



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TOZ BİRİKİMİNİN FOTOVOLTAİK (FV) SİSTEM VERİMLİLİĞİ
ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE OPTİMİZE EDİLMİŞ TEMİZLİK SIKLIĞI**

Yousef A. Y. ABDALLATIF

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Ağustos-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Yousef A. Y. ABDALLATIF tarafından hazırlanan “Toz Birikiminin Fotovoltaik (FV) Sistem Verimliliği Üzerindeki Etkisi ve Optimize Edilmiş Temizlik Sıklığı” adlı tez çalışması 28/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Sadık ATA

.....

Danışman

Doç.Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

.....

Üye

Doç. Dr. Fatih AYDIN

.....

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

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Yousef A. Y. ABDALLATIF

28.08.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ BİRİKİMİNİN FOTOVOLTAİK (FV) SİSTEM VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ VE OPTİMİZE EDİLMİŞ TEMİZLİK SIKLIĞI

Yousef A. Y. ABDALLATIF

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç.Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

Yıl, 2024, 73 Sayfa

Jüri

Danışman Doç.Dr. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

Doç. Dr. Fatih AYDIN

Dr. Öğr. Üyesi Sadık ATA

Fotovoltaik (FV) panellerdeki aşırı toz birikimi, özellikle kurak bölgelerde, güneş enerji santrallerinin enerji çıkışını önemli ölçüde azaltabilen büyük bir sorundur. Bu tez, Türkiye'nin Konya ilindeki 1,976 MWp'lik bir çatı üstü güneş enerjisi kurulumunun verimliliği üzerindeki toz etkisini incelemekte ve bu kayıpları azaltmak için optimal bir temizleme stratejisi önermektedir.

Çalışma, Solcast API Toolkit'ten güneş ışınımı, sıcaklık, yağış, nem ve rüzgar gibi çevresel faktörler hakkında 23 aylık veri toplayarak güneş santrali güç üretimi verilerini analiz etmiştir. Korelasyon analizi, doğrudan normal ışınım, yatay genel ışınım, sıcaklık, yağış, bağıl nem ve rüzgar yönünün enerji üretimi üzerindeki en güçlü etkiye sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır.

2022 yılında temizleme olmadan, 2023 yılında ise robotik temizleme ile kuru mevsimler arasında karşılaştırmalı bir analiz yapılarak toz giderilmesinin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, düzenli temizlemenin 2022'deki temizlenmemiş sisteme kıyasla haftalık ortalama enerji çıkışında %5-15 artışa yol açtığını ortaya koymuştur. Theil-Sen tahmincisi yöntemine dayalı kirlenme oranı hesaplamaları, günlük ortalama kirlenme oranının %0,2959 olduğunu göstermektedir. Optimum temizleme sıklığını belirlemek için bir model geliştirilmiştir. Analiz, kuru mevsimde 31 günlük optimal temizleme periyodunun yılda 6 kez temizleme anlamına geldiğini saptamıştır. Bu optimal temizleme stratejisinin uygulanması, toz birikimi ile ilişkili toplam maliyeti yılda 3 kez temizleme uygulamasına kıyasla %18 oranında azaltabilmektedir.

Bu araştırmanın bulguları, toz azaltma stratejilerini etkin bir şekilde uygulayarak fotovoltaik sistemlerinin uzun vadeli verimliliğini ve ekonomik olarak sürdürülebilirliğini artırmak için kurak bölgelerdeki güneş santrali işletmecilerine değerli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Panellerinde Toz Birikimi, Enerji Üretimi, Fotovoltaik Sistemler, Robotik Temizlik ve Güneş Enerjisi.

ABSTRACT

MS THESIS

IMPACT OF DUST ACCUMULATION ON PHOTOVOLTAIC (PV) SYSTEM EFFICIENCY AND OPTIMIZED CLEANING FREQUENCY

Yousef A. Y. ABDALLATIF

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL VEAPPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENERGY SYSTEMS
ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Mustafa Tahir AKKOYUNLU

Year, 2024, 73 Pages

Jury

**Advisor Assoc. Prof. Mustafa Tahir AKKOYUNLU
Assoc. Prof. Fatih AYDIN
Assistant Prof. Sadık ATA**

Excessive dust accumulation on photovoltaic (FV) panels is a major challenge that can significantly reduce the energy output of solar power plants, particularly in arid regions. This thesis investigates the impact of dust on the efficiency of a 1.976 MWp rooftop solar power installation in Konya, Turkey, and proposes an optimal cleaning strategy to mitigate these losses.

The study collected and analyzed 23 months of data on environmental factors such as solar irradiance, temperature, precipitation, humidity, and wind from the Solcast API Toolkit and power production data from the solar plant. Correlation analysis revealed that direct normal irradiance, global horizontal irradiance, temperature, precipitation, relative humidity, and wind direction strongly influenced energy generation.

A comparative analysis was conducted between the dry seasons of 2022 (without cleaning) and 2023 (with robotic cleaning) to quantify the impact of dust removal. The results showed that regular cleaning led to a 5-15% increase in average weekly energy output compared to the unclean system in 2022. Soiling ratio calculations based on the Theil-Sen estimator method indicated an average daily soiling rate of -0.2959%. An optimization model was developed to determine the most cost-effective cleaning frequency. The analysis showed that the optimal cleaning cycle is 31 days, equating to 6 cleanings per dry season. Implementing this optimal cleaning strategy can reduce the total cost associated with dust accumulation by 18% compared to the current practice of 3 cleanings per year.

This research provides valuable insights for solar plant operators in arid regions to enhance long-term efficiency, optimize cleaning schedules, improve the sustainability and efficiency of solar energy systems in dust-prone areas, and improve the economic viability of their photovoltaic systems through effective dust mitigation strategies.

Keywords: Dust Accumulation on Solar Panels, Energy Production, Photovoltaic System, Robotic Cleaning, and Solar Energy.

ÖNSÖZ

Derin şükranlarımı, kişiliğimin şekillenmesinde ve bu tezin tamamlanması boyunca sürekli destek veren değerli danışmanım Doç. Dr. Mustafa Tahir Akkoyunlu'ya sunarım. Uzmanlığını aktarmaya olan adanmışlığı takdire şayandır.

Bu yolculukta her zaman yanımda olan, ihtiyaç duyduğum sevgi ve desteği bana sağlayan sevgili aileme içten teşekkürlerimi sunarım. Bu deneyimi benimle paylaşan ve her zorluğu aşmama yardımcı olan kıymetli arkadaşlarımı asla unutmayacağım. Son olarak, tüm zorluklara rağmen hedeflerime ulaşmaktaki kararlılığım ve sebatım için kendime teşekkür ederim.

Bu çalışma, ortak çabaların ve el ele vermenin bir sonucudur. Bu tezin gerçekleşmesine katkıda bulunan herkese derin şükranlarımı sunarım.

Yousef A. Y. ABDALLATIF
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
ŞEKİL TABLOSU	ix
ÇİZELGELER TABLOSU	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bakış.....	1
1.2 Problem Tanımı	2
1.3 Tez Amaçları ve Hedefleri.....	5
1.4 Tez Yapısı	5
2 KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1 Giriş	7
2.2 Çalışmanın Temelleri.....	9
2.2.1 Yenilenebilir Enerji ve Güneş Enerjisi	9
2.2.2 Fotovoltaik Sistem	10
2.2.3 Fotovoltaik Güneş Panelleri.....	12
2.2.4 Güneş Hücresi Verimliliği	13
2.3 Fotovoltaik Dönüşüm Verimliliğini Etkileyen Parametreler	13
2.4 Tozun Etkileri, Özellikleri ve Türleri	17
2.5 Güneş Panelleri Üzerinde Toz Birikiminin Etkilerinin İncelenmesinin Önemi	21
2.6 Verimli Güneş FV Panelleri için Toz Temizleme Teknikleri.....	22
3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1 Proje Tanımı	25
3.2 Veri Toplama Sistemi	27
3.3 Veri İşleme ve Analiz	29
3.3.1 Verilerin Sınıflandırılması ve Ayrıştırılması	29
3.3.2 Kurak Mevsim Verileri	30
3.3.3 Karşılaştırmalı Veri Analizi	32
3.3.4 Korelasyon Analizi	34
3.4 Kirlenme Oranı Hesaplaması.....	35
3.5 Temizlik Sıklığı için Optimum Aralığın Belirlenmesi	37
4 BULGULAR.....	40
4.1 Veri Toplama	40
4.2 Korelasyon Analizi	43
4.3 Kuru Mevsimde Karşılaştırmalı Analiz	49

4.3.1	Temizlik Öncesi Dönem	50
4.3.2	Birinci Temizlik Sonrası Dönem	51
4.3.3	İkinci Temizlik Sonrası Dönem	53
4.3.4	Özet	54
4.4	Kirlenme Oranı Hesaplaması ve Optimize Edilmiş Temizlik Sıklığı	54
5	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
5.1	Sonuçlar	60
5.2	Öneriler	61
	KAYNAKLAR	62



ŞEKİL TABLOSU

Şekil 1.1. Bir FV sistemin maksimum verimini etkileyen faktörler, ayarlanabilir ve değiştirilemez olarak kategorize edilebilir.....	4
Şekil 2.1. 1990'dan 2022'ye kadar dünya toplam enerji tüketimi.....	7
Şekil 2.2. 2000-2028 yılları arasında küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji sektörünün yıllara göre payları.....	8
Şekil 2.3. Güneş enerjisi dönüşüm süreci.....	11
Şekil 2.4. a) Geleneksel güneş hücrelerinin tipleri b) Monokristal güneş paneli yapısı.	12
Şekil 2.5. CIGS güneş hücrelerini oluşturan beş katmanı gösteren grafik.....	13
Şekil 2.6. FV panel verimliliğini etkileyen faktörler.....	14
Şekil 2.7. FV modül yüzeyinde toz birikmesine neden olan faktörler ve bu faktörler arasındaki.....	17
Şekil 2.8. PM10 konsantrasyonu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) olarak ifade edilen dünya genelindeki toz yoğunluğu.....	18
Şekil 3.1. Fabrikanın çatısındaki güneş paneli projesi Drone tarafından elde edildi.	25
Şekil 3.2. 1 Ocak 2022'den - 30 Kasım 2023'e kadar KWh olarak Günlük Enerji Üretimi.....	28
Şekil 3.3. 1 Ocak 2022'den - 30 Kasım 2023'e kadar KWh olarak Haftalık Enerji Üretimi.....	29
Şekil 3.4. 1 Ocak 2022'den - 30 Kasım 2023'e kadar KWh olarak Aylık Enerji Üretimi.....	29
Şekil 3.5. 2022 yılı Kurak sezonu için haftalık enerji üretim verileri.....	31
Şekil 3.6. 2023 yılı Kurak sezonu için haftalık enerji üretim verileri.....	32
Şekil 3.7. 2023'teki iki temizlik dönemi ile 2022'deki iki temizlik yapılmayan dönem arasındaki toplam enerji üretimi, ilki 52 gün ve ikincisi 97 gündür.....	33
Şekil 4.1. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama sıcaklık değerleri.....	40
Şekil 4.2. 2022 ve 2023 yılı için toplam haftalık küresel yatay ışınım değeri(w/m^2).....	40
Şekil 4.3. 2022 ve 2023 yılı için toplam haftalık doğrudan normal ışınım.....	41
Şekil 4.4. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama yağış oranı.....	41
Şekil 4.5. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama bağıl nem değerleri.....	42
Şekil 4.6. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama rüzgar hızı.....	42
Şekil 4.7. 2022 ve 2023 yıllarındaki toplam haftalık enerji üretimi.....	43
Şekil 4.8. Haftalık ortalama sıcaklık değerleri ve toplam güneş enerjisi üretimi.....	45
Şekil 4.9. Haftalık toplam enerji üretimi, doğrudan normal ışınım (DNI) ve küresel yatay ışınım (GHI).....	46
Şekil 4.10. Haftalık ortalama yağış oranı ve haftalık toplam güneş enerjisi üretimi.	46
Şekil 4.11. Haftalık ortalama rüzgâr yönü ve haftalık toplam güneş enerjisi üretimi... ..	47
Şekil 4.12. Haftalık ortalama bağıl nem ve haftalık toplam güneş enerjisi üretimi.	47
Şekil 4.13. 2022 ve 2023 Kurak Mevsimlerde İlk Dönem için Haftalık Enerji Üretimi Karşılaştırılması.....	50
Şekil 4.14. 2022 ve 2023 kurak mevsimler için birinci temizlik dönem haftalık enerji üretimi karşılaştırması.....	52
Şekil 4.15. 2022 ve 2023 Kurak Mevsimlerde Üçüncü Dönem için Haftalık Enerji Üretimi Karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.16. Gerçek güç çıkışı ile 2022'nin kurak sezonunda her temizlikten sonra güç çıkışı arasındaki karşılaştırma.....	55
Şekil 4.17. 2023'ün kurak sezonu boyunca her temizlikten sonra gerçek güç çıkışı ve güç çıkışı arasındaki karşılaştırma.....	55

Şekil 4.18. Günlük Kirlenme Oranı SRt 2022 ve 2023, 1'den büyük değerler uç değerler olarak kabul edilir ve bu uç değerlerin veri analizi üzerindeki etkisini azaltmak için Theil-Sen kullanılmıştır.	56
Şekil 4.19. Temizlik aralıklarının bir fonksiyonu olarak tozun neden olduğu toplam maliyet.	58
Şekil 4.20. Temizlik döngüsünün bir fonksiyonu olarak tozun neden olduğu toplam maliyet.	59



ÇİZELGELER TABLOSU

Çizelge 2.1. Fotovoltaik Paneller için Toz Birikimi Modellemesi ve Potansiyel Temizleme Yöntemlerinin Kronolojik Gelişimi.....	24
Çizelge 3.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikler	26
Çizelge 3.2. Temel Elektriksel Özellikler.	26
Çizelge 3.3. FV İnvörtörün Temel Özellikleri.....	27
Çizelge 3.4. Pearson korelasyon katsayısının korelasyon derecesi.	34
Çizelge 3.5. Doğrusal regresyon türleri.	35
Çizelge 4.1. Doğrudan Faktörlerin Enerji Üretimi Üzerindeki Etkisine İlişkin Korelasyon Katsayıları.....	44
Çizelge 4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon Modeli Analizi.	48
Çizelge 4.3. 2022 Ve 2023 kuru sezonu için Varyans (ANOVA) analizi.....	49
Çizelge 4.4. Kuru sezonda temizlik aralıkları için kirlenme oranının hesaplanması.	57



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler:

r	: Korelasyon Katsayısı
y	: Bağımlı Değişken
x, x_1, x_2, \dots, x_n	: Bağımsız Değişkenler
$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: Katsayılar (Her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni tahmin etmedeki ağırlığını temsil eder.)
ϵ	: Hata Terimi
SR	: Kirlenme Oranı
$P_{h,t}^0$: Her Temizlik İşlemi Gerçekleştikten Sonra Üretilen Enerji
$G_{h,t}^{poa}$: Gelen Işınımı
G^{STC}	: Standart Koşullar Altındaki Işınımı
γ	: Sıcaklık Katsayısı
$T_{h,t}^{panel}$: Panel Sıcaklığı
T^{STC}	: Standart Test Koşulları (Stc) Altındaki Panel Sıcaklığı
T^{NOCT}	: Üreticinin Belirttiği Birimlerin Nominal Çalışma Sıcaklığı
T^{amb}	: Ortam Sıcaklığı
β	: Theil-Sen Yüzdesi
N	: Veri Noktası Sayısı
y_i ve y_j	: i Ve j Veri Noktaları İçin Yanıt Değişkeni Değerleri
$sign(y_i - y_j)$: y_i Ve y_j Arasındaki Farkın İşaret Fonksiyonu
n	: Temizlik Döngüleri Arasındaki Gün Sayısı
CL_{cycle}	: Temizlik Döngüsü
E_{losse}	: Güneş Enerjisi Santralinde Tozun Neden Olduğu Enerji Kaybı
$E_{Ac,avg,N}$: N Çalışma Döneminde Günlük Enerji Çıkış Oranı
SL	: Kirlenme Kaybı
SR_{rate}	: Kirlenme Oranı
C_{RI}	: FV Modüllerinden Kaynaklanan Toz Nedeniyle Gelir Kaybı
λ_t	: Enerji Fiyatı
C_{cl}	: FV Güneş Enerjisi Tesisi Temizlik Döngülerinin Temizlik Maliyetine Sahip K Tür Temizlik Teknolojisinin Mevcut Olduğunu Varsayar
C_k	: Varsayar
n_{opt}	: Optimum Gün Sayısı
H_0	: Sıfır Hipotezi
P_{DC0}	: Kurulu Kapasite

Kısaltmalar:

BM:	Birleşmiş Milletler
FV:	Fotovoltaik
Mtoe:	Milyon Ton Petrol Eşdeğeri
DC:	Doğru Akım
a-Si:	Amorf Silisyum
CdTe:	Kadmiyum Tellür
CIS/CIGS:	Bakır İndiyum Galyum Selenid
AC:	Alternatif Akım
GHI:	Küresel Yatay Işınım
DNI:	Doğrudan Normal Işınım
DIF:	Yayınık Yatay Işınım
ANOVA:	Varyans Analizi
BDR:	Basit Doğrusal Regresyon
ÇDR:	Çoklu Doğrusal Regresyon
DHI:	Difüz Yatay Işınım
GTI:	Küresel Eğim Işınımı

1 GİRİŞ

1.1 Genel Bakış

Küresel ölçekte, aşırı fosil yakıt tüketimi çevresel krizlere yol açmıştır. Tarihsel olarak odak noktası, çevresel etkileri göz ardı ederek endüstriyel üretimi artırmak olmuştur.

Dünya genelinde tüm ülkeler, fosil yakıtların ve diğer kaynakların kabul edilemez tüketimi nedeniyle karanlık bir tünele girmiştir. Temel düşünce, çevreye ve diğer unsurlara verilen yan zararları dikkate almadan fabrikaları işletmek ve üretimi artırmak olmuştur. Gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerden ve halklarından gelen birçok çağrının ardından, küresel ısınma ve karbon emisyonlarının azaltılması konusu uluslararası zirvelerde öncelikli hale gelmiştir.

Son yıllarda petrol tüketiminin artmasıyla birlikte birçok çevresel sorun ortaya çıkmış, ayrıca petrolün yenilenemeyen ve sürdürülemez bir kaynak olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, dünya çapındaki ülkeler alternatif ve yeni enerji kaynaklarına geçmek zorunda kalmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, sağlık riskleri oluşturmayan, sera gazları açısından çevre kirliliğine katkıda bulunmayan ve sürekli kullanımla tükenmeyen kaynaklardır (Kaygusuz, 2001).

2050 yılına kadar, acil önlemler alınmazsa havadaki CO₂ konsantrasyonlarında önemli bir artış olacağı tespit edilmiştir. Buna yanıt olarak, Birleşmiş Milletler (BM) gibi uluslararası kuruluşlar küresel ısınmayla mücadele etmek için çeşitli önlemler almıştır. 2015 yılında, BM Paris Anlaşması'nı kolaylaştırmıştır (Azzouz vd., 2013)

Anlaşma, yüzyılın sonuna kadar küresel sıcaklık artışının 2 °C veya daha az olması gerektiğini öngörmüştür. CO₂ emisyonlarını hem üretim hem de kaynaktan giderilme açısından verimli bir şekilde azaltmanın kritik yolları olarak çeşitli yöntemler belirlenmiştir. Bu yöntemler arasında enerji tüketiminin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması, alternatif enerji kaynaklarının kullanılması ve karbon yakalama tekniklerinin uygulanması yer almaktadır (X. Zhang vd., 2012).

