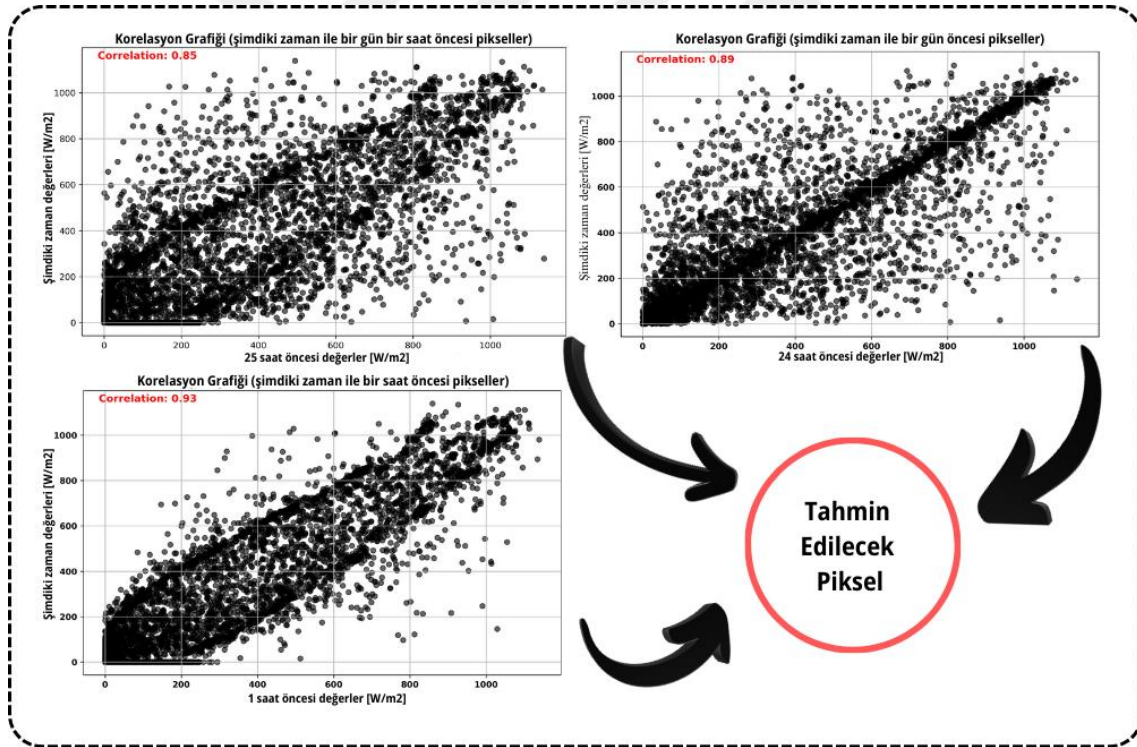


Şekil 4.29 Saatlik güneş ışınlımı ve sıcaklık verilerinin zaman serisi gösterimi.

Şekil 4.30'de yıllık güneş ışıınımı verisinin komşu zaman noktalarıyla korelasyon grafikleri yer almaktadır. İnceleme sonucunda:

- En yüksek korelasyon t ve $t-1$ saatleri arasında elde edilmiştir.
- İkinci en yüksek korelasyon t ile $t-24$ arasındadır; bu durum gün boyu ışıınım deseninin günlük tekrarından kaynaklanmaktadır.
- $t-25$ verisi daha düşük korelasyon göstermesine rağmen yine belirgin bir yığılma sergilemektedir.

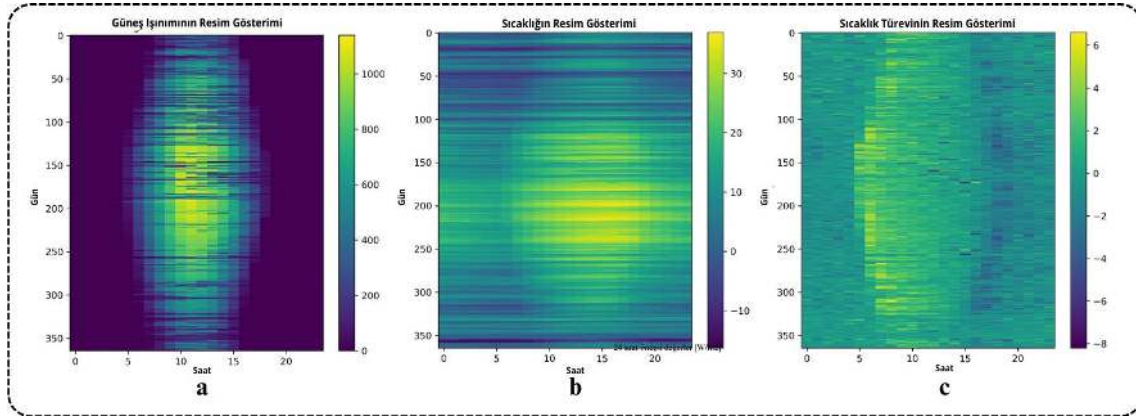
Bu gözlemler doğrultusunda, farklı filtre şablonları oluşturulmuş ve özellikle $t-1$, $t-24$ ve türevsel sıcaklık bileşenlerinin birlikte kullanıldığı şablonların daha başarılı tahminler ürettiği görülmüştür.



Şekil 4.30 Komşu piksel korelasyon grafikleri.

Şekil 4.31(a), güneş ışıınımının günün saatine ve yılın mevsimine göre değişimini göstermektedir. Sarı ve açık tonlar yüksek ışıınım değerlerini temsil ederken, bu bölgelerin özellikle öğle saatlerinde yoğunlaştığı, yaz aylarında ise çok daha belirgin

hale geldiği görülmektedir. Bu durum, güneş ışıınının hem gün içi hem de mevsimsel döngüye bağlı olarak düzenli bir değişim gösterdiğini teyit etmektedir. Şekil 4.31(b), sıcaklık değerlerinin gün içi ve yıl boyunca dağılımını göstermektedir. Yaz aylarında görülen yoğun sarı bölgeler, kış aylarında görülen koyu tonlar görülmektedir. Sıcaklığın ışıının ile benzer bir desen göstermesi, bu iki değişken arasındaki güçlü korelasyonu desteklemektedir. Şekil 4.31(c), sıcaklık verisinin türevinin iki boyutlu gösterimini sunmaktadır. Hava sıcaklığı, güneş ışıınınının etkisiyle belirli bir gecikmeyle artış ve azalış gösterir. Bu nedenle sıcaklığın doğrudan kendisi yerine türevi, ışıınınındaki ani değişimleri çok daha iyi yansıtır.



Şekil 4.31 (a) Işıının verisinin (b) Sıcaklık verisinin (c) Sıcaklık türevinin iki boyutlu resim olarak temsili.

Çok boyutlu tahmin filtreleri ise (Akarslan & Hoccoğlu, 2016) tahminlerde diğer meteorolojik verilerin de etkinliğini kanıtlamıştır. 2-D LPF uygulamasında ışıının verisi iki boyutlu bir matris (resim) biçimine dönüştürülerek filtre şablonuna göre modeli sağlayan optimum katsayılar bulunur. Sıcaklık verisinin türevi ise, ışıının değişimini daha iyi temsil ettiği için modele girdi olarak eklenmiştir (Şekil 4.31 c).

LPF katsayılarının belirlenmesinde, literatürde önerilen doğadan esinli optimizasyon algoritmalarından:

- Yusufçuk Optimizasyon Algoritması (Dragonfly Optimization Algorithm – DOA)
- Geyik Avı Algoritması (Deer Hunting Algorithm – DHA)

- Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing – SA)

kullanılmış ve her biri 20 kez çalıştırılarak karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen verinin bir saat öncesi, bir gün öncesi ve bir gün bir saat öncesi katsayılarını içeren filtre şablonu ile sıcaklık verisinin türevinin kullanıldığı durumda olduğu görülmüştür.

Amaç fonksiyonu olarak RMSE kullanılmış olup:

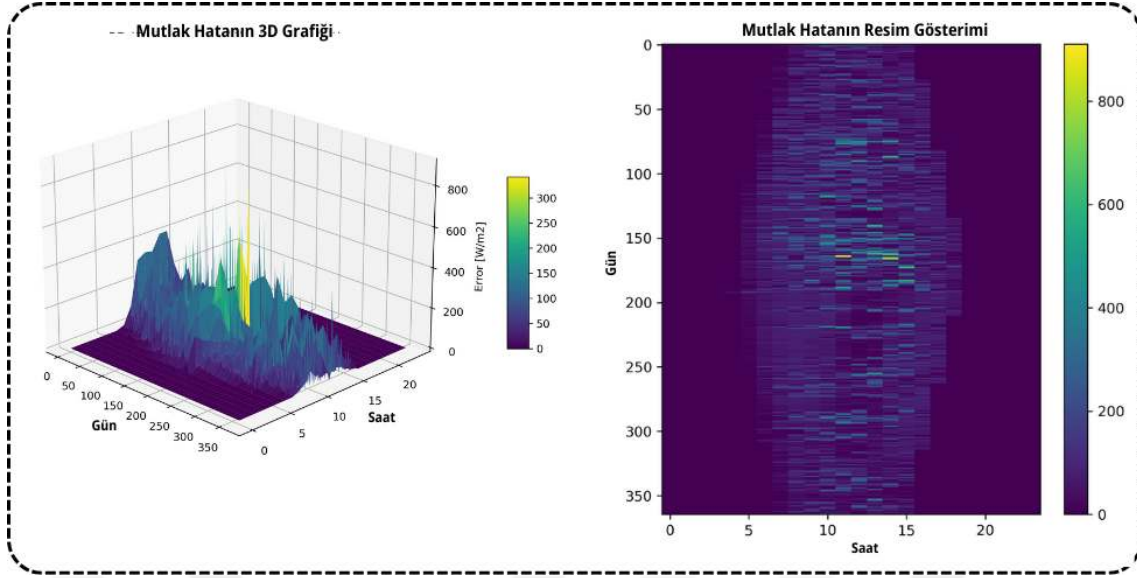
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n (y_l - \hat{y}_l)^2} \quad (41)$$

Elde edilen performans karşılaştırması Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Meta-Sezgisel algoritmalarla göre LPF performansları.