Yenilenebilir enerji sistemleri, enerjiye temel bir alternatif ve endüstriyel yapı tüketimini düzenlemenin ilk adımıdır (Hassan & Beshara, 2019). Özellikle güneş, rüzgar ve biyokütle gibi çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ekonomisinde önemli roller oynamakta ve modern enerji projelerinin çoğu için temel oluşturmak Heiman and Solomon tadır (Heiman & Solomon, 2004). Gelişmelerle birlikte, dünyadaki tüm ülkelerin yenilenebilir enerji paylarını artırmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için

önemli adımlar attığına ve stratejik planlar yaptığına inanılmaktadır (Bürer & Wüstenhagen, 2009).

Dünya'nın Güneş'ten yıllık olarak aldığı güneş enerjisi miktarı yaklaşık $1,73 \cdot 10^{17}$ watt-saattir. Güneş enerjisi ve güneş ısıtması daha iyi bir yaşam sürmemize yardımcı olan güneş enerjisi kullanım yöntemleridir. Güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürmek için olası bir enerji kaynağı olarak günümüzde yaygın şekilde kabul görmektedir. Fotovoltaik (FV) hücreler, fotovoltaik etki sayesinde enerji üretmektedir (Kaygusuz, 2001).

Genel olarak, güneş paneline ışık düştüğünde, güneş hücreleri üzerlerine düşen ışığın üçte ikisini emer ve güneş ışığının üçte biri panelden yansıtılır. Güneş panelindeki ön cam, panelin en önemli unsurlarından biridir; ışık biriminin gücünü korur ve ışığın güneş hücrelerine geçmesinden sorumludur, bu nedenle paneldeki en ağır elementtir. Bu katmanın kalınlığı, kullanılan özel cama bağlı olarak 2 mm ile 4 mm arasında değişebilir. Bu katmanın temizliğini sağlamak, spektrum geçirgenliği ve ışık geçirgenliği gibi doğal özelliklerinden tam olarak yararlanmak için büyük önem taşır (Azzouz & Roy, 2023).

FV panelleri, verimliliği etkileyen çeşitli faktörler nedeniyle radyan enerjinin tamamını elektrik enerjisine dönüştüremez. Bu faktörler arasında toz birikimi, yüksek sıcaklıklar, güneş spektrumu değişimleri, panel konumlandırması ve eğim açısı yer alır (Vidyanandan, 2017).

Bir güneş FV panelinin operasyonel etkinliği, dış yüzeyindeki partikül madde birikimi nedeniyle önemli bir düşüş yaşar. Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgesi gibi havadaki toz miktarının yüksek olduğu bölgelerde bulunan fotovoltaik paneller, bu kirlenme fenomeninden kaynaklanan önemli sonuçlarla karşılaşmaktadır (Ilse vd., 2016).

1.2 Problem Tanımı

Fotovoltaik tesislerin güç çıkışı, FV modüllerinin temizliği ile güçlü bir korelasyon göstermektedir. Başlıca antropojenik faaliyetlerden ve sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve ortam PM_{10} (havada bulunan küçük parçacıkların bir ölçümü) konsantrasyonu gibi meteorolojik faktörlerden kaynaklanan toz birikimi, FV modül performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Allouhi vd., 2022).

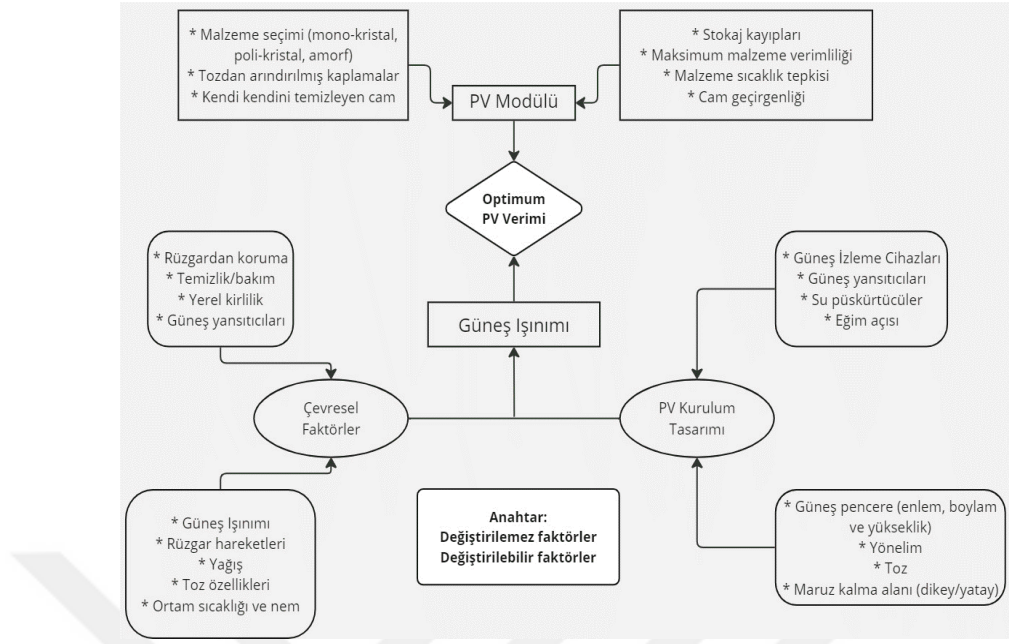
Fotovoltaik güç tahmini araştırma odağı olarak öne çıkarken, Chen ve arkadaşları kritik bir nokta gördükleri toz kirliliğinin gerçek üretim üzerindeki olumsuz etkilerine odaklanmıştır (Chen vd., 2020).

Toz, esas olarak aşınmış kayalardan gelen katı parçacıklardan oluşur ve ana bileşeni silisyumdur. Tozdaki organik elementler bağlayıcı ajanlar olarak işlev görerek

rüzgârla taşınmayı ve tozların birbirlerine yapışmasını kolaylaştırır. Bu organik bileşenler, tozun davranışsal özelliklerini etkileyebilir (Kok vd., 2012).

Toz parçacıkları, atmosferdeki hem doğrudan hem de dolaylı radyatif etkileşimler yoluyla Dünya'nın iklim-enerji dengesinin korunmasında kritik bir rol oynar (Shao vd., 2011). Atmosferdeki tozun doğrudan etkileri, radyasyonun dağılımını ve asimilasyonunu kapsar (Miller vd., 2004). Tozun bulutlarla dolaylı etkileşimi ise toz parçacıklarının bulut oluşumunu başlatmasıyla ilgilidir (Gu vd., 2012; Saidou Chaibou vd., 2020). Ayrıca toz, besin maddelerinin okyanus taşınımını kolaylaştırarak biyojeokimyasal döngüyü etkiler (Choobari vd., 2014) ve kirletici olarak solunması insan sağlığı üzerinde zararlı etkilere neden olabilir (Morman & Plumlee, 2014; X. Zhang vd., 2016). Toz döngüsü, parçacık salınımı, atmosferik taşınma ve ardından parçacıkların (hem kuru hem de ıslak yollarla) çökme aşamalarını kapsar ve tipik olarak 500 µm'nin altındaki boyutlarla karakterize edilir. Toz döngüsünün dinamikleri, özellikle kurak bölgelerde meteorolojik ve iklimsel faktörlerden önemli ölçüde etkilenir (Middleton, 2017). Yıllık bazda, küresel olarak yaklaşık 2000 metrik ton toz salınmakta, bunun %75'i karasal yüzeylere çökerken, kalan %25'i okyanuslar üzerine dağılmaktadır (Ginoux vd., 2012; Shao vd., 2011). Tozun okyanus yüzeylerinde birikmesi karbon emilimi ve tutulma süreçlerini artırabilmektedir (Pabortsava vd., 2017), kara kütlelerinin üzerinde birikmesi ise güneş panellerinin uzun süre boyunca bozulmasına yol açabileceğinden, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerinde olumsuz etkileri olabilmektedir (Li vd., 2020a).

FV sistemlerinin geleneksel olarak optimal enerji üretimi için tasarlanması beklenmektedir. Maksimum gücün elde edilmesini etkileyen değişkenler, değiştirilebilir ve değiştirilemez faktörler olarak sınıflandırılabilir. Ayarlanabilir faktörler, çeşitli kurulum ön koşullarını takiben tasarım uyarlanabilirliği için fırsatlar sunarken, değiştirilemez faktörler varsayılan yaklaşım olarak doğal bir değerlendirme gerektirir (Mani & Pillai, 2010a).



Şekil 1.1. Bir FV sistemin maksimum verimini etkileyen faktörler, ayarlanabilir ve değiştirilemez olarak kategorize edilebilir

Tozun özellikleri, güneş paneli verimliliği üzerindeki etkisini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Dikkate alınması gereken bazı önemli özellikler arasında partikül boyutu, bileşim, yapışkanlık ve yoğunluk bulunmaktadır. Tozun fotovoltaiik (FV) paneller üzerindeki birikiminin etkisi, hâkim hava koşullarına ve partikül boyutlarına bağlıdır. Ayrıca, FV paneller tarafından üretilen elektriksel çıktı, coğrafi konuma, toz bileşimi özelliklerine ve çevresel sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, belirli bir ülkede elde edilen araştırma bulgularının farklı coğrafi bölgelerde evrensel olarak uygulanamayabileceğini kabul etmek son derece önemlidir (Khilar vd., 2022).

Mevcut araştırma literatürü, toz birikiminin önemli bir sorun olduğunu ve önemli elektriksel ve ekonomik kayıplara yol açtığını açıkça vurgulamaktadır. Sonuç olarak, tozun neden olduğu kayıpları hızla ele alma zorunluluğu, FV sistem çıktısını optimize etmek için acil eylem çağrısı yaratmaktadır. Bu itici güç, etkili toz giderme sistemlerinin yenilikleri için acil bir ihtiyaç doğurmaktadır. Toz azaltımı için çeşitli yöntemler sunulmuş olsa da bunların etkinliği, temizleme işlemlerinin uygulanmasını takiben enerji ve güç artışı üzerindeki sınırlı etkileriyle kanıtlanmıştır.

Zaman ilerledikçe, güneş paneli yüzeyleri genellikle polen, toz, kir, pislik ve kuş dışkısı gibi çeşitli kirleticilerle kaplanmaktadır. Tipik olarak, bu tür kirleticilerin

birikmesi, güneş enerjisi çıktısında yaklaşık %10-15 oranında bir azalmaya neden olmaktadır. Çoğu güneş panelinin operasyonel ömrünün 30 yıl veya daha fazla olduğu göz önüne alındığında (Mani & Pillai, 2010b), güç üretimini istikrarlı ve periyodik tutmak için bir temizleme programı gerekmektedir.

1.3 Tez Amaçları ve Hedefleri

Bu tezin ana hedefleri şunlardır:

- Türkiye'nin Konya ilinde bulunan bir işletme üzerinde kullanılan güneş enerji santralinin verimliliğini değerlendirmek.
- Kirlenme oranını tahmin etmemizi sağlayacak gerekli verileri sağlayarak, toz birikiminin bu paneller üzerindeki etkisini incelemek.
- Temizlik sıklığının fotovoltaik sistem verimliliği üzerindeki etkisini belirlemek ve temizlik işleminin gereken sıklığını tespit etmektir.

Bu araştırma, temiz olmayan paneller nedeniyle oluşabilecek enerji kaybına kıyasla optimal tekrar temizleme periyodunu belirlemeye yönelik olarak yürütülmüştür. Temizlik sıklığını artırmanın insan kaynakları, ekipman ve enerji açısından ek maliyetleri ile gecikmiş temizlik nedeniyle oluşan enerji kaybının maliyeti arasındaki hassas denge, ölçülen verilerle belirlenmiştir.

Çalışmanın sonucu, güneş panellerinin bulunduğu konumdan 23 ay boyunca elde edilen bir veri tabanına dayalı matematiksel bir model kullanarak fotovoltaik temizliğin sıklığını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu, piyasada mevcut temizlik tekniklerinden birini kullanarak güneş panellerinde toz birikimi sorununu çözmek için optimal karar vermeyi kolaylaştırmaktadır.

1.4 Tez Yapısı

Bölüm 1, yürütülen çalışmanın araştırma içeriğinin önemini vurgulamaktadır ve araştırma hakkında genel bilgi içermektedir. Ardından problem beyanı, araştırma hedefi ve çalışmanın amacı konuları ele alınmaktadır. Ayrıca, araştırma yürütülürken karşılaşılabilecek muhtemel kapsamı da içermektedir.

Bölüm 2, literatür taraması olarak kabul edilen önemli bir bölümü içermektedir. Başlayan teorik bileşen, çeşitli araştırmacılar ve makaleler aracılığıyla elde edilen tüm kavramsal fikirleri birleştirme eğilimindedir. Bu, araştırma içeriği materyalleriyle ilgili temel bilgileri sağlamaya yardımcı olmuştur.

Bölüm 3, verileri işlemek ve kullanmak için yararlanılan mekanizmayı, araştırmada izlenen metodolojik yöntemleri ve verilerin nasıl analiz edildiğini açıklamaktadır.

Bölüm 4, veri analizinden elde edilen bulguları, doğru karar alma sürecini ve araştırma sırasında karşılaşılan zorlukları özetlemektedir. Ayrıca, çalışmanın yürütüldüğü güneş enerjisi santralini temizleme kararının finansal analizini içermektedir.

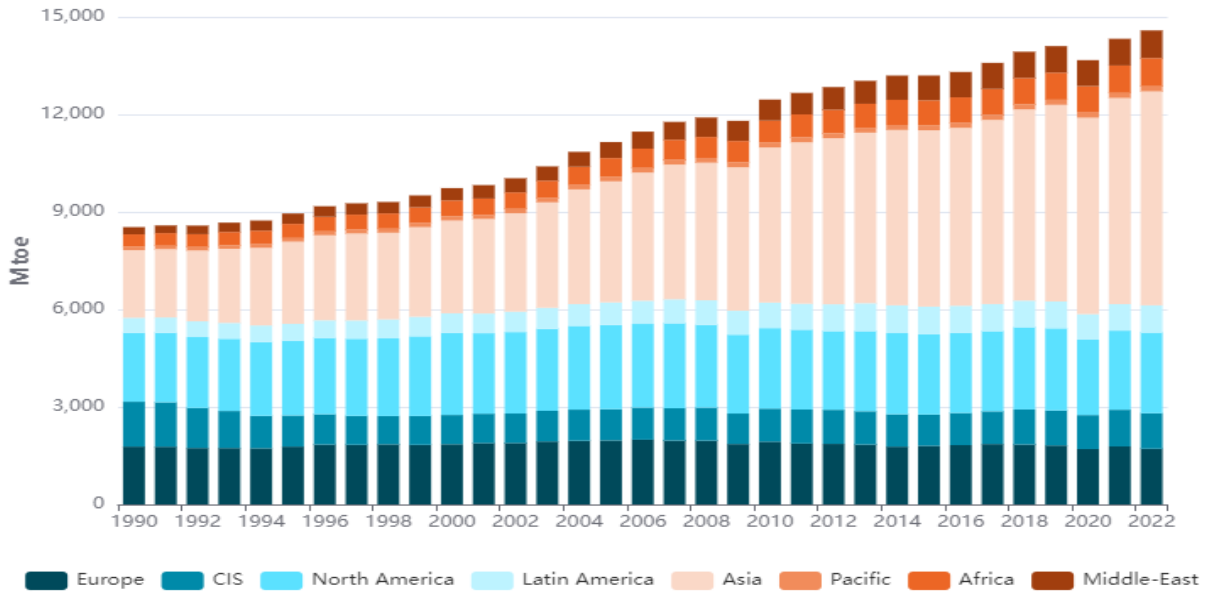
Bölüm 5, deneyimlenen bulguları ve bu bulgulara dayalı olarak gelecekteki araştırmalar için önerileri sunmaktadır.



2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

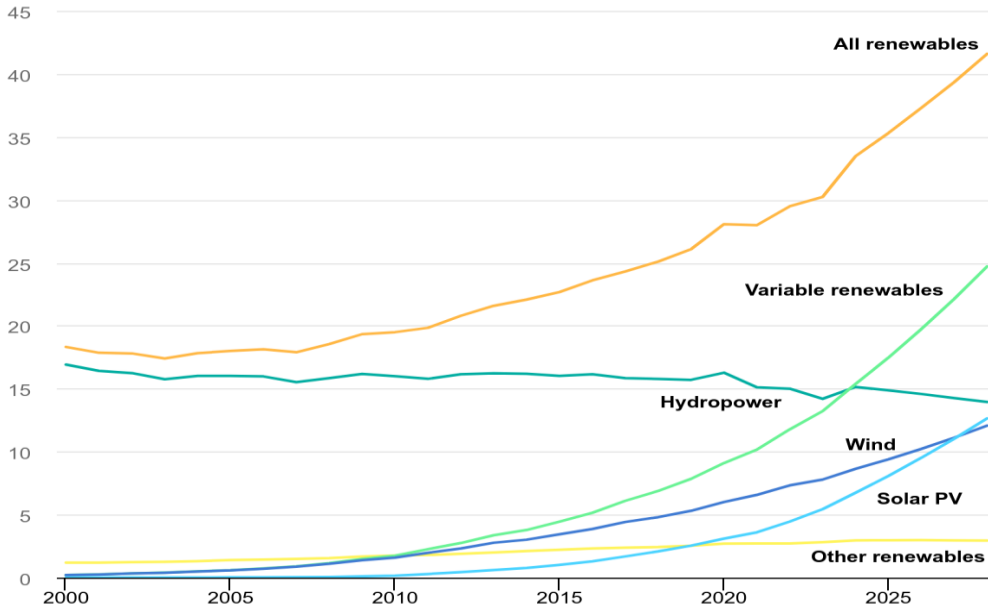
2.1 Giriş

Hızlı ekonomik büyüme, sanayileşme ve nüfus artışı, enerji tüketimi ve talebinde önemli bir artışa neden olmuştur (Hasanuzzaman vd., 2017). 'Global Energy Statistical Yearbook 2023' raporuna göre, toplam enerji tüketimi 1990'da 8.561 milyon ton petrol eşdeğerinden (Mtoe) 2022'de 14.429 Mtoe'ye çıkarak %40,7 oranında artmıştır. Benzer şekilde, terawatt-saat (TWh) cinsinden ölçülen küresel elektrik tüketimi aynı dönemde 9.984 TWh'den 25.530 TWh'ye yükselerek %60,89 oranında artış göstermiştir. Şekil 2.1, farklı bölgeler arasındaki elektrik tüketiminde önemli farklılıkları ortaya koymaktadır (Global Energy Statistical Yearbook, 2023).



Şekil 2.1. 1990'dan 2022'ye kadar dünya toplam enerji tüketimi.

Fosil yakıtlar hâlen küresel enerji ihtiyacının çoğunu karşılamaktadır (Abas vd., 2015). Ancak yanmaları sonucu açığa çıkan CO₂ buzul erimesi, aşırı hava olayları ve okyanus asitlenmesi gibi iklim ve sağlık üzerinde zararlı sonuçlara yol açmaktadır (Riffat & Mardiana, 2015). Bu durumun farkına varılmasıyla, karbon emisyonlarını azaltmak ve enerji talebini karşılamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik küresel bir geçiş süreci başlamıştır. Yenilenebilir enerji sektörü hızlı bir büyüme göstermekte olup, halihazırda toplam enerji tüketiminin %30'unu karşılamaktadır ve Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre 2028 yılına kadar bu oranın %42'ye ulaşması beklenmektedir (Şekil 2.2) (International Energy Agency, 2023).