Kriter [W/m ²]	DOA	DHA	SA
<i>R²</i>	0.9187	0.9158	0.8961
<i>MAPE</i>	50.49	44.83	63.43
<i>RMSE</i>	83.54	85.21	95.13
<i>MBE</i>	-3.42	-0.14	-6.01

DOA yapısı itibari ile çok boyutlu optimizasyon problemlerinde düşmandan kaçış yemeğe yönelme gibi davranışlarla ısıtım verisinin zaman-mekânsal değişimlerini daha iyi yakaladığı ve en iyi sonuçları ürettiği görülmüştür. En iyi model ile yapılan tahmin hatasının 2 ve 3 boyutlu gösterimi Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32 DOA algoritması ile elde edilen en iyi RMSE değerine ait hata yüzey grafikleri.

Önerilen hibrit LPF modeli, literatürde yer alan diğer kısa dönem ışıınım tahmin yöntemleri ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.8). Özellikle düşük ortalama mutlak hata değeri gelecek zaman tahminlerinde kümülatif yaklaşımlara kolaylık sağlar.

Çizelge 4.8 Mevcut çalışmalar ile LPF'nin performans karşılaştırması.

Yazar	Model	Lokasyon	Performans
Bu çalışma	Hibrit- LPF	Türkiye (Afyonkarahisar)	RMSE = 83.54W/m ² MBE = -3.42W/m ² MBE = -0.14 W/m ² (DHA)
Bae vd. (2016)	NAR	Güney Kore (Yuseong-gu, Daejeon)	RMSE = 111.41 W/m ² R = 0.7912
Yu vd. (2019)	SVR	USA (Hawaii)	RMSE = 144.43 W/m ² MAE = 96.25 W/m ² R = 0.75
Obiora vd. (2023)	LR	Güney Afrika (Limpopo)	RMSE = 146.62 W/m ²

DHA ile elde edilen MABE değeri 0.14 W/m² olup, modelin yanlılığının oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen yöntemle günlük bazda yüksek doğruluklu ışıınım tahmini yapılabileceğini ve temizlik karar mekanizmasının geleceğe dönük enerji kaybı hesaplamalarına güçlü bir temel sağladığını göstermektedir.

4.4.2 Test Düzenğinde Yapılan Ölçümler

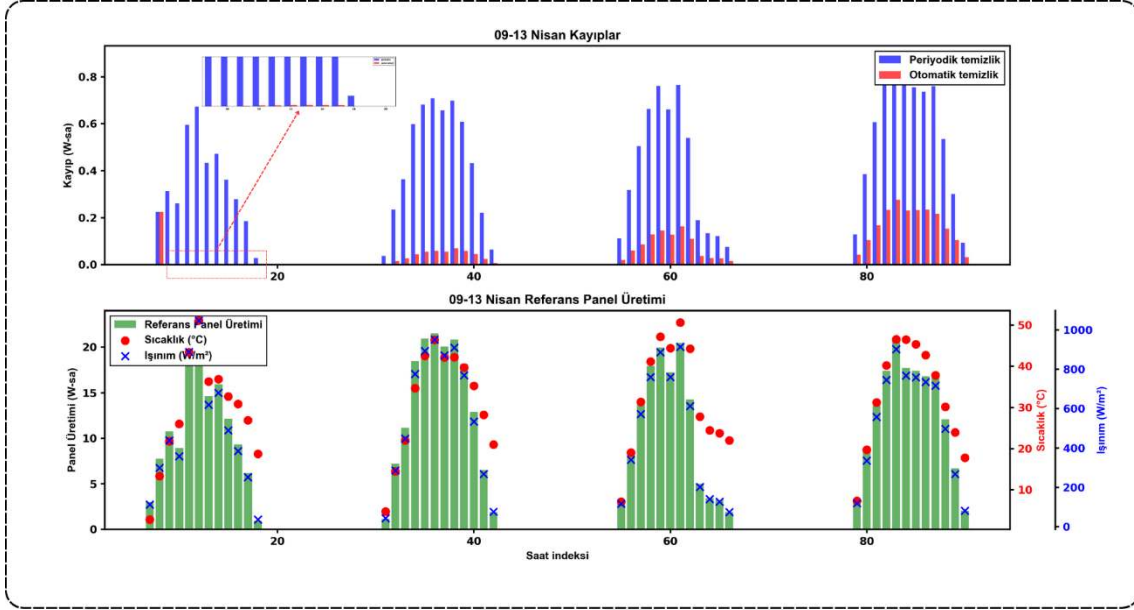
Her iki panel başlangıçta temizlenmiş, ardından aynı ortam koşullarında aynı kirlenmeye maruz bırakılmıştır. Başlangıç verim kaybı %2.86 olarak ölçülmüş, diğer ölçümler (ışınım, sıcaklık ve üretim değerleri) Şekil 4.33'te sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre:

- Planlı temizlik yapılan panelin toplam üretim kaybı 20.71 W-sa olmuştur.
- Karar mekanizmasıyla temizlenen panelin kaybı yalnızca 3.59 W-sa olarak ölçülmüştür.

Temizleme işlemi sırasında harcanan enerji 5.42 W-sa olup, bu değer dikkate alındığında 11.70 W-sa'lık net enerji kazancı elde edilmiştir. Bu senaryoda karar başlangıçta manuel verilmiş olsa da, elde edilen kazanç, geçmiş zaman kayıpları her iki panel için de aynı olduğundan mekanizmanın etkinliğini açık biçimde doğrulamaktadır.

Ancak bu durum tüm koşullar için geçerli değildir; kirliliğin türü, anlık kayıplar ve gelecekteki ışıınım-sıcaklık koşulları temizlik kararını etkileyebilir. Bazı durumlarda tahmini kazanç, temizlik için harcanan enerjiden düşük kalabilir; bu tür senaryolarda kararın ertelenmesi daha uygun olacaktır.



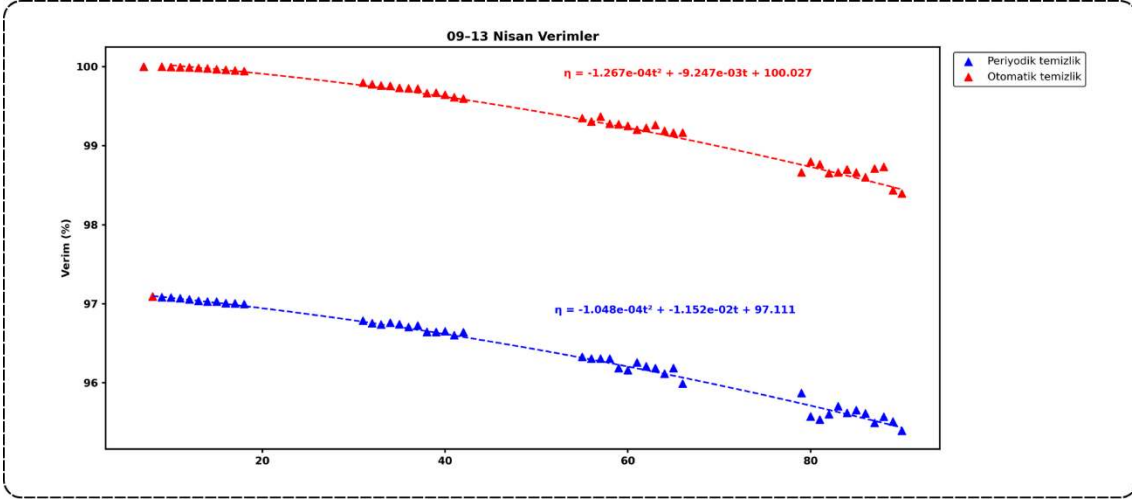
Şekil 4.33 09–13 Nisan tarihli ölçümler: üstte periyodik temizlik (mavi) ve otomatik karar (kırmızı) panellerinin referansa göre güç kayıpları; altta zamana bağlı ışınnım, sıcaklık ve referans panel üretimleri (yeşil).