Şekil 2.2. 2000-2028 yılları arasında küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji sektörünün yıllara göre payları.

Tüm yenilenebilir enerji teknolojileri arasında, fotovoltaik (güneş enerjisi) en hızlı büyümeyi göstermektedir. Bu büyüme, hızla düşen maliyetler, artan verimlilik ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve çevrenin korunmasına olan önemli katkılarından kaynaklanmaktadır (Kavlak vd., 2018).

2010 yılından bu yana fiyatlarda görülen %70'lik düşüş, kamu ölçekli FV pazarını dönüştürmüş, güç üretimini 460 TWh artırmış ve küresel payını %2'ye yükseltmiştir. Çin ve Güneydoğu Asya'da üretimin artması ve yoğun rekabet nedeniyle, önümüzdeki yıllarda güneş enerjisinin daha da ucuzlaması beklenmektedir. Çin, dünya FV modüllerinin üçte ikisinden fazlasını üreterek pazara hâkim durumdadır. ABD ikinci sırada yer alırken, onu yıllık kurulumlarını 9,6 GW'a çıkaran Hindistan takip etmektedir. Avrupa ise yılda 6 GW ekleyerek daha istikrarlı bir büyüme göstermiştir (International Energy Agency, 2023).

Güneş enerjisi, çevresel dayanıklılığı nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Rüzgâr ve yağmurun aksine, güneş ışığının dalgalanması enerji üretimi üzerinde daha az etkiye sahiptir. Bu istikrar, Allouhi ve arkadaşları tarafından belirtilen yıllık %21'lik hızlı küresel büyüme ile birleştiğinde, güneş enerjisini fosil yakıtların yerini almak ve çevresel zararı azaltmak için öncelikli bir aday haline getirmektedir (Allouhi vd., 2022). Dolayısıyla, güneş panelleri aracılığıyla yenilenebilir

enerji üretimi, elektrik üretimi için sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Ancak, umut verici gelişmelere rağmen, çoğu panelin %23'ün altında verimliliğe sahip olması nedeniyle, genel çıktıyı optimize etmek bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Güneş radyasyonu, ortam sıcaklığı, toz birikimi ve rüzgâr hızı gibi temel çevresel parametreler, FV sistem performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Alami vd., 2022). Toz birikimi, kritik bir performans faktörü olarak ortaya çıkmakta ve güneş paneli çıktısının gücünü en üst düzeye çıkarmak için etkili temizleme önlemlerinin derhal benimsenmesini gerektirmektedir. Sonraki bölümlerde, toz ve kül birikiminin güneş panelleri üzerindeki etkileri ele alınacaktır.

2.2 Çalışmanın Temelleri

2.2.1 Yenilenebilir Enerji ve Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla önemli çevresel avantajlar sunmaktadır. Önemli miktarda atık üreten, sera gazları ve sağlığa zararlı kirleticiler yayan kömür ve petrol bazlı santrallerin aksine, güneş enerjisi zararlı yan ürünler olmaksızın temiz elektrik üretmekte, böylece sürdürülebilirliği ve halk sağlığını desteklemektedir (Grover, 2007; Gunerhan vd., 2009). Güneş, gelecek nesillerin enerji ihtiyaçlarını sürdürülebilir şekilde karşılayabilir. Bolluğu ve çevre dostu yapısı, temiz enerji için parlak bir gelecek vaat etmektedir (Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016; Shaikh vd., 2017).

Yenilenebilir enerjinin istihdam üzerindeki etkisi hakkındaki tartışmalar devam etmekle birlikte, küresel anket verileri umut verici bir eğilime işaret etmektedir. Yenilenebilir enerji talebinin artmasıyla birlikte, fotovoltaik sektörü, bölgesel farklılıklar göstermekle beraber, küresel ortalamanın üzerinde bir hızla istihdam yaratmaktadır (Lambert & Silva, 2012).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının geleneksel seçeneklere göre üstünlüğü belgelenmiştir. Çevresel ve maliyet avantajlarının ötesinde, yenilenebilir kaynakları enerji bağımsızlığı yönü ile ciddi bir avantaj sunmaktadır. Genellikle uluslararası ticareti gerektiren ve diğer ülkelere bağımlılık yaratan fosil yakıtların aksine, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklar, ülkelerin kendi elektriklerini üretmelerine olanak tanıyarak enerji güvenliğini sağlamalarına ve potansiyel jeopolitik riskleri azaltmalarına imkân vermektedir (Johansson, 2013).

Fotovoltaik (FV) panellerin maliyeti, 1877'den bu yana 100 kat azalarak dikkat çekici bir dönüşüm geçirmiştir. Güneş enerjisinin ekonomik cazibesi giderek artmaktadır. Hızla düşen maliyetler ve tüketicileri değişken enerji fiyatlarından koruma yeteneği ile

güneş enerjisi, elektrik üretimi için hızla rekabetçi ve çekici bir seçenek haline gelmektedir. 2020 yılında fiyatın kWh başına 0,03 dolara ulaşması, güneş enerjisinin artan uygunluğunu ve potansiyelini vurgulamaktadır (The International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017).

Güneş enerjisi, temiz bir ilerleme yolu sunmaktadır. İklim değişikliğinin etkilerini azaltmak ve 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu ulaşmak için yenilenebilir enerjiye yönelimin artırılması gerekmektedir. 2021 ile 2030 yılları arasında yenilenebilir enerji üretiminde yıllık %12'lik bir artış, dünyanın ideal ve arzu edilen seviyelerine ulaşmanın anahtarıdır (Myas vd., 2022). Enerji geleceği bir dönüm noktasındadır. Geleneksel kaynaklar hâlâ etkisini sürdürürken, önümüzdeki 20 yıl içinde küresel enerji talebinde %48'lik dramatik bir artış beklenmektedir. Bu durum, yenilenebilir enerjiyi ön plana çıkarmaktadır (Moodley, 2021).

Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2023 yılı kurulu güç verilerine göre, yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru önemli bir yönelim gözlenmektedir. Toplam kurulu kapasite yaklaşık 2,9 GW artmış olup, bu artışın %99,5'i yenilenebilir kaynaklardan gelmektedir. Güneş enerjisi 1,9 GW ile başı çekerken, bunu 400 MW ile rüzgâr ve 300 MW ile hidroelektrik takip etmiştir. Bu genişleme, toplam yenilenebilir kapasiteyi 59 GW'a (toplam kurulu kapasitenin %55'i) çıkarmıştır. Güç üretimi açısından, yenilenebilir kaynaklar 326,3 TWh'lik toplam üretimin %42'sini (137 TWh) oluşturmuştur. Türkiye, sürdürülebilir enerjiye olan bağlılığını pekiştirmek amacıyla 2035 yılı için iddialı hedefler belirlemiştir. Kurulu kapasitedeki yenilenebilir payını %65'e, üretimdeki payını ise %55'e çıkarmayı amaçlamaktadır (EnerData, 2023).

Raporlar, enerji tüketimi ve üretimi arasındaki endişe verici uyumsuzluğa dikkat çekmekte ve bunun önemli arz açıklarına yol açtığını vurgulamaktadır. Bu kritik sorunu çözmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına sağlam bir geçiş zorunludur. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, kendine özgü avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bazı biyokütle bazlı yenilenebilir kaynaklardan farklı olarak, verimli toprak gerektirmemekte ve ihmal edilebilir düzeyde emisyon üretmektedir. Ayrıca, uzun kullanım ömrü ve minimum bakım maliyetleri, onu yenilenebilir enerji yelpazesi içinde son derece çekici ve sürdürülebilir bir seçenek haline getirmektedir.

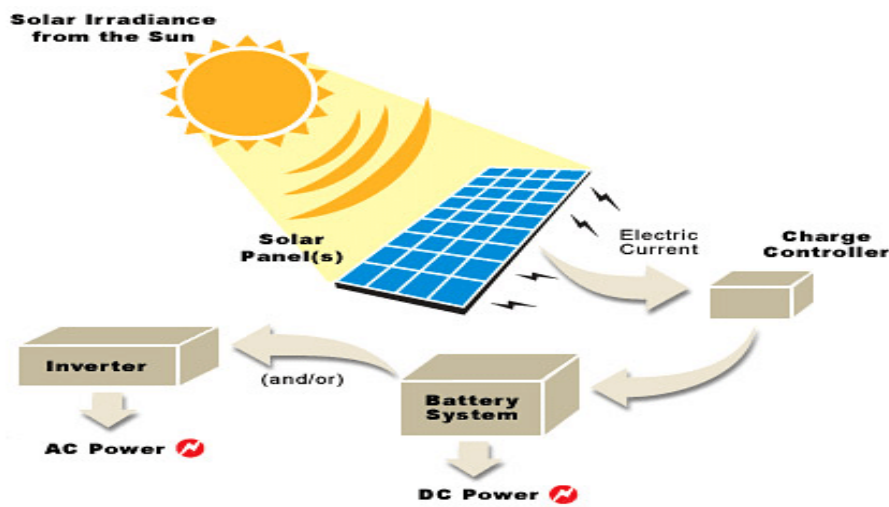
2.2.2 Fotovoltaik Sistem

Fotovoltaik hücrelerin ortaya çıkışı 1954 yılına dayanmaktadır ve bu, P-N eklemlerine dayalı güneş hücrelerini sergileyen D. Chapin, C. Fuller ve G. Pearson'ın öncü çalışmaları ile literatüre girmiştir. Bu hücreler %5-6 verimlilik aralığına ulaşmıştır

(Lewis vd., 2005). Yarı iletken varlıklar olarak işlev gören FV hücreleri, güneş radyasyonundaki enerjiyi doğru akım (DC) elektriğe dönüştürme kapasitesine sahiptir (Husain vd., 2018).

Güneş radyasyonu hücrenin yüzeyine çarptığında, bu enerji elektrik enerjisine dönüşmektedir. Bu güneş ışığının elektriğe dönüşümüne fotovoltaiik etki denir (Chapin, 1954; J. Zhang vd., 2013). Güneş panelleri, güneş enerjisini kullanılabilir elektriğe dönüştürmede temel bir rol oynamaktadır ve ışık enerjisinin temel birimleri olan fotonları kullanarak bu dönüşümü gerçekleştirir. Bu paneller, güneş ışığının fotonlarını yakalayıarak fotovoltaiik etki adı verilen bir süreci başlatmaktadır. Bu etki, güneş panelinin kapalı devre konfigürasyonunda elektrik voltajı veya akımı üretmenin temelini oluşturur (Ansley & Steven R, 2005). Güneş panelleri fotonlara maruz kaldığında, elektronlar ait oldukları atomik enerji bantlarında hareket eder. Bu elektron hareketi, iki elektrot arasında bir voltaj farkı yaratacak şekilde birikime neden olur. Fotovoltaiik sistemler, gelen ışığı verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürerek pratik davranış sergilemektedirler (Addington & Schodek, t.y.).

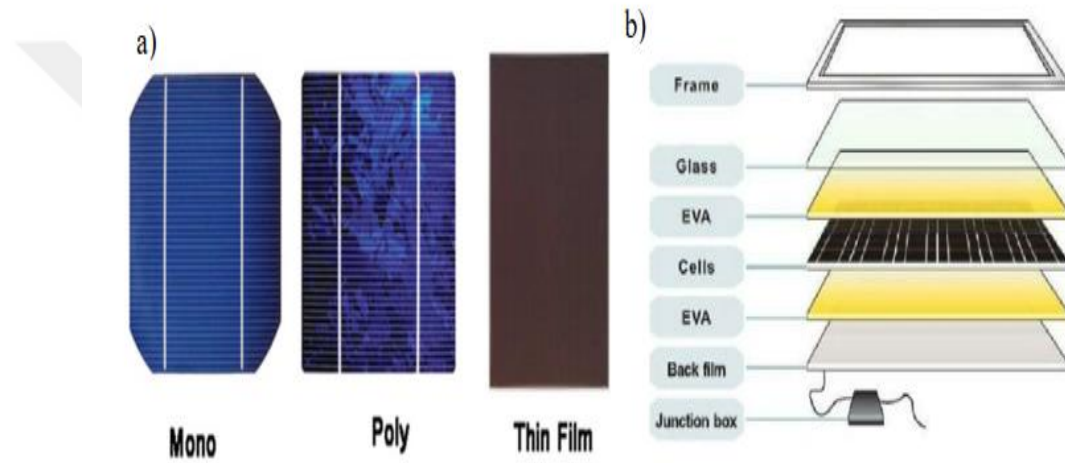
FV hücreleri, erişilebilir spektrumda gelen güneş radyasyonunun %80'ine kadarını kullanabilir. Dönüştürülebilir radyasyonun çoğu görünür spektrumda yer alırken, uç dalga boyları elektrik enerjisi dönüşümüne çok az katkıda bulunmaktadır (Makki vd., 2015). Fotovoltaiik (FV) süreç, güneş enerjisini kullanarak doğru akım (DC) elektriğine dönüştürür. Bu DC güç, üretilen enerjiyi yöneten şarj kontrol cihazına bir dizi kablo aracılığıyla ulaşır, bu süreç Şekil 2.3'te gösterilmektedir (Mohiuddin vd., 2017).



Şekil 2.3. Güneş enerjisi dönüşüm süreci.

2.2.3 Fotovoltaik Güneş Panelleri

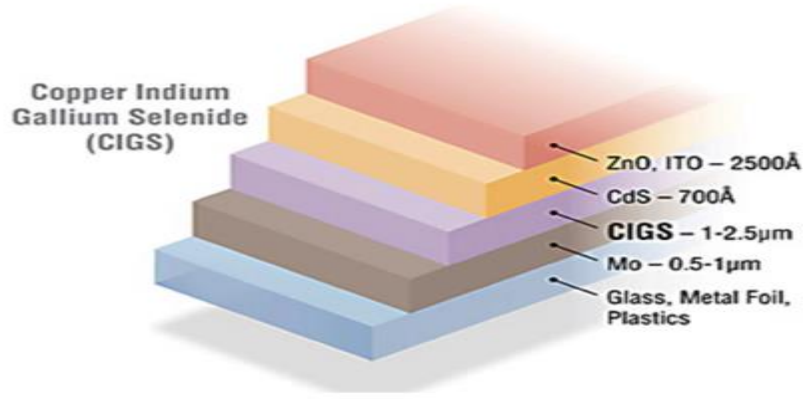
Fotovoltaik güneş panelleri, ya da modüller, fotovoltaik etkiyi kullanarak ışık enerjisinin elektriğe dönüşümünü sağlamak üzere tasarlanmış güneş hücrelerini kapsar. Genellikle, güneş hücreleri, kullanılan yarı iletken malzemelerden adını almaktadır. Güneş panelleri, bileşen güneş hücrelerine göre üç ana nesile ayrılır. Birinci nesil, geleneksel ya da konvansiyonel olarak sınıflandırılan ve en yaygın olarak kullanılan fotovoltaik güneş panellerini içerir. Bu grupta, monokristal ve polikristal çeşitler gibi kristalin silisyum bazlı güneş hücrelerine sahip paneller yer alır ve bu yapı Şekil 2.4'ta gösterilmiştir (Bagher vd., 2015).



Şekil 2.4. a) Geleneksel güneş hücrelerinin tipleri b) Monokristal güneş paneli yapısı.

İkinci nesil, ince film güneş panelleri etrafında döner. bu panellerde güneş hücreleri, plastik, cam veya metal gibi alt tabakalara ince katmanlar halinde biriktirilerek oluşturulur. Özellikle, ince film teknolojisi, ticari alanda mevcut üç yarı iletken malzemeyi içermektedir. Bunlar amorf silisyum (a-Si), kadmiyum tellürür (CdTe) ve bakır indiyum galyum seleniddir (CIS/CIGS) ve bu yapı Şekil 2.5'te görselleştirilmiştir.

Üçüncü nesil, organik ve inorganik malzemelerle ince film teknolojisini kullanan ve geliştirmekte olan fotovoltaik güneş panellerini temsil eder. Bu paneller hala geliştirme aşamasında olup ticari olarak mevcut değildir (Bagher vd., 2015).



Şekil 2.5. CIGS güneş hücrelerini oluşturan beş katmanı gösteren grafik.

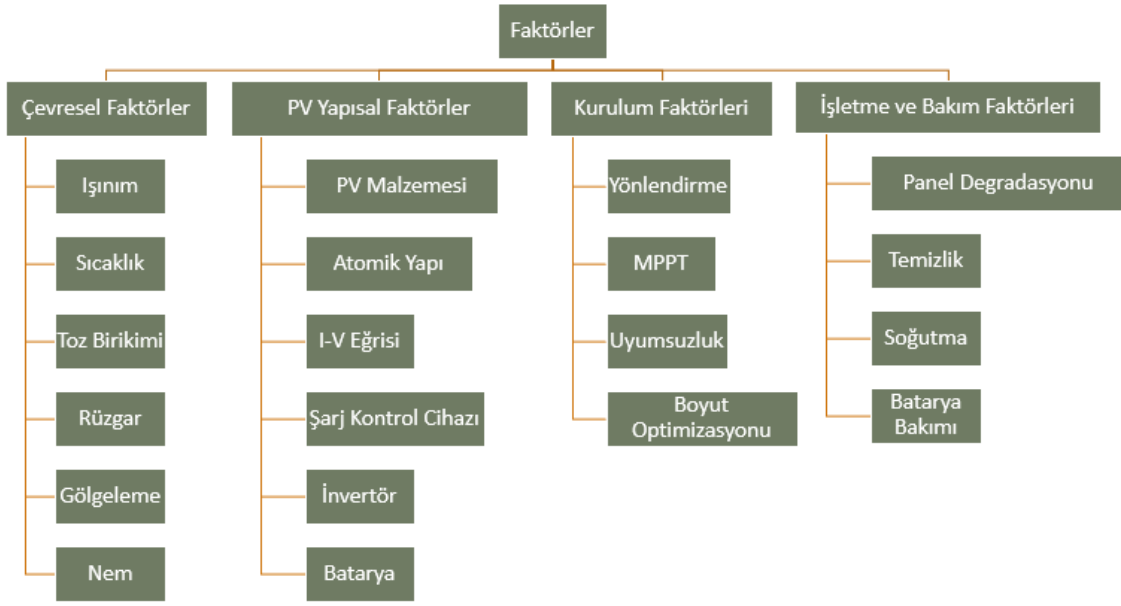
2.2.4 Güneş Hücresi Verimliliği

Güneş verimliliği, ışık enerjisinin kullanılabilir elektriğe dönüştürülebilir oranının bir ölçüsüdür. Fotovoltaik (FV) güneş panelleri bağlamında, "verimlilik" terimi, gelen ışığın modülün tamamı tarafından elektrik enerjisine dönüştürülen miktarını ifade eder (Yu & Chen, 2009).

Bir güneş FV panelinin azalan verimliliği, hücreler arası boşluklar ve güneş ışığının yansımaya katkıda bulunan cam kaplama gibi faktörlere atfedilmektedir. Dolayısıyla, güneş paneli verimliliğinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi önem arz etmektedir, zira bu, bir güneş enerjisi sisteminden elde edilebilecek gerçek elektrik çıktısının belirleyicisi olarak işlev görmektedir (Hoff vd., t.y.).

2.3 Fotovoltaik Dönüşüm Verimliliğini Etkileyen Parametreler

Fotovoltaik (FV) paneller, fosil yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif sunmakla beraber verimlilik sorunları yaşamaya devam etmektedir. Teorik olarak maksimum verimlilik %29'a ulaşsa da gerçek dünya uygulamaları nadiren %26'yı aşmaktadır (Dewi vd., 2019). Şekil 2.6, çevresel koşullar, panelin içsel sınırlamaları, yanlış kurulum ve yetersiz işletim ve bakım uygulamaları gibi performans farkından sorumlu faktörleri vurgulamaktadır. Panel tasarımı ve kurulumu konusundaki ilerlemeler içsel engelleri hafifletmektedir, ancak dış çevresel etkileri yönetmek önemli bir zorluk olarak kalmaktadır.



Şekil 2.6. FV panel verimliliğini etkileyen faktörler.

❖ FV Teknolojisi

Çeşitli FV teknolojileri bulunmaktadır ve elektrik üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında monokristal ve polikristal gibi kristalin silisyum tipleri ile amorf silisyum, CdTe, CIS ve CIGS gibi diğer ince film teknolojileri bulunur. Her teknoloji, belirli coğrafi bölgeler için uygundur (Udayakumar vd., 2021). İnce film teknolojisi, yüksek sıcaklık bölgelerinde kristalin teknolojisinden daha iyi performans gösterirken, kristalin teknolojisi orta ila düşük sıcaklık bölgelerinde daha verimlidir (Aslam vd., 2022).

❖ Güneş Radyasyonu

Bir FV sisteminin enerji üretimi, güneşten gelen güneş radyasyonu tarafından doğrudan etkilenir. FV modüllerinin güneş radyasyonunu daha fazla emmesi, daha yüksek enerji çıktısı ile sonuçlanmaktadır (Sarannya & Manoj, 2021). Çeşitli araştırma bulguları, güneş radyasyonu ve güç çıktısı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir (Mondol vd., 2007). Optimal güç üretimi için FV modülleri güneşe doğru yönlendirilmelidir. Çalışmalar, güneyden her derece sapma için özellikle azimutal yönde %0.08 güç kaybı olduğunu göstermektedir (Mondol vd., 2007). FV panelleri tarafından üretilen elektrik gücü, güneş radyasyonundaki artışla paralel olarak artar (Ramadhan vd., 2021). Özetle, güneş ışınımı, bir FV sisteminin güç kalitesi özellikleri üzerinde önemli ve doğrudan bir etkiye sahiptir (Patsalides vd., 2007).

❖ Ortam ve Hücre Sıcaklığı

Fotovoltaik sistemler güneş radyasyonunu tamamen kullanamaz, bu da fazla radyasyonun ısıya dönüşmesine ve FV modüllerinin aşırı ısınmasına neden olur. FV sisteminin güç üretim kapasitesine zarar veren diğer bir çevresel faktör, ortam sıcaklığıdır (Roy vd., 2019). Ortam sıcaklığı arttıkça, modülün yüzey sıcaklığı da artar. Bu hücre sıcaklığındaki artış, FV sisteminin çalışma voltajını ve güç çıktısını azaltır (Talaat vd., 2022). Araştırmalar, çalışma sıcaklığındaki her 1°C artış için FV hücrelerinin % 0.5 verimlilik kaybı ve 2.2 mV voltaj düşüşü yaşadığını göstermektedir (Meral & Diner, 2011).

❖ Eğik Açı Yönelimi

Optimal güneş radyasyonu Emilimi, FV modüllerinin gelen güneş ışığına dik olarak kurulduğunda sağlanır (Aslam vd., 2021). Genellikle, modül kurulum kriterleri bölgenin enlem açısına dayanmaktadır (Bakirci 2012). Kış ve yaz aylarında, eğik açı için kabul edilebilir sapma sırasıyla +15° ve -15°'dir (Viitanen, 2015). Enlem açısındaki sapmalar arttıkça güneş radyasyonu Emilimi azalır ve FV modülünün güç üretim kapasitesi düşer. Eğik açıları yılda altı kez ayarlamak, güneş radyasyonunun % 99.5'inin yakalanmasını sağlamaktadır (Kaddoura vd., 2016). Sonuç olarak, FV panellerinin eğik açısı konuma bağlıdır ve yerel olarak belirlenmektedir.

❖ Gölgeleme

FV panelleri üzerindeki gölgelerin etkisi FV güç üretimini azaltabilmektedir (Fouad vd., 2017). Gölgeleme, yakınlardaki yapılar (ör. ağaçlar, direkler) ve geçici engeller (ör. kuşlar, dışkılar, düşen yapraklar) nedeniyle oluşabilir. Hücreler seri bağlı olduğu için gölgelenmiş hücrelerdeki akım akışı durur ve bu da gölgelenmemiş hücrelerdeki akım akışının durmasına neden olur. Güneş panellerini yerleştirmek için doğru yeri seçmek ve modern güneş takip sistemlerini kullanmak, gölgeleme nedeniyle güç kaybını azaltabilmektedir (Louis vd., 2016). Bir çalışma, panel alanının sadece %2'si gölgelendiğinde bile panelin performansının %70 oranında azaldığını göstermiştir (Kawamura vd., 2003). Başka bir çalışma, dizi alanının %5-10'unun gölgelendiğinde, dizinin performansının %80'e kadar azalabileceğini saptamıştır (Viitanen, 2015). Diğer bir çalışma ise, farklı hücre türlerinin gölgelendiği durumda %59 ile %73 arasında güç kayıpları yaşandığını tespit etmiştir (Alonso-García vd., 2006). Panel gölgelemesi, bitişik binaların yükseklikleri, yakınlardaki ağaçlar ve paneller arası gölgeleme etkilerinden etkilenmektedir.

❖ Rüzgar

Rüzgar hızı ve yönü, FV modül performansını önemli ölçüde etkiler (Abiola-Ogedengbe vd., 2015). Bu etki, modül sıcaklığı, yüzey yapısı ve toz birikimi gibi çeşitli faktörler tarafından yönlendirilir (Said vd., 2018). Konvektif ısı transferi için doğal rüzgar akışının kullanılması, en maliyet-etkin soğutma yaklaşımını sunmaktadır (Vasel & Iakovidis, 2017). Artan rüzgar hızının FV hücre sıcaklığı üzerinde rüzgar yönünden daha belirgin bir etkisi olduğu kaydedilmiştir (Hasan vd., 2022). Yüzey şekli ve yapısı da konveksiyon soğutmasında önemli bir rol oynar. Dokulu ve oluklu cam kaplamalar, yüksek rüzgar hızlarında daha iyi performans gösterirken, düşük rüzgar hızlarında düz yüzeyler üstün soğutma sağlar. Çalışmalar, 10 m/s rüzgar hızında oluklu cam kaplama kullanmanın işletim sıcaklığını 3.5°C azaltabileceğini göstermiştir (Doble vd., 2010).

❖ Nem

Bağıl nem, su damlası ve buhar birikimini teşvik ederek güneş paneli verimliliğini önemli ölçüde etkiler ve güneş ışığını yakalamayı engeller (Mekhilef vd., 2012). Yüksek nem seviyeleri, güneş hücrelerinden güneş ışığını kıran, yansıtan veya dağıtan su damlacıklarının oluşumuna neden olarak verimliliği azaltır. Ayrıca, nem nedeniyle radyasyonun yoğunluğu, daha küçük su buharı parçacıklarının neden olduğu artan saçılma açıları nedeniyle etkilenmektedir (Gwandu & Creasey, 1995). Uzun süreli nem maruziyeti, nemin güneş hücrelerine nüfuz etmesi nedeniyle FV modüllerinde korozyona neden olabilir (Mekhilef vd., 2012). Ayrıca, modül muhafazasında nemin tutulması, elektriksel iletkenliği ve kaçak akımları artırabilir (Ndiaye vd., 2013).

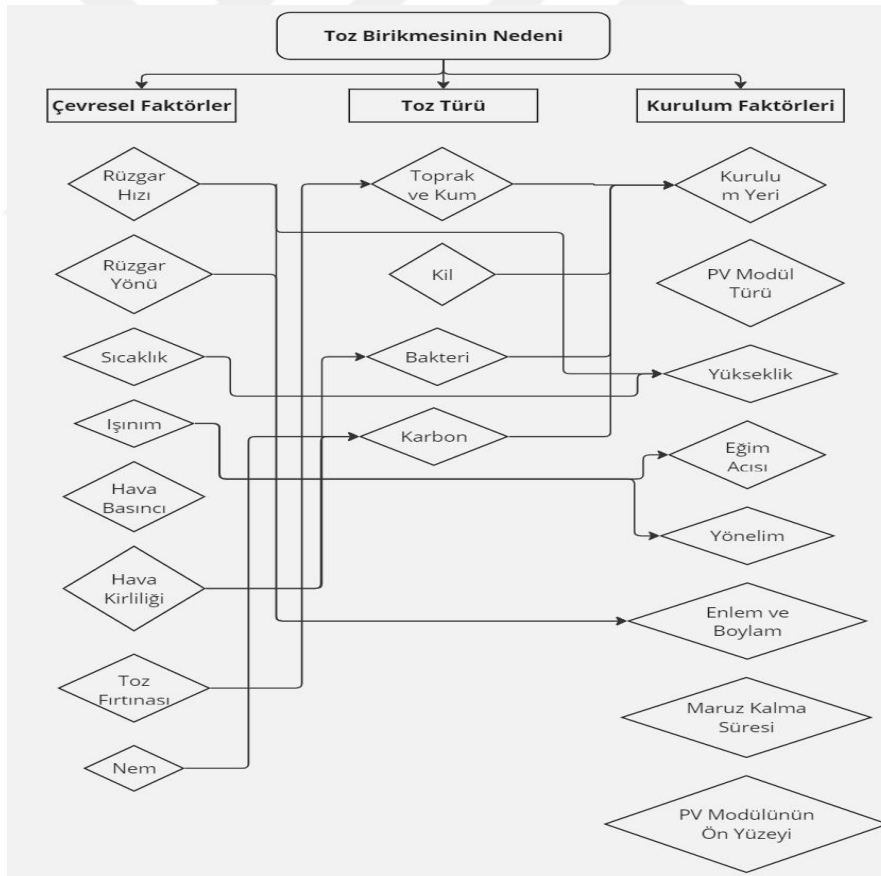
Dahası, kaplama maddesi ile güneş hücresi malzemeleri arasındaki arayüzde su yoğunlaşması, artan korozyon oranlarına ve kapsülleyici delaminasyon potansiyeline yol açar (Abiola-Ogedengbe vd., 2015; Gwandu & Creasey, 1995; Ndiaye vd., 2013). Modül performansındaki bozulma, etkili hermetik sızdırmazlıklar veya düşük difüziviteye sahip nem tutuculu kapsülleyiciler kullanılarak hafifletilebilmektedir (Kempe, 2006). Yüksek bağıl nemin varlığı, FV yüzeylerinde yapışkan ve çimentolu toz katmanlarının oluşumunu teşvik eder (Kempe, 2006; Ndiaye vd., 2013), bu da kirlenmeye ve dolayısıyla güç çıktısında azalmaya yol açar (Adinoyi & Said, 2013)

❖ Toz Birikimi

Bir FV modülünün yüzeyindeki ince bir toz tabakası, güneş ışığını engelleyerek performansını azaltır (Saidan vd., 2016). Fotovoltaik modüllerde toz birikimi, çevresel koşullar, tozun özellikleri ve FV modülünün kurulum yöntemi olmak üzere üç birbiriyle ilişkili değişkene bağlıdır (El-Shobokshy & Hussein, 1993). Bu değişkenler sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

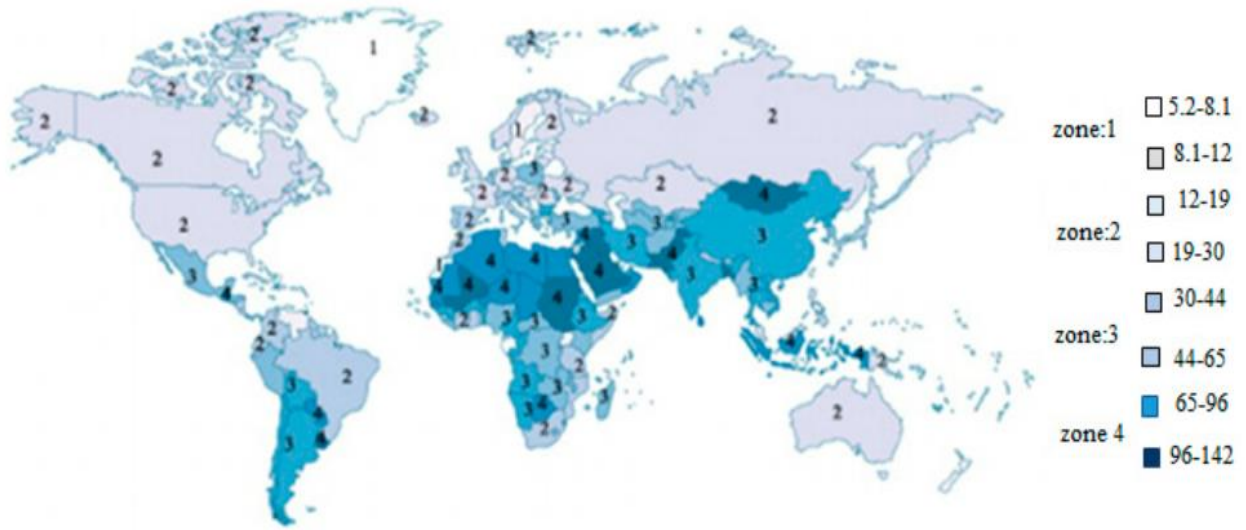
2.4 Tozun Etkileri, Özellikleri ve Türleri

Toz birikimi, ince bir film gibi davranarak güneş radyasyonunun FV modül yüzeyine ulaşmasını engeller ve böylece performansını olumsuz etkiler (Saidan vd., 2016). Şekil 2.7, bu olguya katkıda bulunan faktörlerin karmaşık etkileşimini kapsamlı bir şekilde göstermektedir. Toz birikiminin kapsamını belirleyen üç ana değişken vardır. Bunlar çevresel koşullar, tozun kendine özgü özellikleri ve FV modülünün kurulum parametreleridir (Gupta vd., 2019).



Şekil 2.7. FV modül yüzeyinde toz birikmesine neden olan faktörler ve bu faktörler arasındaki ilişkiler.

Güneş panellerinde toz birikiminin miktarı ve hızı, buldukları yerin hava koşullarıyla yakından ilişkilidir (Asl-Soleimani vd., 2001). Toz parçacıkları ve kirletici maddelerin konsantrasyonları yerel koşullara bağlı olarak dünya genelinde büyük farklılıklar gösterir. Şekil 2.8, PM₁₀ kullanarak ülkeleri toz konsantrasyonu ve iklim bölgelerine göre kategorize etmektedir. Daha koyu renkler, daha yüksek PM₁₀ seviyelerini, yani güneş panelleri için daha tozlu koşulları, daha açık tonlar ise daha berrak gökyüzü ve daha iyi güneş potansiyelini ifade eder (Ghazi vd., 2014).



Şekil 2.8. PM₁₀ konsantrasyonu (µg/m³) olarak ifade edilen dünya genelindeki toz yoğunluğu.

Küresel iklim ve toz analizi, fotovoltaik (FV) güç üretimi üzerindeki etkileri değişen dört farklı bölgeyi tanımlamaktadır. Soğuk ve nemli koşullarla karakterize edilen Bölge 1, minimum toz birikimi yaşar. Avrupa ve Kuzey Amerika gibi ülkeleri kapsayan Bölge 2, kirlenme nedeniyle FV çıktısında %25'e varan bir azalma görmektedir (Li vd., 2020b). Ekvator ve nemli bölgelere doğru ilerlerken, Hindistan, Meksika, Çin ve Türkiye gibi ülkeleri içeren Bölge 3, yıllık toz etkisi %10 ile sınırlı olmasına rağmen küresel kirlenme kayıplarının %60'undan sorumludur (Ghazi vd., 2014). Son olarak, Bölge 4, esas olarak kurak iklimlere sahip ve önemli FV potansiyeline sahip ülkeleri etkileyen toz birikiminin en fazla olduğu bölgedir. Mısır ve Suudi Arabistan bu durumun örnekleridir ve yıllık kirlenme kayıpları sırasıyla %10 ve %15'i aşmaktadır (Ghazi vd., 2014; Li vd., 2020b).

Araştırmacılar tarafından yapılan nicel bir analiz, çeşitli toz türlerinin fotovoltaik (FV) modül performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Toz birikim yoğunluğu arttıkça güç çıkışı azalmıştır. Kırmızı toprak, 0.35 g/m²'de %4'lük bir düşüş ve %7.5'lik bir enerji

kaybına neden olarak en güçlü enerji hırsızı olarak ortaya çıkmıştır. Kireçtaşı ise 1.51 g/m²'de %11'lik bir güç düşüşü ve %4'lük bir enerji kaybı ile ikinci sırada yer almıştır. İlginç bir şekilde, kül, önemli ölçüde daha yüksek bir yoğunlukta bile (%3.71 g/m²) sadece %2.3'lük bir güç azalması ile nispeten zararsız bulunmuştur. Araştırmacılar, bu farkı kırmızı toprağın rengi, bileşimi ve parçacık boyutu aralığı gibi faktörlere bağlamaktadır (Kaldellis & Kapsali, 2011).

FV sistemlerindeki toz birikiminin özellikleri, toz parçacıklarının kendine özgü nitelikleri ve yerel çevre olmak üzere iki ana birbiriyle ilişkili faktör tarafından belirlenir. Yerel çevre, yerleşime özgü faktörleri kapsamaktadır ve bu faktörler, insan faaliyetleri, mimari özellikler (yüzey dokusu, hizalama ve kurulum yüksekliği gibi), çevresel unsurlar (bitki örtüsü türü gibi) ve mevcut hava koşulları tarafından etkilenir. Toz parçacıklarının özellikleri (toz türü, kimyasal ve biyolojik özellikleri, elektrostatik özellikleri, boyut, şekil ve kütle gibi), birikim ve birikme eğilimleri eşit derecede önemlidir. Benzer şekilde, alıcı FV yüzeyinin yüzey dokusu da kritik bir rol oynamaktadır. Yapışkan özelliklere sahip bir yüzey (kaba, tüylü bir dokuya sahip veya kalıntı yapışması ve elektrostatik birikim gösteren bir yüzey gibi), daha düşük yapışma özelliklerine sahip daha pürüzsüz bir yüzeye göre daha fazla toz biriktirme eğilimindedir. Ayrıca, başlangıçta bulunan tozun varlığının, daha fazla birikimi çekebileceği veya kolaylaştırabileceği ve böylece yüzeyi giderek daha fazla toz birikimine açık hale getireceği iyi bilinen bir olgudur (Mani & Pillai, 2010b).

Toz birikim sürecinin oldukça karmaşık olduğu ve dahil olan çok sayıda etkileyici faktör nedeniyle hem pratik yönetimde hem de kapsamlı bir şekilde anlaşılmasında önemli zorluklar sunduğu açıkça görülmektedir.