4.4.2.1 Verim Analizi ve Kirlenme Hızı Modeli

Kayıpların doğrudan modellenmesi yerine, panellerin verim değerleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Bu durum aynı zamanda verimin zamana bağlı düşüşünün de modellenmesine olanak sunar. Kirli panellerin referans panele göre anlık verimleri bölüm 3.1.2.2’deki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

Zamanla toz birikiminin artmasıyla verimlerde belirgin düşüşler gözlenmiş, bu eğilim ikinci dereceden polinomal regresyon ile modellenmiştir. Elde edilen fonksiyonlar, ölçüm verileriyle yüksek korelasyon göstermiştir (Şekil 4.34). Bu sonuçlar, panel verimindeki düşüşün zamanla artan bir kirlenme eğilimiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

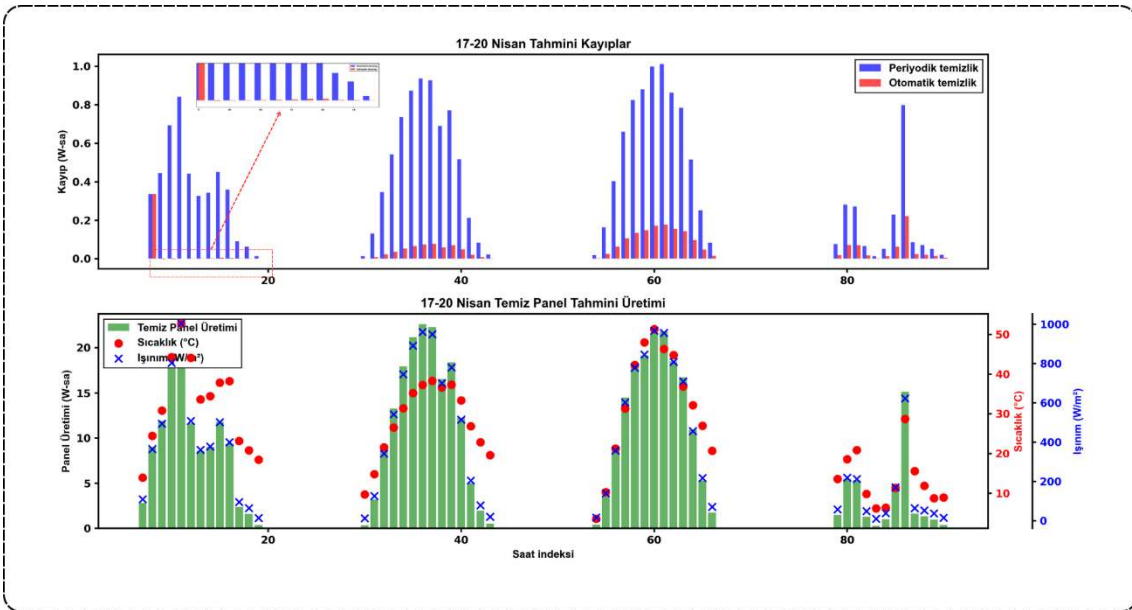
Ters açıdan değerlendirildiğinde, bu eğriler aynı zamanda kirlenme hızının bir göstergesi olarak da kullanılabilir. Böylece model, hem verim azalmasını açıklamakta hem de temizlik kararlarının zamanlaması açısından bir öngörü aracı işlevi görmektedir.



Şekil 4.34 09–13 Nisan ölçüm periyodunda verim değişimleri ve elde edilen kirlenme hızı fonksiyonları.

4.4.3 Tahmin Modelinin Doğrulanması

Modelin güvenilirliğini test etmek amacıyla, aynı düzenek 17–20 Nisan 2024 tarihlerinde yeniden çalıştırılmıştır. Bu deneyde, 09–13 Nisan döneminde elde edilen kirlenme hızı polinomları kullanılarak ikinci ve üçüncü paneller için üretim tahminleri yapılmış; sonuçlar Şekil 4.35’te sunulmuştur.



Şekil 4.35 17–20 Nisan döneminde periyodik (mavi) ve otomatik karar (kırmızı) panellerin tahmini kayıpları; altta ışınım, sıcaklık ve referans panel üretimleri (yeşil).

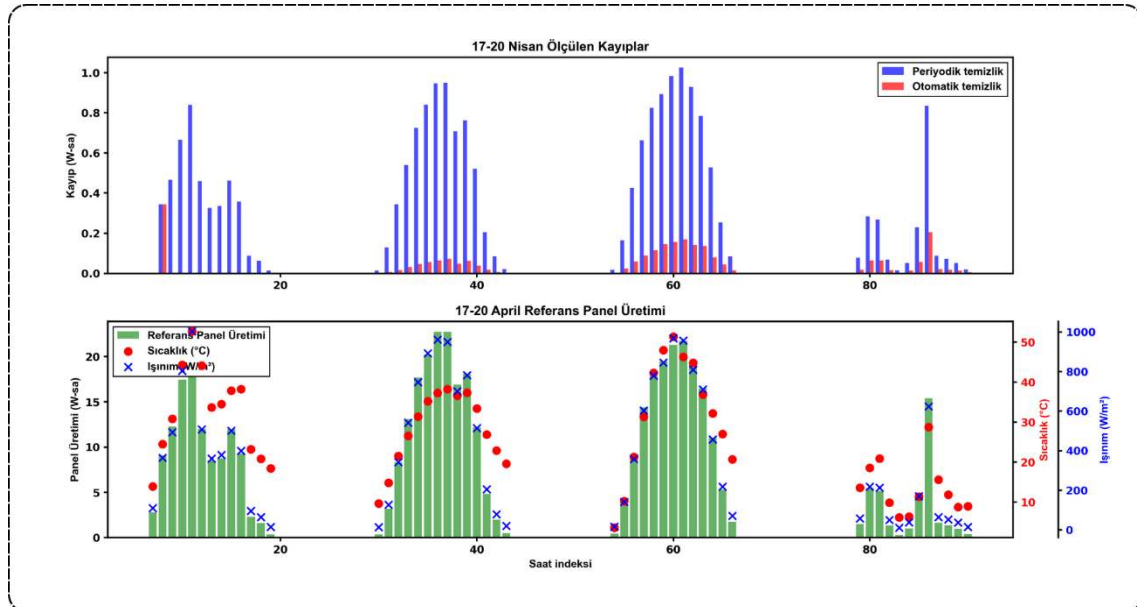
Tahminlere göre:

- Periyodik temizlik uygulanması halinde toplam 20.69 W-sa. kayıp beklenmiştir.
- Başlangıçta temizlik kararı ile 5.42 W-sa. CC'ye ek olarak 2.74 W-sa üretim kaybı öngörülmüştür.

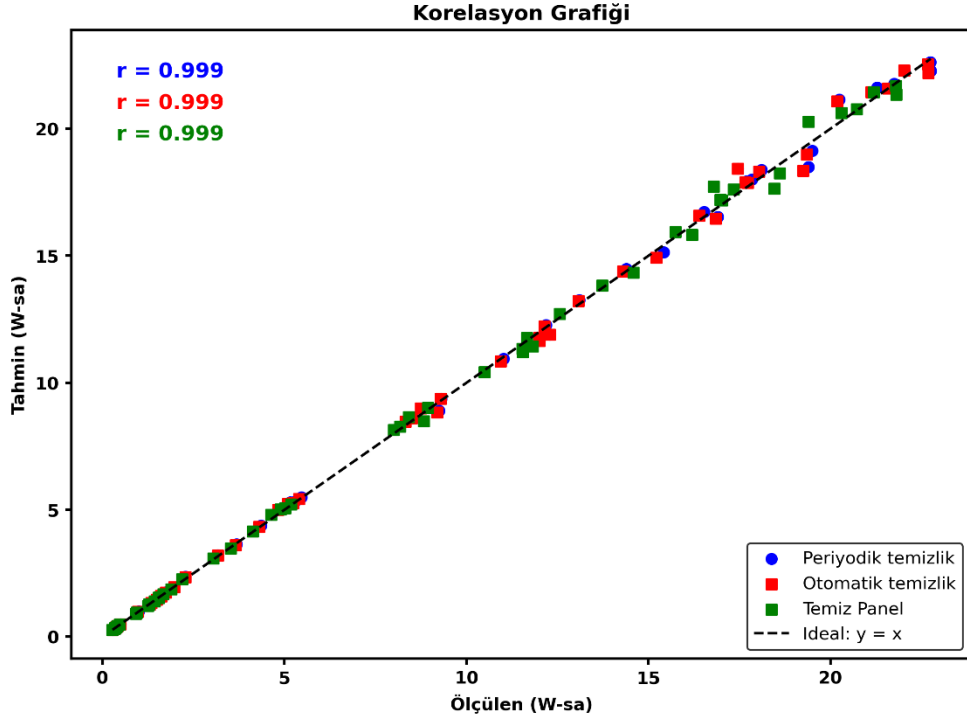
Buna göre, yaklaşık 13.31 W-sa'lık net enerji kazancı sağlanacağı tahmin edilmiş ve bu doğrultuda temizlik gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sonuçlar tahminlerle oldukça uyumlu çıkmıştır:

- 3. panel için öngörülen 20.69 W-sa kayıp, ölçümlerde 20.85 W-sa olarak gerçekleşmiştir.
- 2. panel için tahmin edilen 2.74 W-sa, ölçümlerde 2.51 W-sa olarak kaydedilmiştir.

Bu sonuçlar, modelin yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir (Şekil 4.36, Şekil 4.37).



Şekil 4.36 17–20 Nisan döneminde periyodik (mavi) ve otomatik karar (kırmızı) panellerin ölçülen kayıpları; altta ışınlam, sıcaklık ve referans panel üretimleri (yeşil).



Şekil 4.37 Ölçülen ve modellenen panel çıkış güçleri korelasyonu.