Toz birikimini etkileyen faktörler (Mani & Pillai, 2010b):

- Toz özellikleri (toz türü - kimyasal, biyolojik ve elektrostatik özellik, boyut, şekil ve ağırlık).
- Rüzgar hızı
- Camlama özellikleri (FV panel yüzeyinin dokusu ve kaplama özellikleri)
- FV sistem eğik açısı ve yönelimi (güneş ve rüzgarın maruz kalma hareketlerini içerir).
- Ortam sıcaklığı ve nem
- Bina ve yapı özellikleri (yerel bitki örtüsü, yaya ve araç trafiği, hava kirliliği gibi).

Güneş FV panellerinde çeşitli toz ve partikül maddeler birikebilir. Bazı yaygın türler şunlardır:

- **İnorganik Toz:** İnorganik malzemelerden oluşan ince mineral, metal ve diğer partikül maddelerdir. İnşaat sahaları, sanayi bölgeleri ve kentsel kirlilik gibi çeşitli kaynaklardan gelebilmektedir (Morman & Plumlee, 2013).
- **Organik Toz:** Polen, yapraklar ve kir gibi organik parçacıklar da güneş panellerine yerleşebilir. Bunlar bitki örtüsü, ağaçlar ve çevredeki ortamdan gelebilmektedir (A. A. Kazem vd., 2014a).
- **Havada Asılı Partiküller:** İis, duman ve ince partikül madde gibi havada asılı kalan küçük parçacıklardır. Panellere yerleşerek verimliliği azaltabilmektedirler (Ravindra vd., 2001b).

Tozun özellikleri, güneş paneli verimliliği üzerindeki etkisini belirlemede önemli bir rol oynar. Dikkate alınması gereken bazı önemli özellikler şunlardır (Abdelsalam vd., 2021; Chaichan & Kazem, 2020a; Salamah vd., 2022):

- **Parçacık Boyutu:** Küçük parçacıklar, güneş hücreleri arasındaki mikroskobik boşluklarda kolayca birikerek panelin ışık emme ve enerji dönüştürme yeteneklerini etkileyebilir.
- **Bileşim:** Tozun bileşimi, organik veya inorganik olup olmadığı, panel malzemeleri ile kimyasal reaksiyonlar ve çıkarılma kolaylığı üzerinde etkili olabilir.
- **Yapışma:** Toz parçacıkları, panel yüzeyine farklı seviyelerde yapışabilmektedir. Kuvvetli yapışan parçacıklar, daha agresif temizleme teknikleri gerektirebilir.
- **Yoğunluk:** Tozun yoğunluğu, panel yüzeyi boyunca nasıl dağıldığını ve yamalar veya katmanlar oluşturup oluşturmadığını etkileyebilir.

Toz birikiminin fotovoltaik (FV) paneller üzerindeki etkisi, mevcut hava koşulları ve partikül boyutlarına bağlıdır. Ayrıca, FV panellerin ürettiği elektrik çıktısı, coğrafi konum, toz bileşim özellikleri ve çevresel sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sonuç olarak, belirli bir ülkede elde edilen araştırma bulgularının, farklı coğrafi bölgeler için evrensel olarak geçerli olmayabileceğini kabul etmek önemlidir (Khilar vd., 2022).

2.5 Güneş Panelleri Üzerinde Toz Birikiminin Etkilerinin İncelenmesinin Önemi

Güneş paneli temizliği, toz kaynaklı kirlenme kayıplarını azaltmak için çok önemlidir. Toz birikimi, güneş FV modüllerinin elektriksel verimliliğini düşürmektedir. Irak'ta yapılan bir çalışma, tozun bir gün içinde %6.24, bir hafta içinde %11.8 ve bir ay içinde %18.74 verim kaybına neden olduğunu göstermiştir (Saidan vd., 2016). Kuzey Umman'da, toz birikimi %5.5 ile %18 arasında verim düşüşlerine yol açmıştır (H. A. Kazem & Chaichan, 2019). Hindistan'ın Surat şehrinde, sekiz haftalık toz birikimi verimliliği %44.14 oranında azaltmıştır (Vaishak & Bhale, 2019). Nepal'in Lalitpur kentinde, beş aylık toz birikimi verimliliği %29.76'ya kadar düşürmüştür (Paudyal & Shakya, 2016a).

Kuzey Polonya'da doğal toz birikimi, FV modül verimliliğini ortalama %25.5 oranında azaltmıştır. 37° eğimdeki bir silikon kristal modül, maksimum günlük %0.8 verim kaybı yaşamıştır. İncelenen modüller, yıllık ortalama %3 güç çıktısı düşüşü göstermiştir (Klugmann-Radziemska, 2015).

Çin'in Xi'an, Shaanxi kentinde, toz birikimi relatif güç çıktısını %79.38'e düşürmüştür (Guan vd., 2017a). Birleşik Arap Emirlikleri'nin Şarja kentinde ise toz nedeniyle %1.7 güç düşüşü belgelenmiştir (Hachicha vd., 2019a). İran'ın Tahran kentinde, toz birikimi 70 yağmursuz günün ardından %21.47 güç kaybına neden olmuştur (Gholami vd., 2018).

Ampirik kanıtlar, toz birikiminin FV sistemler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Avustralya'nın Perth kentinde, 1.5 KWp şebeke bağlantılı FV sistem, aylık %4.5 güç düşüşü gösterirken, Endonezya'nın Nusa Tenggara Timur kentinde, 50 Wp güneş enerjili ev sistemi %8 düşüş göstermiştir. Bu güç düşüşü, şebeke bağlantılı sistem için üretim maliyetlerini 0.1768 \$/kWh ve güneş enerjili ev sistemi için 0.102 \$/kWh'ye düşürmüştür (Tanesab vd., 2018a).

Tozun güneş enerjisi üretimi üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için çaba sarf edilmiştir. 2009'dan önce, yılda sadece 10 ilgili makale yayınlanmakta iken, sonraki 7 yılda, araştırma katkıları önemli ölçüde artmıştır. Sadece 2015 yılında, bu alanda artan ilgiyi yansıtan 80 makale yayınlanmıştır (Costa vd., 2016a). Bu eğilim, etkili güneş paneli temizleme yöntemlerine olan vurguyu artırmıştır.

Araştırmalar, toz birikiminin önemli bir sorun olduğunu, büyük elektriksel ve ekonomik kayıplara neden olduğunu göstermektedir. Toz kaynaklı kayıpların giderilmesi, FV sistem çıktısını optimize etmek için önemlidir. Bu ihtiyaç, yenilikçi toz giderme sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır.

Zamanla, güneş panellerinin yüzeyleri polen, toz, kir, pislik ve kuş pislikleri gibi çeşitli kalıntılarla kaplanma eğilimindedir. Bu kalıntılar tipik olarak güneş çıktısını yaklaşık %10-15 oranında azaltmaktadır. Çoğu güneş panelinin ömrü 30 yıl veya daha fazladır (Vasiljev vd., 2013a). Düzenli temizlik, sürekli güç üretimi için gereklidir.

FV panel verimliliği, tasarımı (iç faktörler) ve çalışma ortamı (dış faktörler) tarafından etkilenmektedir. İç faktörler, yüzey sıcaklığı, panel konfigürasyonu, eğim açısı, hücre bütünlüğü ve delaminasyon gibi unsurları içerir. Dış faktörler, toz birikimi, nem, hava sıcaklığı, rüzgar hızı, güneş ışınımı ve gölgelenmeyi kapsar (Chaichan & Kazem, 2020a; Gholami vd., 2018). Toz, performans düşüşünün anahtarıdır ve diğer dış faktörler, panel yüzeyinde toz birikimini ve yayılmasını sağlamaktadır (Darwish vd., 2015).

Birçok çalışma, FV dizileri için toz ve partikül madde zorluklarını ele almıştır. Bu çalışmalar, dünya çapındaki güneş enerjisi tesislerinde enerji verimliliği kayıplarını incelemiştir. Ayrıca, güneş enerjisi santrallerinin anahtar unsurlarını, kirlilik kaynaklı verimlilik düşüşlerini ve etkili temizleme yöntemlerini analiz etmişlerdir (Farrokhi Derakhshandeh vd., 2021a; Figgis & Bermudez, 2021a; Sayyah vd., 2014a; Yilbas vd., 2021a).

2.6 Verimli Güneş FV Panelleri için Toz Temizleme Teknikleri

FV panellerinin uygun şekilde temizlenmesi ve soğutulması, hücre sıcaklığının optimal seviyede tutulması için gereklidir. Parrott ve arkadaşları, robotik teknikler kullanarak FV sistemlerinin temizliğini geliştirmiş ve günlük %0.25 verim artışı sağlamıştır. Silikon kauçuk fırçalı robotik sistem, FV panellerdeki tozu azaltmış, güç çıktısını artırmış ve maliyet etkinliği ile yapısal bütünlüğü korumuştur (Parrott & Aramco, 2018). Vasiljev ve arkadaşları, küçük çatlaklara ve erişilmesi zor yüzeylere ulaşabilen ultrasonik bir temizleme sistemi geliştirmiştir (Vasiljev vd., 2013a). Lu ve arkadaşları, FV modüllerini temizlemek için sileceklerle birlikte lineer piezoelektrik aktüatör kullanmışlardır (Lu vd., 2013a). Bu kompakt ve hafif sistem, panel temizliğini etkili bir şekilde sağlamıştır.

Du ve arkadaşları, FV modüllerinden tozu uzaklaştırmak için bir nozül tasarlamışlardır. Çok aşamalı genişleme nozülü, çeşitli iklimlere uygundur (Du vd., 2019a). Chesnutt ve arkadaşları, toz parçacıklarını kaldırmak ve taşımak için elektrodinamik dalgalar kullanan elektrodinamik bir toz kalkanı (EDS) tanıtmışlardır (Chesnutt vd., 2017a). Deb ve Brahmabhatt, su kullanmadan otomatik bir temizleme

sistemi tasarlamışlardır. Ayrıca, bu temizleme yönteminin enerji verimliliğine katkısını analiz etmişlerdir (Deb & Brahmhatt, 2018a).

Assi ve arkadaşları, güneş panellerinden tozu temizlemek için klima fanlarından gelen hava akışını kullanmışlardır. Bu yöntem, özellikle Birleşik Arap Emirlikleri'nde olmak üzere çeşitli yerlerde test edilmiştir (Assi vd., t.y.). Park ve arkadaşları, pasif bir FV modül temizleme stratejisi geliştirmişlerdir. Süperhidrofobik panel tasarımları, mikro çukurlarda yağmur suyu ve yoğuşma toplamıştır. Su, tozu topladıktan sonra buharlaşma ile geride kalıntılar bırakmıştır (Park vd., 2011a).

Nano-hidrofobik bir katman, cam yüzeyini düzleştirir ve su tutulmasını azaltır. Demenkova ve arkadaşları, mobil güneş panelleri üzerinde test edilen bir güneş izleme kontrol sistemi önermişlerdir (Demenkova vd., 2017a). Moharram ve arkadaşları, basınçsız su ve yüzey aktif madde temizlik tekniklerini karşılaştırmış ve yüzey aktif maddelerin daha etkili olduğunu bulmuşlardır (Moharram vd., 2013a). Pan ve arkadaşları, FV modüllerindeki nano-mikro yapılı camın, toz birikiminden sonra kaplamasız camdan daha iyi bir geçirgenlik oranına sahip olduğunu göstermişlerdir (Pan vd., 2019a). Moharram ve arkadaşları, çöl bölgelerinde FV modülleri üzerindeki toz birikiminin olumsuz etkilerini belirlemiş ve verimliliği azalttığını göstermişlerdir (Moharram vd., 2013a).

Mevcut FV panel temizleme yöntemleri, fırçalar, basınçlı hava sistemleri, kaplamalar ve robotik uygulamaları kapsamaktadır. Robot destekli temizleme yöntemleri, kuru ve sulu temizleme yöntemlerini içerir (Mondal & Bansal, 2015a). Kuru temizleme, fırçalar ve toz püskürtme yöntemlerini kullanır. Güç üretimini yaklaşık %9 artırır (Deb & Brahmhatt, 2018a). Sulu temizleme, FV panel yüzeyine su uygulayarak temizleme sağlayan fakat verimlilikte minimal iyileştirmeler görülen uygulamalardır (Moharram vd., 2013a). Bu bulgular, basınçsız su kullanımının FV panel temizliği için sınırlı etkinliğini vurgulamaktadır. Optimal sonuçlar, basınçlı su veya mekanik fırçalama kullanılarak elde edilir (Ekinci vd., 2022a).

Çizelge 2.1, toz birikimi modellemesi ve FV panel temizleme yöntemlerinin kronolojik bir özetini sunmaktadır. 1993'ten 2022'ye kadar olan ilerlemeleri kategorize eder ve tanımlanmış temizleme mekanizmalarını veya modelleri detaylandırır (Wan vd., 2024). Bu ilerleme, güneş enerjisi endüstrisinin güneş paneli verimliliğini etkileyen toz birikimi sorununa yanıtını gösterir. Çizelge, güneş panellerindeki toz birikimi ile mücadeleyle yönelik endüstrinin gelişen stratejilerini vurgular. Sorunun tanınmasından, ileri temizleme teknolojileri ve öngörü analitiği geliştirmeye kadar, bu ilerlemeler, FV

sistemlerinin verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü korumaya yönelik kapsamlı bir yaklaşımı göstermektedir.

Çizelge 2.1. Fotovoltaik Paneller için Toz Birikimi Modellemesi ve Potansiyel Temizleme Yöntemlerinin Kronolojik Gelişimi.

Yıl	Temizleme Mekanizmaları
1993	Toz Birikimi Nedeniyle Fotovoltaik Hücre Performansının Bozulması.
2012	Güneş Enerjili, Geceleri Çalışan Susuz Temizleme Robotu.
2013	Şeffaf Elektro-Dinamik Kalkan ile Elektrostatik Temizlik.
2014	Püskürtme Yapan İHA Robotu ve Şeffaf Nano Kaplama ile Kendini Temizleme Yönteminin Tasarımı.
2015	Güneş Takip Modüllerine Dayalı Otomatik Temizleme Sistemi.
2019	Toz Birikiminin Modellenmesi ve Miktarının Belirlenmesi.
2020	Bilinear Model Kullanılarak Tozdan Etkilenen Fotovoltaik Güç Üretimi.
2022	Silecek Kontrollü Mekanizma ve Yağmur Suyu Kullanarak Hidrofobik Kaplama ile Otomatik Temizlik.

Sonuç olarak, güneş panellerinin tozlu ortamlardaki performansını incelemek, optimal işlevsellik için gereklidir. Bu tez, toz birikiminin FV panel verimliliği üzerindeki etkilerini incelemekte ve verim artışı için uygun temizlik periyodunun belirlenmesini içermektedir.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Proje Tanımı

Bu çalışma Konya ilinde kurulmuş olan 1.976 MWp kapasiteli bir çatı üstü güneş enerjisi sistemi için yapılmıştır. Analiz, (Boylam: 32.63575, Enlem: 38.00534) koordinatlarında bulunan fabrikanın çatılarına monte edilen son teknoloji fotovoltaik panelleri kullanmaktadır. Sürdürülebilir enerji üretimine odaklanan sistem, üretim faaliyetlerinin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmayı hedeflemektedir.



Şekil 3.1. Fabrikanın çatısındaki güneş paneli projesi Drone tarafından elde edildi.

Projenin temel bileşenleri arasında, bölgenin iklim koşullarında optimal performans sağlayacak şekilde tasarlanmış yüksek verimli güneş panelleri yer almaktadır. Bu FV invertörleri, paneller tarafından üretilen DC gücü, hem tesis içi kullanım hem de yerel şebekeye dağıtım için uygun olan AC güce dönüştürmede %98,8'e varan yüksek bir verimlilikle çalışmaktadır.

Güneş enerjisi santrali, fabrikanın enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayacak şekilde tasarlanmış olup, yenilenebilir enerjiyi operasyonlara entegre ederek sektörde bir örnek teşkil etmektedir. Fabrika, endüstriyel ortamlarda çatı üstü güneş enerjisi kurulumlarının ölçeklenebilirliğini ve bölge genelinde potansiyel uygulamalarını göstermektedir. Çizelge 3.1 fabrika çatısında kullanılan güneş panellerinin genel özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Özellik	Spesifikasyon
Panel Boyutları (mm)	2095×1039×40
Hücre Boyutu (mm)	166 x 83
Hücre Sayısı	144 (12x12)
Ağırlık (kg)	24.5
Maks. Yük Kapasitesi (Pa)	2400/5400 (Ön/Arka)
Bağlantı Kutusu Koruma Sınıfı	IP67 / IP68
Bağlantı Kutusu Kablo Boyutu (mm)	350-1200

Fiziksel boyutlar, endüstriyel uygulamalar için uygun büyük ölçekli bir modülü işaret ederken, elektriksel özellikler farklı enerji gereksinimlerine uygun bir dizi güç çıkışı göstermektedir. Aşağıdaki çizelgede kullanılan güneş panellerinin temel elektriksel özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Temel Elektriksel Özellikler.

Özellik	Modeller Arası Aralık
Güç Çıkışı (P _{max})	420 W _p - 455 W _p
Modül Verimliliği	19.30% - 20.90%
Maks. Güç Voltajı (V _{mp})	40.20 V - 41.60 V
Maks. Güç Akımı (I _{mp})	10.45 A - 10.94 A
Açık Devre Voltajı (V _{oc})	48.00 V - 49.40 V
Kısa Devre Akımı (I _{sc})	11.17 A - 11.67 A
Güç Toleransı	0 - +5W
Maks. Sistem Voltajı	1000V DC / 1500V DC
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-40°C - +85°C
Güvenlik Sınıfı	C
Maks. Seri Sigorta Değeri	15A / 20A

Fotovoltaik sistem projesi, tesisin tüketimi için tahmin edilen elektrik güç tüketimleri doğrultusunda özel olarak tasarlanmış 16 invertör içermektedir. Bu FV invertörleri, maksimum %98,8 gibi yüksek bir verimlilikle çalışmakta olup, güneş enerjisinin çok yüksek bir oranını kullanılabilir ve AC güce dönüştürebilir. Çeşitli FV dizi konfigürasyonları için uygun geniş bir giriş voltajı aralığını desteklemekte ve 100 KW'a kadar önemli bir maksimum AC çıkış gücü sunmaktadır. Temel özellikler arasında anti-buzlanma, aşırı akım ve aşırı gerilim koruması gibi çoklu koruma mekanizmaları bulunmakta olup güvenlik ve güvenilirliği sağlamaktadır. İnvvertör ayrıca akıllı soğutma ve izleme yeteneklerine sahiptir ve çok sayıda uluslararası standarda uymaktadır.

Çizelge 3.3. FV İnvörtörün Temel Özellikleri.