4.4.4 Değerlendirme

Gerçekleştirilen iki test periyodu (09–13 Nisan ve 17–20 Nisan 2024) sonucunda, önerilen karar verme mekanizması enerji kazancı, tahmin doğruluğu ve çevresel adaptasyon açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen ölçüm ve tahmin sonuçları Çizelge 4.9’da özetlenmiştir.

Çizelge 4.9 Karar verme mekanizması test senaryoları için karşılaştırmalı enerji ve verim analizi.

Test Dönemi	Ortalama Işınım [W/m ²]	Ortalama Sıcaklık [°C]	Planlı Temizlik Kayıbı [Wh]	Otomatik Temizlik Kayıbı [Wh]	Temizlik Enerjisi [Wh]	Net Enerji Kazancı [Wh]
09–13 Nisan 2024 (ölçülen)	509.25	27.1	20.71	3.59	5.42	11.70
17–20 Nisan 2024 (tahmin edilen ve doğrulanan)	425.95	23.6	20.69 (tahmin) / 20.85 (ölçülen)	2.74 (tahmin) / 2.51 (ölçülen)	5.42	12.92

Işınım değerlerinin karşılaştırılması, ikinci test döneminde ışıınının %16 oranında düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu dönemde başlangıç kirliliği daha yüksek olmasına

rağmen panelin mutlak üretim kaybı başlangıç kirliliğine nispeten daha düşüktür; dolayısıyla net enerji kazancı da nispeten daha azdır. Bu durum, ışıının düşük olduğu zamanlarda temizlik kararının ertelenmesinin enerji açısından daha uygun olabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, yaz aylarında ışıının yüksek olduğu dönemlerde daha sık, kış aylarında ise daha seyrek temizlik yapılmasının yıllık bazda enerji verimini artıracığı öngörülmektedir.

Bunun yanında, periyodik temizlik aralıklarının uzatılması durumunda sistem, iki temizlik zamanı arasında birden fazla otomatik temizlik kararı alabilmektedir. Bu sayede, dinamik olarak uyarlanabilen temizlik planları oluşturulabilmekte ve gereksiz işlemler önlenmektedir.

Bu bulgular, sistemin yalnızca kısa vadeli kazanç sağlamadığını; aynı zamanda uzun vadede bakım maliyetlerini ve operasyonel enerji tüketimini de azaltarak sürdürülebilir işletme verimliliği sunduğunu göstermektedir.

Önerilen model, büyük ölçekli PV tesislere uygulandığında;

- gereksiz temizliklerin önlenmesi,
- temizlik zamanlamasının optimize edilmesi,
- bakım maliyetlerinin düşürülmesi, ve maksimum enerji kazanımı sağlanması açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Literatürde yer alan bazı otomatik temizlik uygulamaları, kirlenme eşiğini %7 geçirgenlik düşümü veya %2.5 verim azalımı olarak sabit tanımlamakta ve bu eşiklerin altına inildiğinde temizlik işlemini tetiklemektedir. Bu yaklaşım, özellikle kapalı havalarda ya da düşük ışıının koşullarında, üretim düşüklüğüne rağmen temizlik enerjisini dikkate almadan temizlik yapılmasına neden olmaktadır. Böyle durumlarda, sistemin toplam enerji dengesi negatif yönde etkilenmektedir.

Önerilen sistem bu dezavantajı ortadan kaldırmakta ve enerji farkındalığı kavramını doğrudan karar sürecine entegre etmektedir. Model, sadece anlık verim düşüşünü değil, gelecekteki enerji kaybını da tahmin ederek gerçek zamanlı karar vermekte; bu yönüyle mevcut sistemlerden ayrılmaktadır. Bu özellik, temizlik kararının yalnızca mevcut performansa değil, aynı zamanda gelecek üretim potansiyeline dayalı olarak verilmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak önerilen karar mekanizması, temizlik takvimini dinamik biçimde güncelleyebilmekte, gereksiz temizlikleri önleyerek enerji kazancını maksimize etmektedir. Klasik sabit eşikli yaklaşımlara kıyasla hem daha esnek hem de daha verimli bir karar yapısı sunmakta; PV sistemlerde öngörülü, enerji-duyarlı temizlik yönetimi için güçlü bir çözüm oluşturmaktadır.

4.5 Kısıtlar ve Kabuller

Bu bölümde, önerilen IP tabanlı kir tespit yönteminin, karar verme mekanizmasının ve RTVA tabanlı enerji-farkındalıklı güzergâh optimizasyonunun uygulanmasında yapılan kabuller, deneysel sınırlılıklar ve yöntemin gelecekte geliştirilmesi gereken yönleri ele alınmaktadır. Bu değerlendirme; sistem bileşenlerinin performans varsayımlarını, modellere ait sadeleştirmeleri ve deney ortamına özgü koşulları kapsamaktadır.

Önerilen kir tespit yöntemi, RGB görüntüler üzerinde adaptif eşikleme ve kontur analizine dayanmaktadır. Tek panelli sistemlerde yüksek doğruluk sağlansa da çoklu panelli dizilimlerde henüz test edilmemiştir. Farklı arka planlar, yoğun güneş parlaması ve gölgeler kontur kararlılığını düşürebilir. Bu nedenle K-ortalamaları–HSV tabanlı alternatif renk kümelenmesi önerilmiş olsa da, bu yöntemde panel yüzeyinin görece koyu olduğu varsayılmıştır. Farklı panel tipleri ve aydınlatma koşulları için yöntemin yeniden kalibrasyona ihtiyacı bulunmaktadır. Sistem sabit kamera ile laboratuvar ölçeğinde test edilmiştir. Ahmed vd. (2025) ve Kishor vd. (2025)’de rapor edilen dron tabanlı otomatik temizleme ve kirlenme sınıflandırma sistemleri, büyük ölçekli PV santrallerinde trend haline gelmektedir. Bu çalışma; konumsal doğruluğu yüksek, enerji-farkındalıklı güzergâh planlaması sunmakla birlikte mobil platformlara entegrasyon

açısından ek donanımsal gereksinimler doğurabilir

Temizleme mekanizmasının verimi ve motor sürüş sistemi sabit kabul edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, nem ve kir türüne bağlı fırça etkinliği modele dahil edilmemiştir. Motor atalet momenti, ivmelenme ve kısa süreli akım değişimleri göz ardı edilerek enerji modeli sadeleştirilmiştir. Ayrıca, temizleme verimi pratikte değişken olmasına rağmen sabit kabul edilmiştir. Farklı kir türlerinin (çamur, kuş pisliği, polen vb.) farklı temizlik güçleri gerektirdiği bilinmekte olup, bunlara yönelik ayrı rotalama/enerji modelleri gelecekte geliştirilmelidir.

Gelecek zaman enerji kaybı tahmini, güneş ışıınımı ve sıcaklığa dayalı LPF modelleri ile yapılmıştır. Nem ve rüzgâr etkileri sıcaklık modeline dahil edilmemiştir. Panel sıcaklığının sadece ışıınım ve ortam sıcaklığı ile değiştiği varsayılmıştır. TD çıkarımında yalnızca tek diyotlu ECM kullanılmış; dinamik parametrelili modeller (Garcia-Marrero vd. 2025) değerlendirilmemiştir. TD yaklaşımı hücresel MPP tahminini mümkün kılarsa da, optimizasyon süreci nedeniyle gerçek zamanlı MPPT uygulamalarına uygun değildir. Ancak temizlik kararının verilmediği durumlarda tek seferlik TD çıkarımının MPPT cihazına aktarılması, geçici durum kararlılığı açısından faydalı olabilir.

Sistemin kurulum maliyeti, alternatif temizlik yöntemleriyle (manuel, suyla temizlik, elektrostatik sistemler) karşılaştırılmamıştır. Yatırım geri dönüş süresi saha ölçeğine göre önemli değişiklik göstereceğinden, ekonomik analiz gelecekte yapılması gereken çalışmalardan biridir.

Bu sınırlılıklara karşın, önerilen çerçeve IP tabanlı kir tespiti, enerji-farkındalıklı karar verme ve RTVA rotalama süreçlerini bütünleştirerek PV bakım otomasyonuna güçlü bir temel sunmaktadır. Sınırlılıkların giderilmesi, sistemin büyük ölçekli PV santrallerinde ve mobil platformlarda (dron/robot) daha geniş uygulama alanına sahip olmasına katkı sağlayacaktır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez kapsamında, fotovoltaik (PV) sistemlerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik olarak, mekanik, optik ve algoritmik bileşenleri bütünleştiren otonom bir panel temizleme sistemi geliştirilmiştir.

Sistem, üç temel yenilik etrafında şekillendirilmiştir:

- Enerji farkındalıklı karar verme mekanizması,
- Non-uniform kirlenme modellemesi (Geçirgenlik Dağılımı (TD) yaklaşımı),
- RTVA tabanlı rota ve enerji optimizasyonu.

Aşağıda, bu bileşenlerin mühendislik katkıları ve bütüncül etkileri tartışılmıştır.

5.1 Mekanik Sistem ve Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirme

Geliştirilen sistemin mekanik tasarımı, çift eksenli (X-Y) bilyalı vida tahrikli bir fırçalama mekanizması üzerine kurulmuştur. Bu yapı, geleneksel lineer aktüatör sistemlerine kıyasla daha yüksek mekanik hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve titreşim sönümlenme avantajı sağlamaktadır. Aynı zamanda panel alt desteği üzerine kurulu mekanizma sayesinde mekanik ezilmelerin önüne geçilmiştir. Her iki eksendeki hareket, step motorlar aracılığıyla yüksek doğrulukla kontrol edilmiş, böylece hem konumlandırma hataları hem de enerji kayıpları en aza indirilmiştir.

Sistemin en önemli avantajlarından biri, tam yüzey temizliği yerine hedefe yönelik temizlik yapabilmesidir. IP hattı tarafından tespit edilen kirlenme bölgeleri, RTVA algoritması ile minimum enerji rotası üzerinden temizlenmiş; bu sayede gereksiz fırça hareketleri, su tüketimi ve enerji sarfiyatı ortadan kaldırılmıştır. Yapılan deneylerde, RTVA tabanlı temizlik stratejisi, klasik tam yüzey temizliğine göre ortalama %19 daha düşük enerji tüketimi ve benzer oranda zaman tasarrufu sağlamıştır.

Bu mimarinin modüler yapısı sayesinde, sistem hem sabit kara tabanlı robotlar hem de

gelecekteki dron tabanlı temizleme platformları için uyarlanabilir niteliktedir. Özellikle enerjiye duyarlı uçuş sistemlerinde (örneğin çok rotorlu hava araçlarında), RTVA'nın kısa rotalar üretme kabiliyeti, menzil ve operasyon süresini artırmak açısından kritik bir avantaj sunmaktadır.

5.2 Non-Uniform Kirlenme Modeli ve Geçirgenlik Dağılımı Yaklaşımı

Tez kapsamında geliştirilen TD modeli, panel yüzeyindeki homojen olmayan (non-uniform) kirlenmeleri hücre düzeyinde modelleyebilmekte ve eşdeğer devre parametrelerine doğrudan entegre edilebilmektedir. Klasik yöntemlerin çoğu, kirlenmeyi tüm yüzeye eşit dağılmış kabul etmekte; bu durum, gerçek saha koşullarında özellikle kısmi gölgelenme, kuş pisliği veya çizgisel toz birikimi gibi düzensiz kirlenme durumlarını doğru yansıtamamaktadır. Bazı çalışmalarda kirlenme indeksini kirli panelin kısa devre akımı ile veya panelin çıkış gücü sabit FF, kısa devre akımı, açık devre gerilimi üzerinden hesaplanmaktadır (Abraim vd. 2023, Hossain vd. 2025). Ancak non-uniform kirlenme koşulları bu değerler ile lineer ilişki kurulmasını engellemektedir.

Bu eksikliği gidermek üzere geliştirilen TD modeli, her hücreye özgü geçirgenlik katsayıları ($\tau_1 \dots \tau_n$) tanımlayarak ışığın yerel düzeyde soğurulmasını matematiksel olarak temsil etmektedir. DOA ile optimize edilen bu parametreler, eşdeğer devre modeline entegre edilerek ölçülen I-V eğrileri yüksek doğrulukla yeniden üretilmiştir.

Ayrıca TD modeli, sadece elektriksel performansın tahmini için değil, aynı zamanda temizlik zamanlamasının optimizasyonu için de kullanılabilir bir karar desteği sağlamaktadır. Örneğin, ortalama geçirgenlik (μ_v) ve standart sapma (σ_v) parametreleri üzerinden panelin kirlenme homojenliği ve enerji kaybı eğilimi değerlendirilebilmekte; bu sayede önleyici temizlik kararları verilmesi mümkün hale gelmektedir.

5.3 Enerji Farkındalıklı RTVA Optimizasyonu ve Karar Verme Mekanizması

Sistemin karar verme mimarisi hem anlık performans ölçümlerini hem de gelecekteki

enerji kayıplarını dikkate alacak şekilde tasarlanmıştır. Mevcut sistemlerde temizlik kararı, sabit eşik değerlerine (örneğin %7 geçirgenlik kaybı (Fathi vd. 2017) veya %2.5 verim düşüşü (Hossain vd. 2025)) dayalı olarak verilirken; bu çalışma, gelecek döneme ait üretim tahminlerini de sürece dahil etmiştir. Ayrıca bazı çalışmalarda kir tespiti anında ya da kirli temiz sınıflandırmaları ile temizlik aktivasyonu önerilmekte, temizleme işlemi ile birlikte toplam kazanç göz ardı edilmektedir. Önerilen algoritmada, gelecek zaman enerji kaybı tahmini, güneş ışıınımı ve sıcaklığa dayalı hibrid LPF modelleri ile yapılabilmektedir. Düşük MBE sonuçları (Üstündağ vd. 2025), anlık tahminlerdeki hatanın göz ardı edilmesine olanak sağlamaktadır.

Model, ışıınım ve sıcaklık tahminlerini kullanarak, temizlik kararı sonucunda oluşacak enerji sarfıyatı ile kazanç farkını karşılaştırmakta; böylece enerji-farkındalıklı karar verme gerçekleştirmektedir. Bu özellik, düşük ışıınım koşullarında gereksiz temizlikleri önlemekte, yüksek ışıınım koşullarında ise kazanç potansiyelini maksimize etmektedir. Bölgesel temizlik sıklığı araştırmalarının (Shenawy ve Ghetany 2021) ve temizleme takvimi optimizasyonlarının (Zhang vd. 2025) yerine genelleştirilebilir bir çerçeve sunmaktadır.

RTVA algoritması ile entegre çalışan bu karar yapısı, rota planlamasını enerji maliyetine göre optimize etmekte; hareket enerjisi, motor akımı ve yol uzunluğu parametreleri birlikte değerlendirilmektedir. Böylece sistem, hem karar hem de hareket düzeyinde çok katmanlı enerji optimizasyonu sağlamaktadır.

5.4 Genel Değerlendirme ve Sürdürülebilirlik Perspektifi

Bu çalışma, üç tamamlayıcı yeniliği tek bir otonom platformda birleştirerek PV bakımında sürdürülebilir bir paradigma sunmuştur:

- IP tabanlı kirlenme tespiti,
- Geçirgenlik dağılımı ile fiziksel modelleme,
- RTVA tabanlı rota optimizasyonu,
- Enerji farkındalıklı karar verme.

Deneysel doğrulamalar, geliştirilen sistemin hem küçük ölçekli hem de büyük ölçekli senaryolara genellenebilir olduğunu göstermektedir. Özellikle non-uniform kirlenmeler altında, TD-RTVA entegrasyonu sayesinde model, panelin elektriksel davranışını yüksek doğrulukla tahmin etmiş ve karar verme mekanizması ile otonom temizlik zamanlaması başarıyla uygulanmıştır.

Bu yönleriyle sistem, geleneksel sabit periyotlu temizlik yaklaşımlarına kıyasla;

- Kaynak kullanımını azaltmakta,
- Mekanik aşınmayı ve su tüketimini düşürmekte,
- Bakım maliyetlerini azaltmakta,
- Uzun vadeli işletme sürdürülebilirliğini artırmaktadır.

Ayrıca sistemin modüler yapısı, ileride dron tabanlı, çok ajanlı veya bulut destekli temizlik platformlarına ölçeklenmesine olanak tanımaktadır. RTVA'nın deterministik ve kural tabanlı yapısı sayesinde, bu tür çoklu sistemlerde rota paylaşımı ve görev bölümü etkin biçimde yapılabilir. Böylece, gelecekte büyük ölçekli PV santrallerinde koordineli, enerji-verimli ve otonom bakım operasyonları mümkün hale gelecektir.

5.5 Sonuç ve Öneriler

Bu tezde geliştirilen otonom sistem;

- fiziksel olarak rotalamaya uygun mekanik tasarımı,
- hücre düzeyinde kirlenme modellemesi,
- ve enerji farkındalıklı rota ve karar optimizasyonu sayesinde PV bakımında yeni bir standart önermektedir.

Ana sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- RTVA algoritması, klasik sezgisel ve meta-sezgisel yöntemlere göre %19'a

varan enerji tasarrufu ve 20 kata kadar daha kısa optimizasyon süresi sağlamıştır.

- TD modeli, non-uniform kirlenmeler altında I–V eğrilerini yüksek doğrulukla yeniden üretmiş, böylece gerçek saha koşullarının fiziksel olarak modellenmesini mümkün kılmıştır.
- Enerji farkındalıklı karar mekanizması, düşük ısıtım koşullarında temizlik kararını erteleterek gereksiz enerji harcamalarını önlemiş; yüksek ısıtım koşullarında ise kazancı maksimize etmiştir.
- Bütünleşik sistem, enerji kayıplarını azaltırken her zaman optimum temizleme zamanı kararını vermektedir.

Gelecek çalışmalar kapsamında;

- Mekanik sistemin ve akıllı uygulamaların büyük ölçekli sistemlerde çalıştırılabilir tasarımları,
- RTVA’da görülen sınırlılıkların geliştirilmesi ile spreyci dron (Zhang vd. 2024, int. kyn-1), hava-jeti temizliği (Rehman vd. 2022) yöntemlerine uygulanması veya gruplama özelliğinin çok ajanlı sistemlere entegre edilmesi,
- ve karar mekanizmasının dinamik fiyatlama tarifeleri ile birlikte değerlendirilerek enerji farkındalığından, finansal farkındalığa geçirilmesi bulut tabanlı tahmin motorları ile desteklenmesi önerilmektedir.