Özellik	Spesifikasyon
Maks. Verimlilik	98.8% @480 V
Maks. AC Aktif Güç	100,000 W
Giriş Voltajı Aralığı	200 V – 1,000 V
MPP İzleyici Sayısı	10
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-25°C – 60°C
İletişim Seçenekleri	LED Indicators, WLAN + APP, USB, MBUS, RS485
Koruma Özellikleri	Anti-adalanma, Aşırı Akım, Aşırı Gerilim Koruması vb.
Uyumluluk	EN 62109-1/-2, IEC 62109-1/-2, veothers
Soğutma Yöntemi	Akıllı Hava Soğutma
Boyutlar (G x Y x D)	1,035 x 700 x 365 mm
Giriş/Çıkış	Spesifikasyonlar
Nominal Giriş Voltajı	720 V @480 Vac, 600 V @400 Vac, 570 V @380 Vac
Maks. Giriş Voltajı	1,100 V
Nominal AC Çıkış Voltajı	480 V / 400 V, 3W+N+PE
Maks. AC Çıkış Gücü (cosφ=1)	110,000 VA
Nominal AC Şebeke Frekansı	50 Hz / 60 Hz
Maks. Toplam Harmonik Bozulma	<3%

3.2 Veri Toplama Sistemi

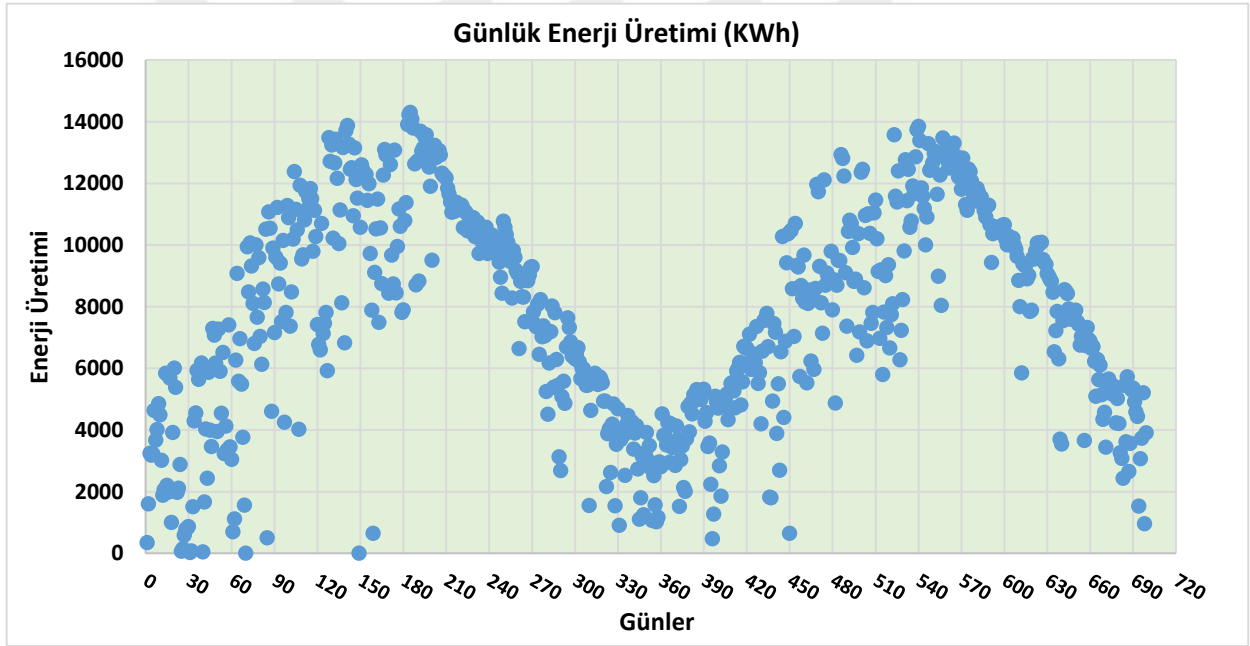
Fotovoltaik tesis, 2022 yılı başında faaliyete geçmiştir. Bu tez çalışması için veri toplama iki ana kaynaktan gerçekleştirilmiştir. Solcast API Araç Takımı, sistemin performansını etkileyen çevresel değişkenler ve doğrudan güneş ışınımı modelleme çıktıları ile ilgili verileri toplamak için kullanılmıştır. Ayrıca, güneş enerjisi santralının güç çıkışıyla ilgili veriler açık kaynaklardan elde edilmiştir. Veri seti, 1 Ocak 2022'den 30 Kasım 2023'e kadar olan günlük kayıtları kapsayarak toplamda yaklaşık 23 aylık bir dönemi içermektedir.

Solcast Araç Takımı, güneş enerjisi profesyonelleri ve araştırmacılar için gerçek zamanlı ve tarihsel güneş ve atmosfer verileri sağlayan web tabanlı bir uygulamadır (Solcast, t.y.). Solcast, ileri uydu teknolojisi ve özel modeller kullanarak yüksek doğrulukta güneş tahmin hizmetleri sunmaktadır. Tarihsel hava durumu verileri üzerinde eğitilmiş makine öğrenme teknikleri, veri doğruluğunu sürekli olarak artırmaktadır. Araç Takımı, Küresel Yatay Işınım [GHI], Doğrudan Normal Işınım [DNI], Yayınık Yatay Işınım [DIF], hava sıcaklığı ve bulut örtüsü gibi atmosferik verileri çeşitli zaman çözünürlüklerinde sağlamaktadır.

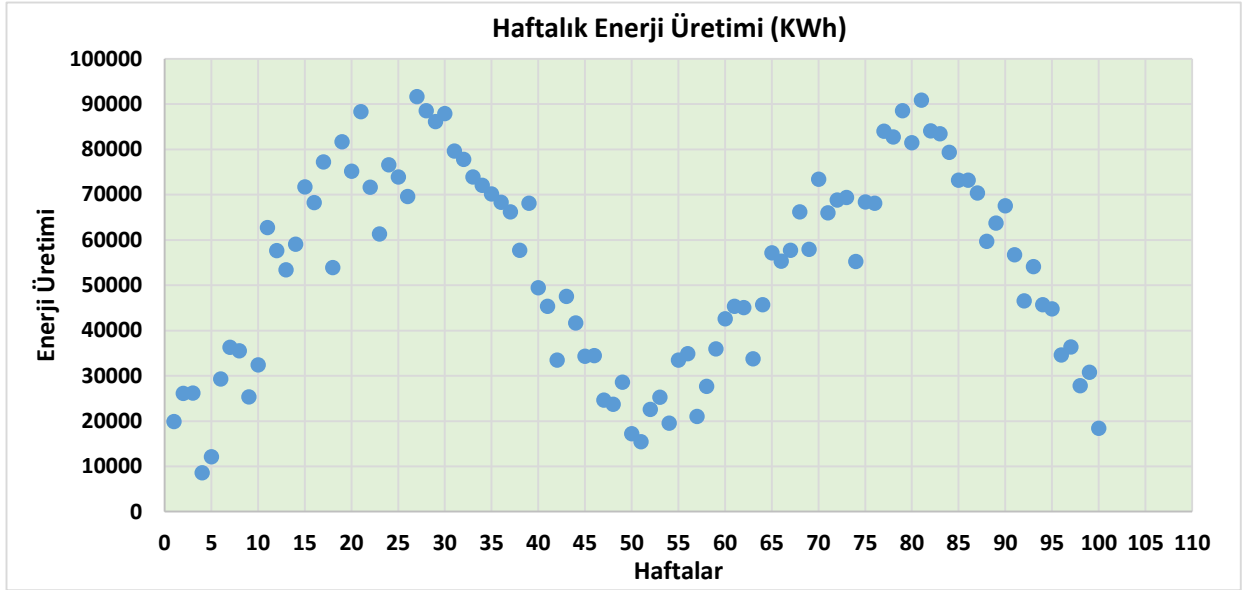
Solcast, yüksek zamansal (örneğin, gerçek zamanlı veriler için 5 ila 15 dakikalık aralıklar) ve mekansal çözünürlükte (genellikle birkaç kilometre mertebesinde) gelişmiş uydu görüntüleme ve hava durumu tahmin modelleri kullanarak veri üretmektedir. Güneş ışınımı verileri, yer tabanlı sensörler ve meteorolojik uydu gözlemleri ile kalibre edilmekte, bu da tahmin modellerinin doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, Solcast, makine

öğrenme algoritmaları kullanarak tahmin modellerini sürekli olarak geliştirmekte ve güneş ışınımı ile ilgili atmosferik koşulların tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Küresel kapsama alanı sunan Solcast, dünyanın herhangi bir yerinde veri toplama imkanı sağlamakta, böylece güneş enerjisi araştırma ve operasyonlarında geniş bir uygulama alanı sunmaktadır (Solcast, t.y.).

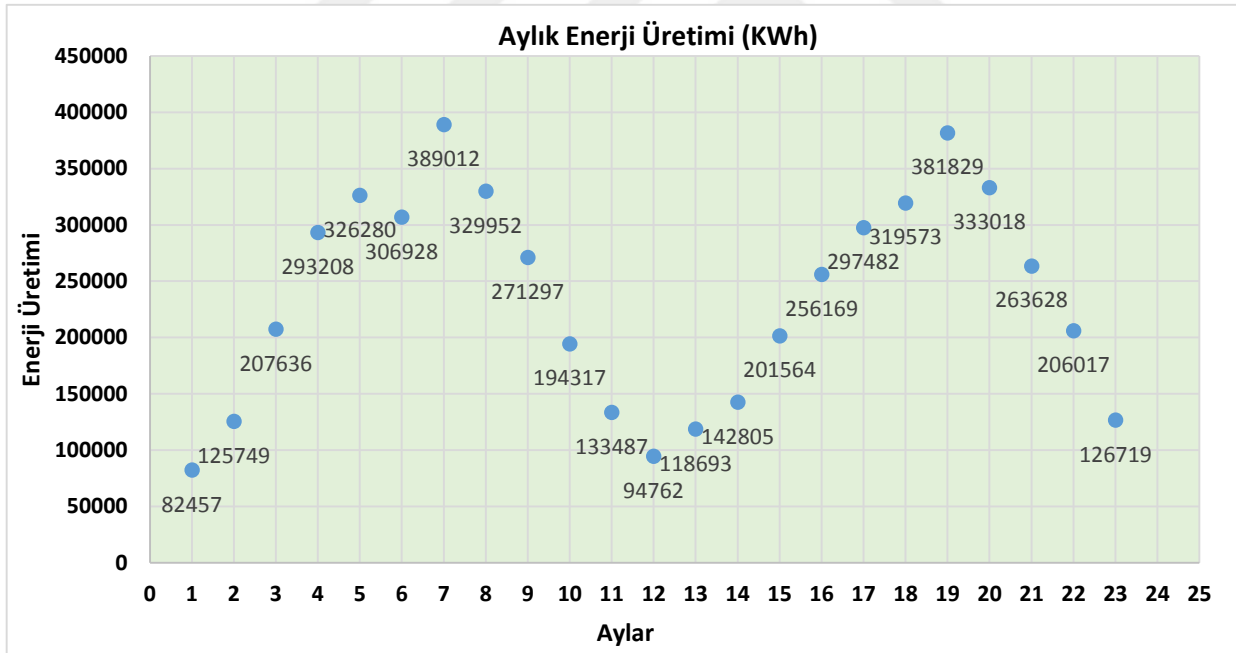
Veri seti, fotovoltaik sistem performans analizi için gerekli olan kapsamlı atmosferik parametreleri sağlamaktadır. Günlükten aylık ortalamalara kadar zaman çözünürlükleri sunarak hem detaylı hem de eğilim analizlerine olanak tanımaktadır. Işınım ve sıcaklık verilerinin dahil edilmesi, güneş enerjisi verim modellemesini kolaylaştırırken, rüzgar ve yağış verileri, sistem performansı üzerindeki çevresel etkiler için bağlam sağlamaktadır. Şekil 3.2'ten 3.4'e kadar olan figürler sırasıyla günlük, haftalık ve aylık güç çıkışlarını göstermektedir.



Şekil 3.2. 1 Ocak 2022'den - 30 Kasım 2023'e kadar KWh olarak Günlük Enerji Üretimi.



Şekil 3.3. 1 Ocak 2022'den - 30 Kasım 2023'e kadar KWh olarak Haftalık Enerji Üretimi.



Şekil 3.4. 1 Ocak 2022'den - 30 Kasım 2023'e kadar KWh olarak Aylık Enerji Üretimi.

3.3 Veri İşleme ve Analiz

3.3.1 Verilerin Sınıflandırılması ve Ayrıştırılması

FV santralden elde edilen güç üretim verileri, FusionSolar izleme sistemi kullanılarak toplanmıştır. Toplanan veriler 23 aylık günlük güç çıkışını içermektedir.

İncelediğimiz hava koşullarına göre veriler, yağışlı mevsimde ölçülen veriler ve kurak mevsimde elde edilen veriler olarak ayrıştırılmıştır. Bu tezde verilerin bu şekilde ayrıştırılması, hava faktörlerine bağlı olarak gerekli matematiksel hesaplamaların yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Böylece, yağışlı dönemde su damlaları güneş panellerinde doğal bir temizlik gerçekleştireceği için temizliğe ihtiyaç duyulmayacaktır. Fakat kurak mevsimde sistemin verimliliğini artıracak optimal sayıda temizlik yapılması gerekliliği doğacaktır. Bununla birlikte, kurak mevsimde yağışlı günlerden sonra, bu durumun enerji üretimi verimliliğini ne ölçüde etkilediği analiz edilmiştir.

FV santralin güç verileri yağışlı mevsim ve kurak mevsim olmak üzere iki veri bölümüne sınıflandırılmıştır.

Yağışlı mevsim verileri iki ana faktörün etkisini göstermektedir:

1. Yağış sırasında atmosfer genellikle bulutludur, bu da gün boyunca güneş panellerinden gelen güneş radyasyonunun keskin bir şekilde azalmasına ve gökyüzündeki bulutların varlığı nedeniyle paneller üzerinde oluşan gölgeye bağlı olarak, panellerden üretilen enerjide dramatik bir düşüşe neden olmaktadır.
2. Düşük sıcaklık, güneş hücrelerinin verimliliğini etkileyerek, güneşe maruz kaldıklarında üzerlerine düşen ışık radyasyonunu elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyetlerini de zayıflatmaktadır.

Yukarıda belirtilen faktörler nedeniyle 2022 ve 2023 yıllarının Ocak, Şubat, Mart, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında güç üretiminde bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu tezde incelenecek olan kurak sezon ayları Nisan'dan Eylül'e kadar olan dönemdir.

Enerji çıktısı ve güneş panellerindeki toz birikiminin yanı sıra diğer faktörlerin etkisi, her iki yıl için verileri haftalık olarak bölerek incelenecektir. Bu yaklaşım, söz konusu etkilerin ölçümünü ve hesaplanmasını kolaylaştıracaktır.

Bu ayrıştırma metodu, güneş panellerinin performansını etkileyen çevresel faktörlerin daha detaylı ve sistematik bir analizine olanak tanıyacaktır. Haftalık bazda yapılan inceleme, mevsimsel değişimlerin ve kısa vadeli etkilerin daha net bir şekilde tespit edilmesini sağlayacak, böylece enerji üretim verimliliğindeki dalgalanmaların daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine imkân verecektir.

3.3.2 Kurak Mevsim Verileri

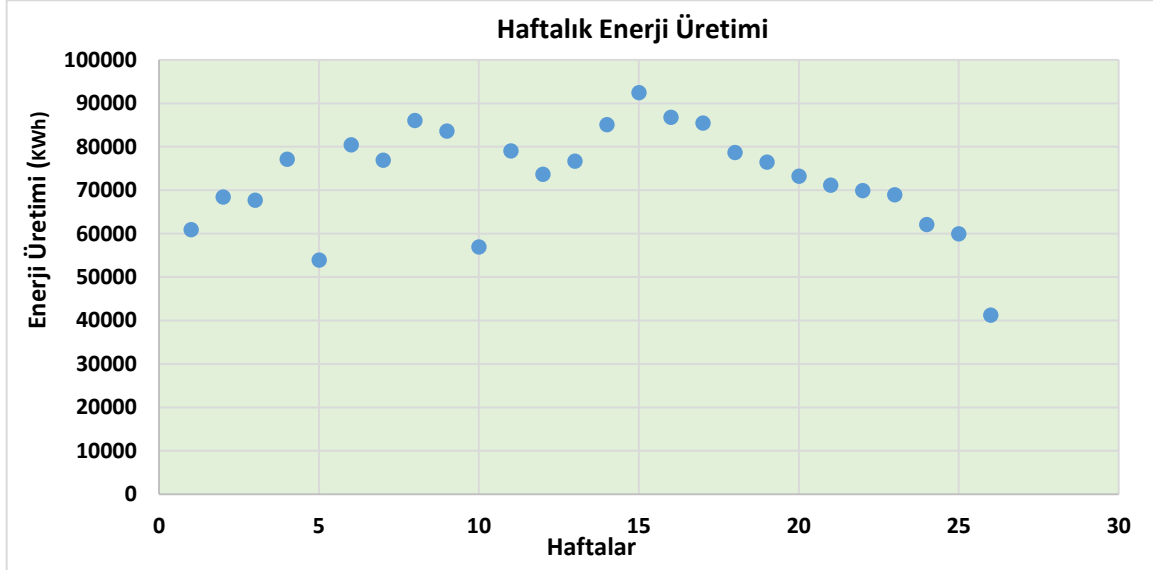
İlk bölümde, FV sistemden elde edilen mevcut veri akışı, kurak mevsim verileri ve yağışlı mevsim verileri olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Çalışma, en yüksek enerji çıktısının elde edildiği ve toz etkisinin paneller üzerindeki etkisinin yağışlı mevsime

kıyasla daha net gözlemlenebildiği kurak mevsime odaklanmıştır. Yağışlı mevsimde güç çıkışı değişken olup, hava koşulları sürekli değişmekte ve fotovoltaik sistemdeki güç çıkışını etkileyen birçok faktörün öngörülmesi ve ölçülmesi zorlaşmaktadır.

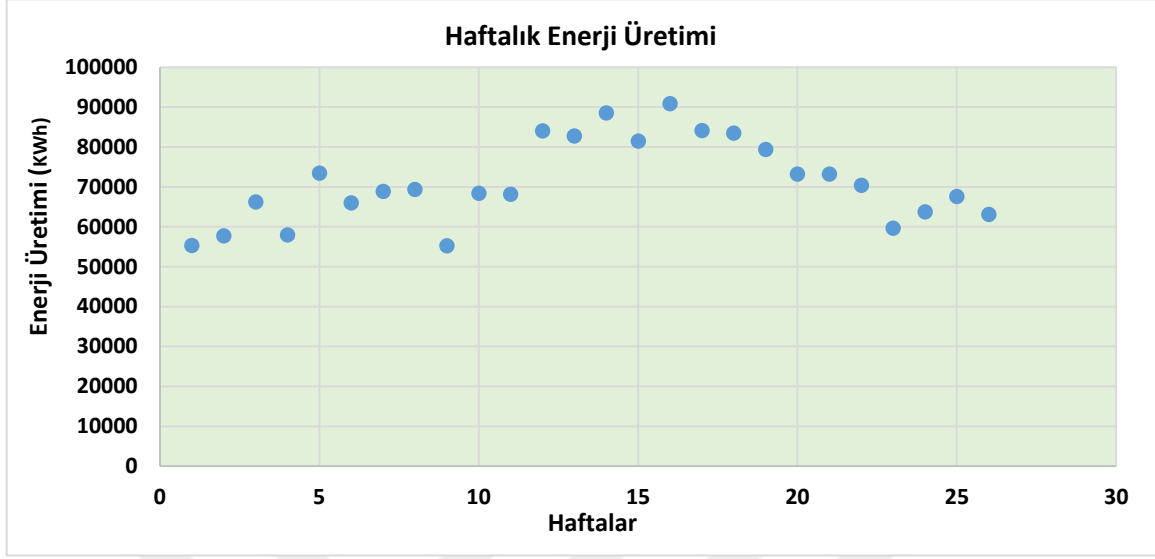
Kurak mevsim verileri, 2022 ve 2023 yıllarının Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarına ait verileri içermektedir. Enerji üretimindeki değişiklikleri ve bunu etkileyen faktörleri incelemek ve açıklamak amacıyla bu veriler haftalık olarak sınıflandırılmıştır.