Bu entegrasyonlar sayesinde, geliştirilen yaklaşımın saha ölçekli, otonom ve sürdürülebilir PV bakım sistemleri için temel bir referans model haline gelmesi öngörülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aashika P, Rithika S, Rathika P D, 2020, Illustration of automatic panel cleaning system, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9, 277-282.
- Abdolzadeh M, Ameri M, 2009, Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells, *Renewable Energy*, 34(1), 91-96.
- Abraim M, Ydrissi M, Ghennioui H, Ghennioui A, Hanrieder N, Wilbert S, Alani O, Boujoudar M, Azouzoute A, 2023, PVSMS: A system for quantifying soiling effects and optimizing cleaning schedule in PV solar plants, *Energy Conversion and Management*, 284, 116978.
- Abukhait J, 2024, Dust detection on solar panels: A computer vision approach, *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 29(2), 533-541.
- Abuqaoud K A, Ferrah A, A novel technique for detecting and monitoring dust and soil on solar photovoltaic panel, *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET) 2020*, 1-6, February 4- April 9, Dubai, UAE.
- Ahmad MF, Arif MSB, Rizvi M, Bansal RC, 2025, Recent developments, challenges, and future scenarios in PV array reconfiguration for mitigating partial shading, *Applied Energy*, 390, 125842.
- Ahmed S, Rashid H, Qadir Z, Tayyab Q, Senjyu T, Elkholy M H, 2025, Deep Learning-Based Recognition and Classification of Soiled Photovoltaic Modules Using HALCON Software for Solar Cleaning Robots, *Sensors*, 25(5), 1295.
- Akarslan, E, Hocaoglu, F O, 2016, A novel adaptive approach for hourly solar radiation forecasting, *Renewable Energy*, 87: 628–633.
- Akyazı Ö, Şahin E, Özsoy T, Algül M, 2019, A Solar Panel Cleaning Robot Design and Application, *European Journal of Science and Technology*, 343-349.
- Alagoz S, Apak Y, 2020, Removal of spoiling materials from solar panel surfaces by applying surface acoustic waves, *Journal of Cleaner Production*, 253, 119992.

- Alsalibi, B, Babaeianjelodar, M, Venkat, I, 2012, A comparative study between the nearest neighbor and genetic algorithms: A revisit to the traveling salesman problem, *International Journal of Computer Science and Electronic Engineering*, 1, 34–38.
- Altıntaş M, Arslan S, 2021, The study of dust removal using electrostatic cleaning system for solar panels, *Sustainability*, 13, 9454.
- Ayop R R, Tan C W, Mahmud M A S N, Nasir S, Al-Hadhrami T, Bukar A L, 2020, A simplified and fast computing photovoltaic model for string simulation under partial shading condition, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100812.
- Bae K Y, Jang H S, Sung D K, 2016, Hourly solar irradiance prediction based on support vector machine and its error analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2): 935–945.
- Baranwal K, Prakash P, Yadav V K, 2025, Optimizing bypass diode performance with modified hotspot mitigation circuit, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 280, 113281.
- Benghanem M, Almohammed A, Khan M T, Al-Mashraqi A A, 2018, The effect of Dust Accumulation on the Performance of Photovoltaic Panels in Desert Countries, A Case Study of Madinah, Saudi Arabia, *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 9(3), 1356-1366.
- Bomber J, Einhorn A, Engtrakul C, Lanaghan C, Linger J, Micheli L, vd., 2024, Soiling, Cleaning, and Abrasion: The Results of the 5-Year Photovoltaic Glass Coating Field Study, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 275, 113035.
- Borawake S, Bhambure S, Mulani S, Bhadawankar S, 2025, Automatic Dust Sensing Solar Panel Cleaning System, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 6, 7687-7692.
- Bunyan H, Ali W, Alnaser M, 2016, Enhancing the Performance of Photovoltaic Panel by Proper Washing Periods in Kuwait, *Smart Grid Renewable Energy*, 7, 190-196.

- Chanchangi Y N, Ghosh A, Sundaram S, Mallick T K, 2020, An Analytical Indoor Experimental Study on the Effect of Soiling on PV, Focusing on Dust Properties and PV Surface Material, *Solar Energy*, 203, 46–68.
- Chanchangi Y N, Ghosh A, Sundaram S, Mallick T K, 2021, Angular Dependencies of Soiling Loss on Photovoltaic Performance in Nigeria, *Solar Energy*, 225, 108–121.
- Castillo M G, Navarrete P, Tapia T, Lorca A, Olivares D, Pincetic M N, 2023, Cleaning scheduling in photovoltaic solar farms with deterministic and stochastic optimization, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 36, 101147.
- Chen X, Zhou Y, Tang Z, Luo Q, 2017, A Hybrid Algorithm Combining Glowworm Swarm Optimization and Complete 2-opt Algorithm for Spherical Travelling Salesman Problems, *Applied Soft Computing*, 58, 104–114.
- Chermite C, Douiri M R, 2025, A Novel Hybrid Approach Combining Differentiated Creative Search with Adaptive Refinement for Photovoltaic Parameter Extraction, *Renewable Energy*, 245, 122764.
- Chi X, Wei D, Shen M, He Y, 2024, A Fault Diagnosis Method for Cracks of Photovoltaic Modules Based on Calculation of Equivalent Circuit Model Parameters, *Solar Energy*, 283, 112970.
- Christian S, Stefan B, Michael K, 2015, Impact of soiling on iv-curves and efficiency of pv-modules, *Solar Energy*, 112, 259-262.
- Costa Silva L A, Ruiz L G B, Criado-Ramón D, Bessa J G, Micheli L, Jiménez M del C P, 2023, Assessing the impact of soiling on photovoltaic efficiency using supervised learning techniques, *Expert Systems with Applications*, 231, 120816.
- Croes G A, 1958, A method for solving traveling salesman problems, *Operations Research*, 6, 791–812.
- Delgadillo F J D, Montiel O, Sepúlveda R, 2016, Reducing the Size of Traveling Salesman Problems Using Vaccination by Fuzzy Selector, *Expert Systems with Applications*, 49, 20–30.

- Delévacq A, Delisle P, Gravel M, Krajecki M, 2013, Parallel Ant Colony Optimization on Graphics Processing Units, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73(1), 52–61.
- Doğan İ, 2024, Investigation of Manual Cleaning and Anti-Dust Silica-Based Coatings on the Effects of Photovoltaic Power Systems on Working Efficiency, Iskenderun University, Institute of Graduate Studies, M.Sc. Thesis, 63p, Hatay.
- El Gallassi H, Alami Merrouni A, Chourak M, Ghennioui A, 2023, Novel technique for soiling measurement on concentrated solar plants using night-time image analysis. *Solar Energy*, 252, 260–271.
- Elminir H K, Ghitas A E, Hamid R H, El-Hussainy F, Beheary M M, Abdel-Moneim K M, 2006, Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors, *Energy Conversion and Management*, 47, 3192–3203.
- Erişgin D, Kara G, Özcan H, 2022, Fotovoltaik Panel Temizliğinde Yüzey Akustik Dalgaları Kullanımının Fotovoltaik Panel Performansına Etkilerinin İncelenmesi, *OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, 2(2), 137-154.
- Ester M, Kriegel H, Sander J, Xu X, 1996, A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96) 1996*, AAAI Press, pp. 226–231, August 2 – 4, Portland, OR, USA
- Fan S, Wang Y, Cao S, Sun T, Liu P, 2021, A Novel Method for Analyzing the Effect of Dust Accumulation on Energy Efficiency Loss in Photovoltaic (PV) System, *Energy*, 234, 121112.
- Fan S, Wang X, Wang Z, Sun B, Zhang Z, Cao S, Zhao B, Wang Y, 2022, A novel image enhancement algorithm to determine the dust level on photovoltaic (PV) panels, *Renewable Energy*, 201(Part 1), 172–180.
- Fathi M, Abderrezek M, Grana P, 2017, Technical and economic assessment of cleaning protocol for photovoltaic power plants: Case of Algerian Sahara sites, *Solar Energy*, 147, 358-367.

- Garcia-Marrero L E, Pavon-Vargas C I, Bastidas-Rodriguez J D, Monmasson E, Petrone G, 2025, Self-Adaptive Single-Diode Model Parameter Identification Under Small Mismatching Conditions, *Renewable Energy*, 245, 122735.
- Gökdeniz U, 2022, Experimental Investigation of the Effect of Dusting on Performance of PV Panels, Nigde Omer Halisdemir University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, M.Sc. Thesis, 56p, Nigde.
- Gutin G, Karapetyan D, 2010, A Memetic Algorithm for the Generalized Traveling Salesman Problem, *Natural Computing*, 9(1), 47–60.
- Gürbüz D, 2018, Effect of Dirt and Dusting on Photovoltaic System Yield, Fırat University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, M.Sc. Thesis, 63p, Elazığ.
- Habib R, Tanvir S, Suhan A Y, Vadher A, Alam S, Shawmee T T, Ahmed K, Alrashed A, 2021, Automatic Solar Panel Cleaning System Based on Arduino for Dust Removal, *International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 1555-1558.
- Hajjiah A, 2025, Analytical Model for Photocurrent Density in Linearly Graded Band Gap Sb_2Se_3 Solar Cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 282, 113404.
- Hammad B, Al-Abed M, Al-Ghandoor A, Al-Sardeah A, Al-Bashir A, 2018, Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2218-2234.
- Hashim N, Mohammed M, Selvarajan R A, Al Zubaidi S, Mohammed S, Study on solar panel cleaning robot, *IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS) 2019*, 56-61, June 29, Selangor, Malaysia.
- Held M, Karp R M, 1971, The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II. *Mathematical Programming* 1, 6–25.
- Hocaoğlu F O, Gerek Ö N, Kurban M, 2008, Hourly solar radiation forecasting using optimal coefficient 2-D linear filters and feed-forward neural networks, *Solar Energy*, 82(8): 714–726.