Şekil 3.5 ve 3.6, yukarıda listelenen aylar için haftalık enerji çıktısı verilerini göstermektedir. Bu şekillerde, hafta boyunca ölçülen hava verilerinin ortalaması ve hafta boyunca üretilen toplam enerji miktarı ele alınmıştır.

Bu metodolojik yaklaşım, kurak mevsimde güneş enerjisi üretimini etkileyen faktörlerin daha detaylı ve sistematik bir analizine olanak tanımaktadır. Haftalık bazda yapılan inceleme, enerji üretimindeki dalgalanmaların ve bunları etkileyen faktörlerin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesini sağlamakta, böylece fotovoltaik sistemin performansı hakkında daha kapsamlı ve doğru sonuçlar elde edilmesine imkân vermektedir.



Şekil 3.5. 2022 yılı Kurak sezonu için haftalık enerji üretim verileri.

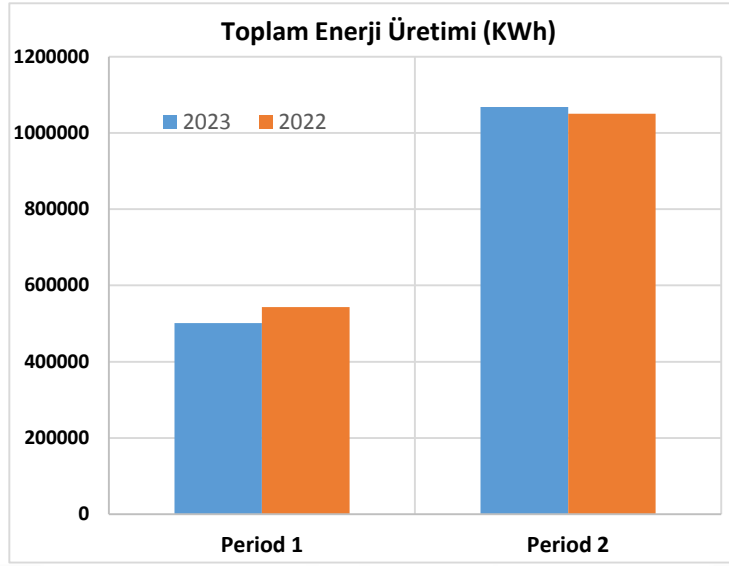


Şekil 3.6. 2023 yılı Kurak sezonu için haftalık enerji üretim verileri.

3.3.3 Karşılaştırmalı Veri Analizi

Bu tesiste 2022 yılında temizlik işlemi yapılmamıştır. 2023 yılında ise üç defa temizlik işlemi yapılmıştır. Yapılan temizlik çalışması operatör tecrübesine ve izlenimine dayalı güç düşüşüne istinaden talep edilmiştir.

Veriler karşılaştırılmadan önce, 2022 ve 2023 yılları arasındaki hava verilerinin yakınsamasını doğrulamak için Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Doğrulama sonrasında, verilerde bir yakınsama olduğu tespit edilmiş olup, bu nedenle sıfır hipotezi reddedilmeyecektir. Ardından, her iki temizlik arasındaki dönemler, Şekil 3,7'da gösterildiği gibi 2022'de elde edilen ve temizlik yapılmayan dönemlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7. 2023'teki iki temizlik dönemi ile 2022'deki iki temizlik yapılmayan dönem arasındaki toplam enerji üretimi, ilki 52 gün ve ikincisi 97 gündür.

İstatistiksel analiz ANOVA kullanılarak yapılmıştır. ANOVA, değişkenler arasındaki farklılıkları incelemekle kalmayıp, aynı zamanda ortalamaları arasındaki varyans veya fark derecesini de değerlendiren istatistiksel bir araçtır. Değişkenlerin istatistiksel anlamlılığını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, daha basit testlerin kapsamını aşan karmaşık analizler için daha uygundur. Dahası, ANOVA, araştırmacıların değişkenler arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmasına olanak tanımaktadır ve bu, t-testleri tarafından sağlanmayan bir özelliktir.

ANOVA testi, aralarında bir ilişki olup olmadığını belirlemek için aynı anda ikiden fazla grubu karşılaştırır. ANOVA formülünün sonucu olan F istatistiği veya F-oranı, örneklem arası ve örneklem içi değişkenliği değerlendirmek için birkaç veri grubunu analiz etmeye olanak tanımaktadır. Test edilen gruplar arasında gerçek bir fark yoksa, ki buna sıfır hipotezi denir " H_0 : Örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur", ANOVA'nın F-oranı istatistiğinin sonucu bire yakın olacaktır.

Ayrıca, her iki temizlik dönemi arasında üretilen enerji miktarını doğrulamak için çaba sarfedilmiştir (27.04.2023, 18.06.2023 ve 23.09.2023 tarihlerinde üç temizlik izlenmiştir). Temizlik arasında iki dönem bulunmakta olup, bunlar 2022 ile karşılaştırılmış ve yapılan karşılaştırmalar, sonuçlar ve tartışma bölümünde açıklanmıştır.

Bu metodolojik yaklaşım, temizlik işlemlerinin fotovoltaik sistem performansı üzerindeki etkisini sistematik ve istatistiksel olarak değerlendirmeye olanak sağlamıştır.

ANOVA kullanımı, yıllar arası ve temizlik dönemleri arası farklılıkların istatistiksel anlamlılığını belirlemeye yardımcı olmuştur. Bu analiz, temizlik işlemlerinin enerji üretimi üzerindeki etkisinin daha net bir şekilde anlaşılmasına imkan vermiştir.

3.3.4 Korelasyon Analizi

Korelasyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkileri incelemek ve birbirlerini nasıl etkileyebileceklerini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Bu yaklaşım, çeşitli iklimsel unsurlar ile güç üretimi arasındaki bağlantıları araştırmak için uygulanmıştır.

Değişkenler arasındaki ilişkinin gücü, r ile gösterilen Pearson korelasyon katsayısı ile ölçülmektedir. Bu katsayı -1 ile 1 arasında değişmekte olup, pozitif bir değer doğrudan bir ilişkiyi, negatif bir değer ise ters bir ilişkiyi göstermektedir. Katsayı sıfıra ne kadar yakınsa, korelasyon o kadar zayıftır. Bu çalışma için, Pearson korelasyon katsayıları Çizelge 3.4'te belirtildiği gibi değerlerine göre kategorize edilmiştir.

Çizelge 3.4. Pearson korelasyon katsayısının korelasyon derecesi.

Pearson Korelasyon Katsayısı aralığı	Korelasyon Derecesi	Formül
$r = \pm 0.9$ or more	çok yüksek korelasyon	$e = \frac{\sum[(x_i - x)(y_i - y)]}{\sqrt{\sum(x_i - x)^2 + \sum(y_i - y)^2}}$
$\pm 0.7 \leq r \leq \pm 0.9$	yüksek korelasyon	
$\pm 0.4 \leq r \leq \pm 0.7$	oldukça yüksek korelasyon	
$\pm 0.2 \leq r \leq \pm 0.4$	düşük korelasyon	
$r = \pm 0.9$ or below	korelasyon yok	

Doğrusal regresyon, bir değişkendeki değişikliklerin diğerini nasıl etkilediğini değerlendirmek için kullanılan bir başka analitik yöntemdir. Bu bağlamda, etkilenen değişken bağımlı değişken olarak adlandırılırken, etkileyen değişken bağımsız veya açıklayıcı değişken olarak adlandırılır.

Doğrusal regresyon, bir veya daha fazla bağımsız değişkene dayalı olarak bağımlı bir değişkeni tahmin etmek için kullanılan temel bir istatistiksel ve makine öğrenimi tekniğidir. Girdiler ve çıktı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayar. İki ana doğrusal regresyon türü vardır. Bunlar basit doğrusal regresyon ve çoklu doğrusal regresyondur. Basit Doğrusal Regresyon (BDR), tek bir bağımsız değişken kullanarak iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi incelerken, Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR), çeşitli faktörlere dayalı olarak sonuçları tahmin etmede daha karmaşık analizlere olanak tanımak için birden fazla bağımsız değişken içermektedir.

Bu çalışmada, iklimsel faktörlerdeki değişikliklerin güç üretimini nasıl etkilediğini değerlendirmek için doğrusal regresyon kullanılmış olup, ilgili formüller Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.5. Doğrusal regresyon türleri.

Açıklama	Formül
Basit Doğrusal Regresyon	$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$
Çoklu Doğrusal Regresyon	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon$
Nerede: y: bağımlı değişkendir. x, x₁, x₂, ... x_n: bağımsız değişkenlerdir. β₀, β₁, β₂, ... β_n: katsayılar, her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni tahmin etmedeki ağırlığını temsil eder. ε: hata terimidir.	

Bu çevresel faktörler ile enerji üretimi arasındaki ilişkiler tablolaştırılmıştır. Her ekolojik faktör için enerji üretimine karşı saçılım grafikleri oluşturularak, bu ilişkilerin doğrusal olup olmadığı incelenmiştir. Her çevresel faktörün ilişkisi analiz edilerek, enerji üretimini etkileyen en önemli faktörlerin küresel eğim ışınımı (GTI), küresel yatay ışınım (GHI), direkt normal ışınım (DNI), difüz yatay ışınım (DHI), ortalama hava sıcaklığı, bağıl nem ve güneş zenit açısı olduğu tespit edilmiş olup, güçlü bir bağlayıcı katsayı gözlemlenmiştir. Bu veriler tartışma ve sonuçlar bölümünde ele alınmıştır.

Bu analitik yaklaşım, çeşitli çevresel faktörlerin güneş enerjisi üretimi üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Korelasyon ve regresyon analizlerinin kombinasyonu, enerji üretimini etkileyen en önemli faktörlerin belirlenmesinde ve bu faktörlerin etkilerinin nicel olarak ölçülmesinde etkili olmuştur. Bu metodoloji, güneş enerjisi sistemlerinin performansını optimize etmek ve gelecekteki enerji üretimini daha doğru bir şekilde tahmin etmek için kayda değer bilgiler sağlamıştır.

3.4 Kirlenme Oranı Hesaplaması

Kirlenme oranı, fotovoltaik (FV) modüllerdeki kontaminasyon seviyesini belirlemek için kullanılan bir ölçüdür. Düşük oran daha yüksek kir birikimini ve enerji kayıplarını göstermektedir. Bu oran, bir FV sisteminin gerçek performans oranını referans bir değerle karşılaştırarak hesaplamaktadır. Kirlenme oranı, kir birikiminin FV sistemlerinin verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirmeye yardımcı olur ve optimal enerji üretimini sürdürmek için temizleme programlarını optimize etmekte kullanılır (Micheli vd., 2013). Kirlenme oranının belirlenmesi önemlidir çünkü fotovoltaik (FV)

modüllerdeki kontaminasyon seviyesini tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Bu da enerji üretimini doğrudan etkiler ve FV sistemlerinde optimal enerji üretimini sürdürmek için temizleme programlarını optimize etmekte kritik öneme sahiptir (González-Castillo vd., 2023).

$$SR = \frac{P_{out}}{P_{clean}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Bu tezde, $P_{h,t}^0$ 'yi belirlemek için FV Watts modeli (Dobos 2014) kullanılmıştır ve bu, Denklem 2'de açıklanmıştır. Bu bağlamda, $(G_{h,t}^{poa})$, ve (G^{STC}) , sırasıyla gelen ışınımı ve standart koşullar altındaki ışınımı temsil eder. P_{DC0} , kurulu kapasiteyi ifade eder. $(\gamma, T_{h,t}^{panel}, T^{STC})$. terimleri sırasıyla verimlilik sıcaklık katsayısını, panel sıcaklığını ve standart test koşulları (STC) altındaki panel sıcaklığını ifade eder. Mevcut verilere bağlı olarak, $P_{h,t}^0$ 'ı hesaplamak için başka modeller de kullanılabilir.

$$P_{h,t}^0 = \frac{G_{h,t}^{poa}}{G^{STC}} \cdot P_{DC0} \cdot \left(1 - \gamma \cdot (T_{h,t}^{panel} - T^{STC})\right) \quad (2)$$

Bu çalışma için, $P_{h,t}^0$, P_{clean} 'e eşdeğer kabul edilmektedir. Kırpma fenomenini hesaba katmak için, $P_{h,t}^0$, invertörlerin sağlayabileceği güç aralığı ile sınırlandırılmıştır.

Kirlenme oranı (SR), FV modülündeki kontaminasyon seviyesi arttıkça azalmaktadır (Guo vd., 2015; Skomedal vd., 2019). Daha fazla kir birikimi, daha düşük bir SR değeriyle sonuçlanır; 1 SR değeri kayıp olmadığını göstermektedir.

Panel sıcaklığı, denklem 3'e göre ortam sıcaklığı T^{amb} ve gelen ışınım G^{POA} ile üreticinin belirttiği birimlerin nominal çalışma sıcaklığı T^{NOCT} 'ye dayalı olarak belirlenir (Rodrigo vd., 2020; Zapata vd., 2015).

$$T^{panel}(G^{POA}) = T^{amb} + (T^{NOCT} - 20) * \frac{G^{POA}}{800 \frac{W}{m^2}} \quad (3)$$

Theil-Sen yöntemi kullanılarak her aralıktan bir eğim çıkarılmaktadır. Bu yöntem en küçük kareler doğrusal regresyonuna kıyasla aykırı değerlere karşı daha dayanıklıdır. Bu eğimlerin ortancası, saha için günlük kirlenme oranı ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Theil-Sen kestirici, veri setindeki tüm veri çiftleri arasındaki eğimlerin hesaplanması ve bu eğimlerin ortanca değerinin alınması yoluyla hesaplanır.

Theil-Sen yüzdesi (β), i ve j veri noktaları için yanıt değişkeni değerleri (y_i ve y_j) arasındaki farkın işaret fonksiyonuna dayalıdır. Theil-Sen yüzdesi (β) şu formül ile verilir:

$$\beta = \frac{2}{N * (N - 1)} * \sum_{i < j} \text{sign}(y_i - y_j) \quad (4)$$

Burada,

N : Veri noktası sayısıdır.

y_i ve y_j : i ve j veri noktaları için yanıt değişkeni değerleridir.

$\text{sign}(y_i - y_j)$: y_i ve y_j arasındaki farkın işaret fonksiyonunu gösterir.

Bu yaklaşım, güneş paneli sistemlerinin performansındaki değişkenliği dikkate almak için kullanılmaktadır. Kirlenme oranlarındaki bu değişkenlik, hava koşulları, toz birikim örüntüleri ve temizleme sıklığı gibi faktörlerden etkilenebilmektedir.

3.5 Temizlik Sıklığı için Optimum Aralığın Belirlenmesi

Güneş panellerinin verimliliğine etkileyen nedenler ve fotovoltaik sistemlerin verimliliğinin neden azaldığı belirlendikten sonra, farklı faktörlerin etkisi incelenmiş ve tüm faktörler bir araya getirilerek değerlendirilmiştir. Bu bölümde, kurak mevsimde iki yıl boyunca uygun temizleme zamanlarının sayısı analiz edilmiştir. Theil-Sen tahminci yöntemiyle, her dönem için kirlenme oranı hesaplanmış ve tozun hangi zaman dilimlerinde daha etkin olduğu saptanmıştır.

İlse ve arkadaşlarının atıfta bulunduğu matematiksel model kullanılarak, temizleme döngüsü sırasındaki günlük kirlilik azalmasını dikkate almak ve farklı temizleme teknikleri kullanarak temizleme maliyetlerini belirlemek mümkün olmuştur (İlse vd., 2019).

Temizleme döngüsü, temizleme mevsimindeki gün sayısının döngüler arasındaki gün sayısına oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$CL_{cycle} = \frac{N}{n} \quad (5)$$

Burada, CL_{cycle} temizlik döngüsü, N kuru mevsimin gün sayısı ve n temizlik döngüleri arasındaki gün sayısıdır.

Temizlik aralığı boyunca tozun neden olduğu enerji kayıpları şu şekilde verilir:

$$E_{losse} = E_{Ac,avg,N} * SL * CL_{cycle} \quad (6)$$

Burada, E_{losse} KWh cinsinden güneş enerjisi santralinde tozun neden olduğu enerji kaybı ve SL % cinsinden kirlenme kaybıdır. Ve $SL = \sum_{j=1}^n j * SR_{rate}$, SR_{rate} : (%/gün) cinsinden kirlenme oranı. Toz birikme oranının her temizlik aralığında sabit olduğu varsayılır. Böylece

$$E_{losse} = E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \left(\frac{n+1}{2}\right) * N \quad (7)$$

Toz birikmesi nedeniyle gelir kaybı

$$C_{Rl} = E_{losse} * \lambda_t \quad (8)$$

Burada, C_{Rl} (\$) cinsinden FV modüllerinden kaynaklanan toz nedeniyle gelir kaybı ve λ_t (\$/KWh) cinsinden enerji fiyatıdır.

FV güneş enerjisi tesisinin temizlik ve bakım maliyeti temizlik döngüleri.

$$C_{cl} = \frac{N}{n} * C_k \quad (9)$$

Burada, C_{cl} (\$) cinsinden FV güneş enerjisi tesisi temizlik döngülerinin temizlik ve bakım maliyetidir ve her biri ilgili C_k maliyetine sahip K tür temizlik teknolojisinin mevcut olduğunu varsayar.

Robotik temizliğin çalışma süresi boyunca, FV güneş enerjisi tesisindeki tozun neden olduğu toplam maliyet aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$C_{Tot} = C_{cl} + C_{Rl}$$

Böylece, FV güneş enerjisi santralindeki tozun neden olduğu toplam maliyet denklemi yeniden yazılabilir:

$$C_{Tot} = \left[\frac{N}{n} * C_K\right] + \left[E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \left(\frac{n+1}{2}\right) * N * \lambda_t\right]$$

Temizlik döngüleri arasındaki optimum gün sayısı, toplam maliyet amaç fonksiyonunun $\frac{dC_{Tot}}{dn} = 0$ değerinde minimize edilmesiyle elde edilir, böylece

$$\frac{dC_{Tot}}{dn} = \frac{d\left[\frac{N}{n} * C_K\right]}{dn} + \frac{d\left[E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \left(\frac{n+1}{2}\right) * N * \lambda_t\right]}{dn} = 0$$

$$\frac{dC_{Tot}}{dn_{opt}} = \left[-1. \frac{N}{n^2_{opt}} * C_k\right] + \left[E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \frac{1}{2} * N * \lambda_t\right] = 0$$

$$\frac{N}{n^2_{opt}} * C_k = E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \frac{1}{2} * N * \lambda_t$$

$$\frac{C_k}{n_{opt}^2} = E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \frac{\lambda_t}{2}$$

$$n_{opt}^2 = \frac{2 * C_k}{E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \lambda_t}$$

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{2 * C_k}{E_{Ac,avg,N} * SR_{rate} * \lambda_t}} \quad (10)$$

Şimdi, denklem 10'u kullanarak temizlik döngüleri arasındaki optimum gün sayısı bulunabilir.