- Hore S, Chatterjee A, Dewanji A, 2018, Improving variable neighborhood search to solve the traveling salesman problem, *Applied Soft Computing*, 68, 83–91.
- Horoufiany M, Ghandehari R, 2017, An optimal fixed reconfiguration scheme for PV arrays power enhancement under mutual shading conditions, *IET Renewable Power Generation*, 11.
- Hossain S, Arika A M, Fahim I N, Uddin J, Ahmed A, Apon H J, Hoque M A, 2025, Enhancing solar panel performance: A machine learning approach to dust detection and automated water sprinkle-based cleaning strategy, *Solar Energy*, 287, 113240.
- Hwang M P, Ku C C, Huang H C, 2023, Intelligent cleanup scheme for soiled photovoltaic modules, *Energy*, 265, 126293.
- Ishaque K, Salam Z, Lauss G, 2014, The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions, *Applied Energy*, 119, 228–236.
- Islam E, Sultana M, Ahmed F, 2018, An improved nearest neighbor algorithm for solving TSP, *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 3(5), 668–672.
- Javed W, Guo B, Figgis B, 2017, Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables, *Solar Energy*, 157, 397-407.
- Jiang Y, Lu L, Lu H, 2016, A novel model to estimate the cleaning frequency for dirty solar photovoltaic (PV) modules in desert environment, *Solar Energy*, 140, 236-240.
- Kargacıoğlu T, 2018, Sensor Based Automatic Solar Panel Cleaning System Prototype, Afyon Kocatepe University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, M.Sc. Thesis, Afyon.
- Kırbıyık O, 2023, Erzurum İklim Şartlarında Karlanma ve Buzlanmanın Fotovoltaik Paneller Üzerindeki Etkileri ve Gerçek Zamanlı Performans Analizi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, M.Sc. Thesis, 72p, Erzurum.

- Kishor I, Mamodiya U, Patil V, Naik N, 2025, AI-Integrated autonomous robotics for solar panel cleaning and predictive maintenance using drone and ground-based systems, *Scientific Reports*, 15, 32187.
- Khalid H M, Rafique Z, Muyeen S M, Raqeeb A, Said Z, Saidur R, Sopian K, 2023, Dust accumulation and aggregation on PV panels: An integrated survey on impacts, mathematical models, cleaning mechanisms, and possible sustainable solutions, *Solar Energy*, 251, 261–285.
- Koprlé A T, 2023, Investigation of the Effects of Cooling and Dust Accumulation on the Power Output and Efficiency of PV Panels, Gaziantep University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, M.Sc. Thesis, 53p, Gaziantep.
- Knox J, 1994, Tabu Search Performance on the Symmetric Traveling Salesman Problem, *Computers & Operations Research*, 21(8), 867–876.
- Laarabi B, Sankarkumar S, Rajasekar N, El Baqqal Y, Barhdadi A, 2022, Modeling Investigation of Soiling Effect on Solar Photovoltaic Systems: New Findings, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102126.
- Li M, Zhang M, Fu Y, Guo W, Zhong X, Wang X, Chen F, Fast and robust mapping with low-cost Kinect v2 for photovoltaic panel cleaning robot, *International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM) 2016*, 95-100, August 18-20, Macau, China.
- Maghami M R, Hizam H, Gomes C, Radzi M A, Rezadad M I, Hajighorbani S, 2016, Power loss due to soiling on solar panel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307-1316.
- Mahmoud D, Shalwala R, Khozium O, 2024, Detecting Dust Accumulation on Solar Panels using Image Processing and Deep Learning, *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 57(05), 83–94.
- Marinakís Y, Marinaki M, Dounias G, 2011, Honey Bees Mating Optimization Algorithm for the Euclidean Traveling Salesman Problem, *Information Sciences*, 181(20), 4684–4698.
- Mansour Bahar A A, Ferrahi K, Touahria Miliani M Y, Sadat S, Salma S, Laouchedi K, 2024, New Hybrid Meta-Heuristic to Optimize the Low Exploitation of Discrete

- Adapted Dragonfly Algorithm for Solving TSP, Zenodo, 10.5281/zenodo.11179563.
- Matar A G S, An H, 2024, Optimal Scheduling of PV Panel Cleaning and Policy Implications Considering Uncertain Dusty Weather Conditions in the Middle East, *Systems*, 12(10), 418.
- Mejía E A, Correa H L, Mejía E F, Girón A D R, Rodríguez S E N, 2019, Dataset for Recognition of Snail Trails and Hot Spot Failures in Monocrystalline Si Solar Panels, *Data in Brief*, 26, 104441.
- M'Hallah R, Nejma I B, 2021, A Beam Search for the Equality Generalized Symmetric Traveling Salesman Problem, *RAIRO - Operations Research*, 55(5), 3021–3039.
- Micheli L, Fernández E F, Muller M, Smestad G P, 2020, Selection of optimal wavelengths for optical soiling modelling and detection in photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 212, 110539.
- Mirjalili S, 2016, Dragonfly Algorithm: A New Meta-Heuristic Optimization Technique for Solving Single-Objective, Discrete, and Multi-Objective Problems, *Neural Computing and Applications*, 27, 1053–1073.
- Mostefaoui M, Ziane A, Bouraiou A, Khelifi S, 2019, Effect of sand dust accumulation on photovoltaic performance in the Saharan environment: Southern Algeria (Adrar), *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 259-268.
- Mousavi S, Farahani G, 2022, Introducing a new method of automatic cleaning of the PV array surface using a suction robot, *Mechatronics*, 85, 102845.
- Mutluer M, Erat A, 2019, A new intelligent system design for cleaning the photovoltaic solar panel surface, *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 6(1), 8-16.
- Noorussbah S, Gautam PB, Keerthivas S, Prajeesha E, 2023, Aerial assessment of solar panel surfaces using drone, *ITM Web of Conferences*, 56, 05001.
- Obiora C N, Hasan A N, Ali A, 2023, Predicting solar irradiance at several time horizons using machine learning algorithms. *Sustainability*, 15(11): 8927.

- Oliveira A K V, Aghaei M, Rüther R, 2020, Aerial Infrared Thermography for Low-Cost and Fast Fault Detection in Utility-Scale PV Power Plants, *Solar Energy*, 211, 712–724.
- Onim M S H, Sakif Z M M, Ahnaf A, Kabir A, Azad A K, Oo A M T, Afreen R, Hridy S T, Hossain M, Jabid T, Ali MS, 2023, SolNet: A convolutional neural network for detecting dust on solar panels, *Energies*, 16(1), 155.
- Oufettoul H, Oubraik O, Ait Abdelmoula I, Motahhir S, El Majid B, 2025, A novel solar panel cleaning system for improved efficiency, *Unconventional Resources*, 8, 100249.
- Panat S, Varanasi K K, 2022, Electrostatic dust removal using adsorbed moisture–assisted charge induction for sustainable operation of solar panel, *Science Advances*, 8, 1-10.
- Park H, Ozturk A, Park H, Khan M U, 2018, Utilization of robotics for solar panel cleaning and maintenance, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 7, 768-775.
- Patil P A, Bagi J S, Wagh M M, 2017, A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel, In 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), 250-256.
- Perarasi M, Ramadas G, Joseph S, Kumar V, Soma V V K, 2021, Smart solar panel monitoring system using image processing, *Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry*, 12, 2181-2191.
- Piedra P G, Llanza L R, Moosmüller H, 2018, Optical losses of photovoltaic modules due to mineral dust deposition: Experimental measurements and theoretical modeling, *Solar Energy*, 164, 160-173.
- Pivem T, Araujo F O, Araujo L O, Oliveira G S, 2019, Application of a computer vision method for soiling recognition in photovoltaic modules for autonomous cleaning robots, *Signal & Image Processing: An International Journal (SIPIJ)*, 10, 43-59.
- Pop P C, Cosma O, Sabo C, Sitar C P, 2024, A Comprehensive Survey on the Generalized Traveling Salesman Problem, *European Journal of Operational Research*, 314(3), 819–835.

- Prasad D K, Leung M K H, Quek C, Cho S Y, 2012, A Novel Framework for Making Dominant Point Detection Methods Non-Parametric, *Image and Vision Computing*, 30(11), 843–859.
- Pulipaka S, Mani F, Kumar R, 2016, Modeling of soiled PV module with neural networks and regression using particle size composition, *Solar Energy*, 123, 116–126.
- Rehman S, Mohandes M A, Hussein A E, Alhems L M, Al-Shaikhi A, 2022, Cleaning of photovoltaic panels utilizing the downward thrust of a drone, *Energies*, 15(21), 8159.
- Riva Sanseverino E, Ngo Ngoc T, Cardinale M, Li Vigni V, Musso D, Romano P, Viola F, 2015, Dynamic programming and Munkres algorithm for optimal photovoltaic arrays reconfiguration, *Solar Energy*, 122, 347–358.
- Rodrigo P M, Gutiérrez S, Micheli L, Fernández E F, Almonacid F M, 2020, Optimum cleaning schedule of photovoltaic systems based on levelised cost of energy and case study in central Mexico, *Solar Energy*, 209, 11-20.
- Rojas T C, Franco J A, Escobedo Q H, Robles D R, Lopez J M J, 2023, A Novel Comparison of Image Semantic Segmentation Techniques for Detecting Dust in Photovoltaic Panels Using Machine Learning and Deep Learning, *Renewable Energy*, 217, 119126.
- Ronnaronglit N, Maneerat N, 2019, A Cleaning Robot for Solar Panels, 2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), Luang Prabang, Laos, 1-4.
- Schill C, Brachmann S, Koehl M, 2015, Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules, *Solar Energy*, 112, 259-262.
- Semaoui S, Hadj Arab A, Kouadri Boudjelthia E A, Seddik B, Zeraiaa H, 2015, Dust Effect on Optical Transmittance of Photovoltaic Module Glazing in a Desert Region, *Energy Procedia*, 74, 1347-1357.
- Shao Y, Zhang C, Xing L, Sun H, Zhao Q, Zhang L, 2024, A New Dust Detection Method for Photovoltaic Panel Surface Based on Pytorch and Its Economic Benefit Analysis, *Energy and AI*, 16, 100349.

- Shenawy E T, Ghetany H H, 2021, Effect of Dust Accumulation on the Performance of PV Modules under Cairo Climate Conditions, *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER*, 11(3).
- Shockley W, 1949, The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors, *Bell System Technical Journal*, 28, 435–489.
- Simonazzi M, Chiorboli G, Cova P, Menozzi R, Santoro D, Sapienza S, Sciancalepore C, Sozzi G, 2020, Smart soiling sensor for PV modules, *Microelectronics Reliability*, 114, 113789.
- Singh U P, Chandra S, 2023, Optimal cleaning schedule in solar PV using the biography-based helianthus optimization enabled coupled deep network, *Solar Energy*, 266, 112138.
- Singla M K, Nijhawan P, Oberoi A S, 2022, Parameter Estimation of Three Diode Solar PV Cell Using Chaotic Dragonfly Algorithm, *Soft Computing*, 26, 11567–11598.
- Sulaiman S H, Mat M N H, Guangul F M, Bou-Rabee M, 2015, Real-time study on the effect of dust accumulation on performance of solar PV panels in Malaysia, In *IEEE 7th International Conference on Information Technology in Asia (CITA)* 2015, 269-274, March 25-27, Marrakech, Morocco.
- Sundaram M, Prabhakaran S, Jishnu T, Sharma S, 2019, Design and analysis of an autonomous cleaning robot for large scale solar PV farms, *Automatic Control, Mechatronics and Industrial Engineering*, 265-272.
- Teo H G, Lee P S, Hawlader M N, 2012, An active cooling system for photovoltaic modules, *Applied Energy*, 90(1), 309-315.
- Tifidat K, Maouhoub N, 2023, An Efficient Method for Predicting PV Modules Performance Based on the Two-Diode Model and Adaptable to the Single-Diode Model, *Renewable Energy*, 216, 119102.
- Toaza B, Kiss D E, 2023, A Review of Metaheuristic Algorithms for Solving TSP-Based Scheduling Optimization Problems, *Applied Soft Computing*, 148, 110908.

- Unluturk M, 2019, Detection of Pollution Using Image Processing Techniques in Photovoltaic Panel Surface, Konya Technical University, Institute of Graduate Studies, M.Sc. Thesis, 68p, Konya.
- Ustundag E, Kaysal K, Hocaoglu F O, 2025, A novel meta-heuristic optimization procedure for LPF-based solar radiation forecasting, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(2).
- Üstündağ E ve Hocaoglu F O, 2026, Targeted and cost-efficient solar cleaning: A novel RTVA approach to robotic path planning, *Applied Energy*, 403(A), 127064.
- Valerino M, Bergin M, Ghoroi C, Ratnaparkhi A, Smestad G P, 2020, Low-cost solar PV soiling sensor validation and size resolved soiling impacts: A comprehensive field study in Western India, *Solar Energy*, 204, 307-315.
- Villarini M, Cesarotti V, Alfonsi L, Introna V, 2017, Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data, *Energy Conversion and Management*, 152, 1-12.
- Wang J, Li Y, Bian J, Yu Z, Zhang M, Wang C, Bi T, 2023, Multi-Stage Resilient Operation Strategy of Urban Electric–Gas System Against Rainstorms, *Applied Energy*, 348, 121507.
- Wang Z, Geng X, Shao Z, 2009, An Effective Simulated Annealing Algorithm for Solving the Traveling Salesman Problem, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 6, 1680–1686.
- Warsama A I, 2023, Experimental Investigation of the Effect of Dust Deposition on PV Module Energy Performance, Karabuk University, Institute of Graduate Programs, M.Sc. Thesis, 56p, Karabük.
- Wei X, Harrison A, El-Meligy M, 2025, A new intelligent control and global optimization methodology for peak solar energy performance under shading conditions, *Applied Energy*, 390, 125808.
- Xu L, vd., 2020, The influence of dust deposition on the temperature of soiling photovoltaic glass under lighting and windy conditions, *Solar Energy*, 199, 491-496.

- Yan S Z, Jian Y, Xu L J, 2020, Research on design of intelligent cleaning robot for solar panel, In Proceedings of The 20th International Conference on Electronic Business 2020, 313-320, December 5-8, Hong Kong SAR, China.
- Yong X Z, Yu G X, Yu C Z, Bo O L, Lai C D , 2010, Solving TSP based on multi-segment multi-orientation nearest neighbor algorithm, In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Xiamen, China, pp. 452–457.
- Yu Y, Cao J, Zhu J, 2019, An LSTM short-term solar irradiance forecasting under complicated weather conditions, IEEE Access, 7: 145651–145666.
- Zefri Y, Sebari I, Hajji H, Aniba G, Aghaei M, 2023, A Layer-2 Solution for Inspecting Large-Scale Photovoltaic Arrays Through Aerial LWIR Multiview Photogrammetry and Deep Learning: A Hybrid Data-Centric and Model-Centric Approach, Expert Systems with Applications, 223, 119950.
- Ziaur R M, Sheikh S, Islam A, Rahman M, 2024, Improvement of the nearest neighbor heuristic search algorithm for traveling salesman problem, Journal of Engineering Advances, 19–26.
- Zhang C, Ma Y, Yang G, Chen T, 2025, An integrated industrial PV panel cleaning recommendation system for optimal dust removal, Applied Energy, 377-D, 124692.
- Zhong Y, Lin J, Wang L, Zhang H, 2018, Discrete Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization Algorithm with Metropolis Acceptance Criterion for Traveling Salesman Problem, Swarm and Evolutionary Computation, 42, 77–88.
- Zhang Y T, Zhang J T, Liu Y, Liu K, Wang Q, 2024, Spray-on steady-state study of multi-rotor cleaning unmanned aerial vehicle in operation of photovoltaic power station, Energy Reports, 11, 5638–5653.
- Zhao W, Lv Y, Zhou Q, Yan W, 2021, Investigation on particle deposition criterion and dust accumulation impact on solar PV module performance, Energy, 233, 121240.

İnternet Kaynakları

1- WashDrones, 2025. Solar panel cleaning drones. <https://washdrones.com/solar-wash-drones/> , 18.09.2025



ÖZGEÇMİŞ

Yayınları (SCI ve diğer) :

- Targeted and Cost-Efficient Solar Cleaning: A Novel RTVA Approach to Robotic Path Planning, Applied Energy (2026)
- A Novel Meta-Heuristic Optimization Procedure for LPF based Solar Radiation Forecasting, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects (2025)
- Akıllı Güneş Panel Temizleme Sisteminin Tanıtılması, 4. Bilsel International Sur Scientific Researches Congress, 21-22 Aralık, (2024), Diyarbakır, Türkiye
- Güneş Paneli Temizleme Sistemlerinin Araştırılması, Fen ve Mühendislik Bilimleri Araştırmaları, Livre de Lyon, Duygu KAVAK- Ali KILIÇER, (2023)
- Introducing the optimum coefficient linear prediction filter tool, International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences (2018)
- Short Term Wind Speed Forecasting using Linear Prediction Filters, IJACEN V:6,I:9 (2018)
- Very Short Term Wind Speed Forecasting with ANN, Innovation and Global Issues in Multidisciplinary Sciences IV, (2018)
- Çok Boyutlu Doğrusal Tahmin Filtreleri ile Kısa Dönem Rüzgar Hızı Tahmini, Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (2018)

Yayınlar haricinde diğ er çalışma konuları aşağıda özetlenmiştir.

- Doğrusal Tahmin Filtrelerinin Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde kullanımı için WEB Arayüz Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi (2019)
- Enerji Nakil Hatları Proje Hazırlama Otomasyonu, Yazılım (Arazen) (2016)
- Trafo kayıplarının hesaplanması için manyetik geçirgenlik ve hysteresis eğrisi ölçüm aleti, Lisans Tezi (2009)