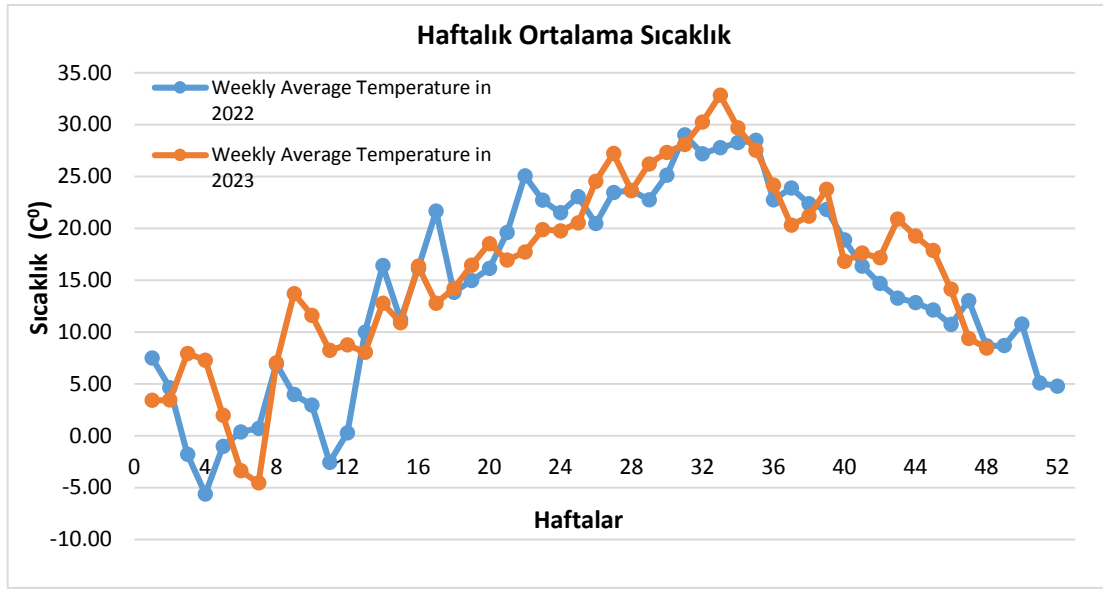


4 BULGULAR

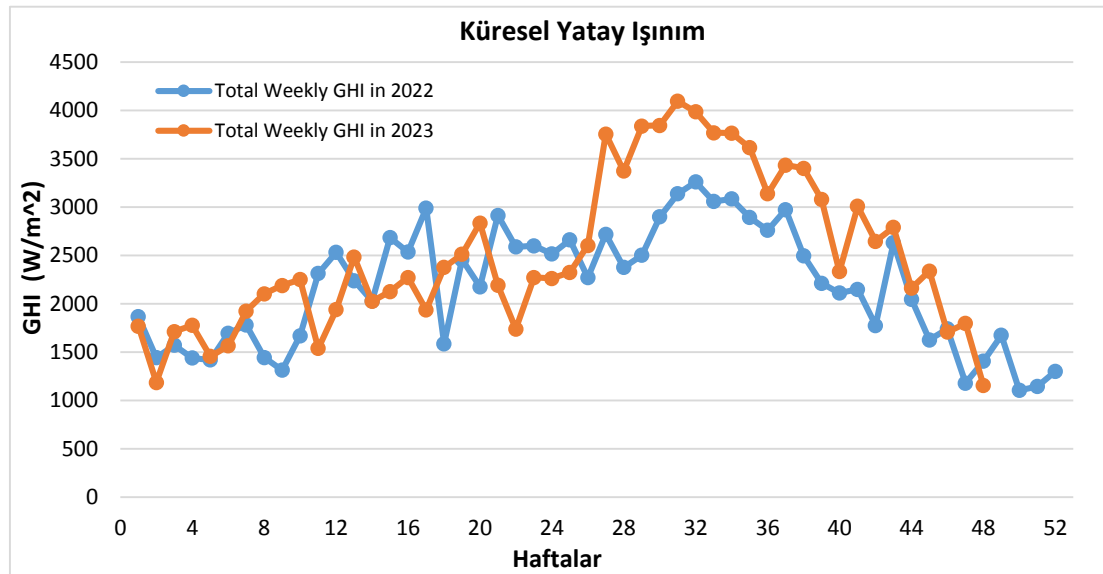
Bu bölümde, 2022 ve 2023 yılları arasındaki verilerin karşılaştırılması, kirlenme oranının hesaplanması ve her temizlik arasındaki optimal sürenin belirlenmesi konularında önerilen yaklaşımın etkinliğinin ortaya koyulması ve sonuçların sunulması üzerine odaklanılmıştır.

4.1 Veri Toplama

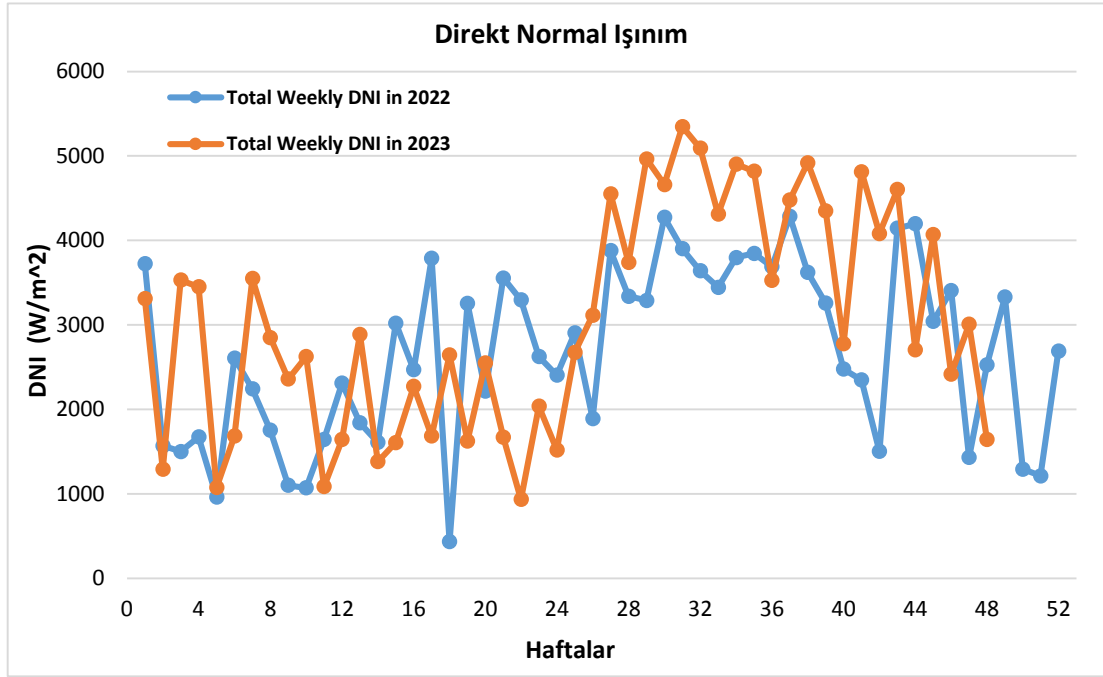
Solcast Toolkit aracılığıyla, veri takibi ve izlemede doğruluk ile karakterize edilen bu aracın analizi için gerekli veriler toplanmıştır. Şekil 4.1'den Şekil 4.7'e kadar, 2022 ve 2023 yılları için toplanan farklı faktörlere ait veriler karşılaştırılmaktadır.



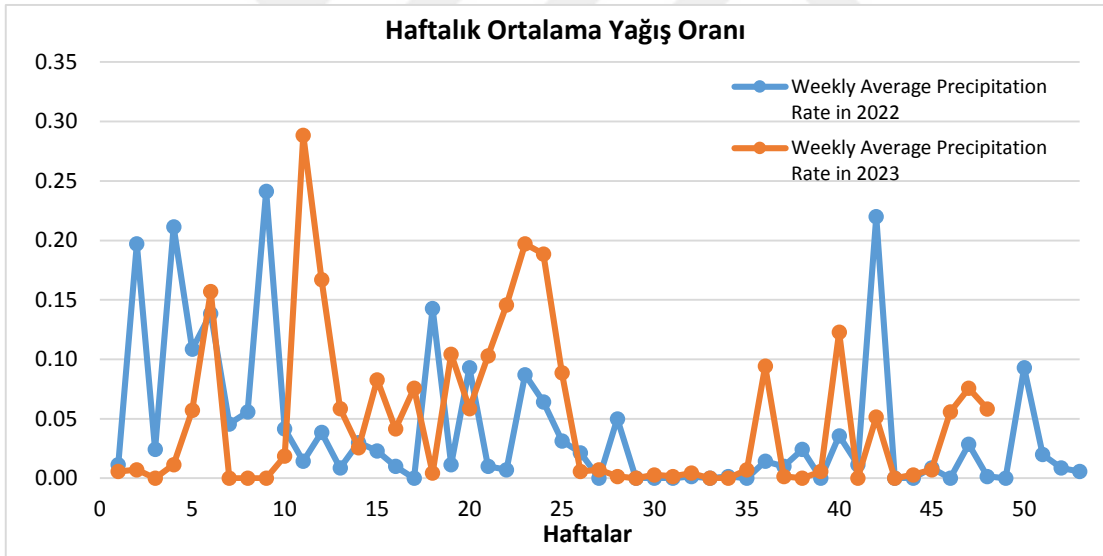
Şekil 4.1. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama sıcaklık değerleri.



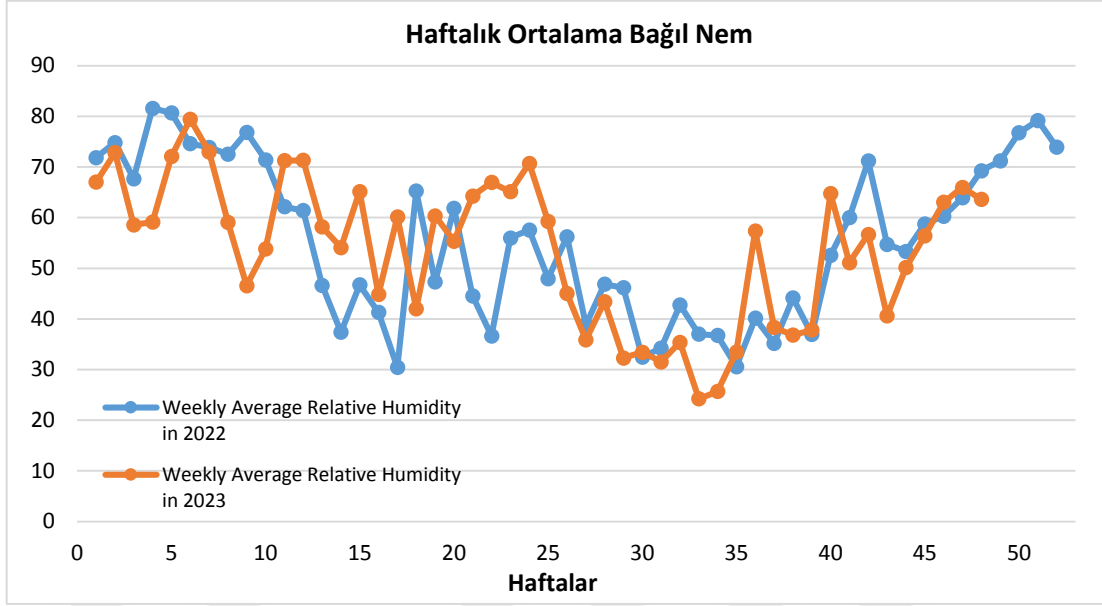
Şekil 4.2. 2022 ve 2023 yılı için toplam haftalık küresel yatay ışıınım değeri(w/m ^ 2).



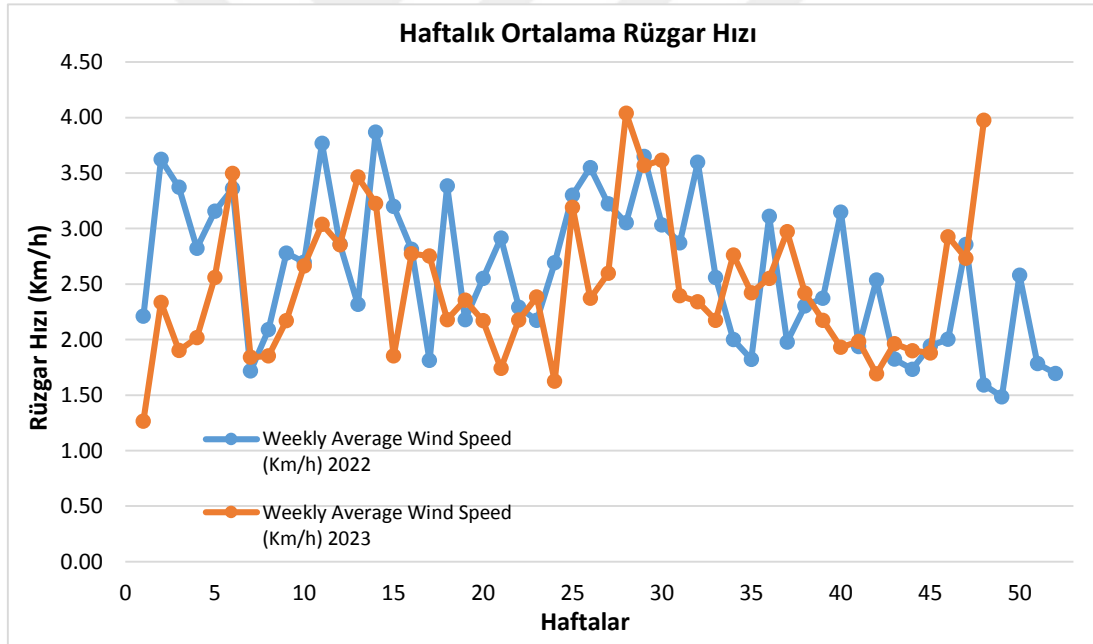
Şekil 4.3. 2022 ve 2023 yılı için toplam haftalık doğrudan normal ışınım.



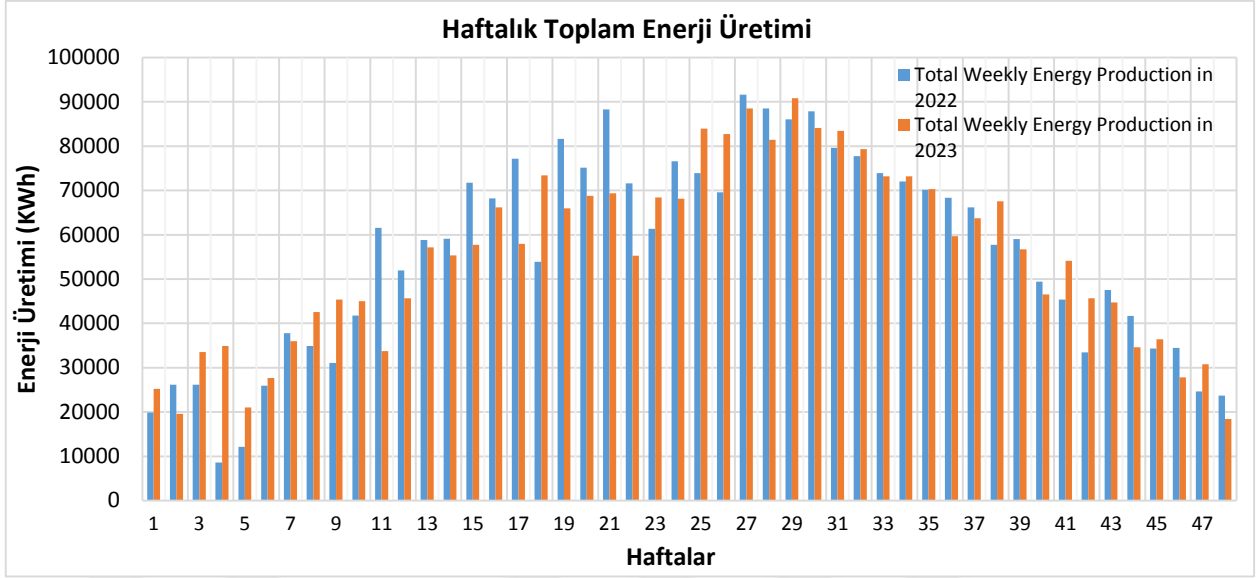
Şekil 4.4. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama yağış oranı.



Şekil 4.5. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama bağıl nem değerleri.



Şekil 4.6. 2022 ve 2023 yılları için haftalık ortalama rüzgar hızı.



Şekil 4.7. 2022 ve 2023 yıllarındaki toplam haftalık enerji üretimi.

4.2 Korelasyon Analizi

Yürütülen çalışma metodolojisi, verileri kuru ve yağışlı mevsimler olarak iki farklı kategoriye ayırarak sınıflandırmıştır. Analizin odak noktası, kuru mevsim verilerini kapsamaktadır. Bu sınıflandırma, teorik değerlendirmeler ve ön veri analizine dayanmaktadır. Yapılan analizler, en önemli enerji kayıplarının düşük radyasyon, düşük sıcaklıklar ve artan bulut örtüsü ile karakterize edilen dönemlerde meydana geldiğini göstermiştir. Bu faktörler, fotovoltaik sistemin tutarlı bir enerji çıkışı sağlama yeteneğini engellemektedir.

Araştırmanın kritik yönü, güneş sisteminin temizleme sürecini, özellikle toz birikiminin etkisi açısından incelemesidir. Yağışlı mevsimde güneş panelleri üzerindeki toz birikimi enerji kaybına neden olsa da, bu dönemde baskın faktör değildir. Yağışlı mevsimin yağmurları, insan müdahalesi olmadan çalışan doğal ve sürekli bir temizleme mekanizması sağlamaktadır.

Gözlem verilerine dayanarak yağışlı mevsimin başlangıcı saptanmıştır. 21 Mart 2022'yi (ilkbahar ekinoksu), takip eden hafta önemli miktarda yağış kaydedilmiş olup bu durum enerji çıkışında belirgin bir dalgalanmaya sebep olmuştur. Bu olay, yağış kaynaklı doğal temizleme olsa bile diğer parametrelerdeki değişimler kaynaklıdır. Sonuç olarak, çalışma için kuru mevsimin başlangıcı olan 1 Nisan 2022 tarihi belirlenmiştir.

Kuru mevsim döneminin belirlenmesinin ardından, enerji üretimini etkileyen faktörlerin kapsamlı bir analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, değişkenler

arasındaki ilişkilerin gücünü ve yönünü ölçen istatistiksel bir yöntem olan Korelasyon Analizi kullanılmıştır. Temel amaç, çeşitli faktörlerin fotovoltaik sistemlerdeki enerji üretimini ne ölçüde etkilediğini açıklığa kavuşturmaktır.

Çalışmanın metodolojisi, enerji çıkışı ile çeşitli faktörler arasındaki korelasyon katsayılarını hesaplamayı içermektedir. -1 ile +1 arasında değişen bu katsayılar, her değişken ile enerji üretimi arasındaki doğrusal ilişkinin standartlaştırılmış bir ölçüsünü vermiştir. ± 1 'e yaklaşan bir katsayı güçlü bir korelasyonu gösterirken, 0'a yakın değerler zayıf veya önemsiz ilişkileri göstermektedir. Bu analitik yaklaşım, kuru mevsimde fotovoltaik enerji çıkışını belirlemede farklı değişkenlerin görece önemini sistematik olarak değerlendirilmesini ve sıralanmasını sağlamıştır.

Çizelge 4.1, kuru mevsimde enerji çıkışı ile çeşitli faktörler arasındaki korelasyon katsayılarını göstermektedir.

Çizelge 4.1. Doğrudan Faktörlerin Enerji Üretimi Üzerindeki Etkisine İlişkin Korelasyon Katsayıları.

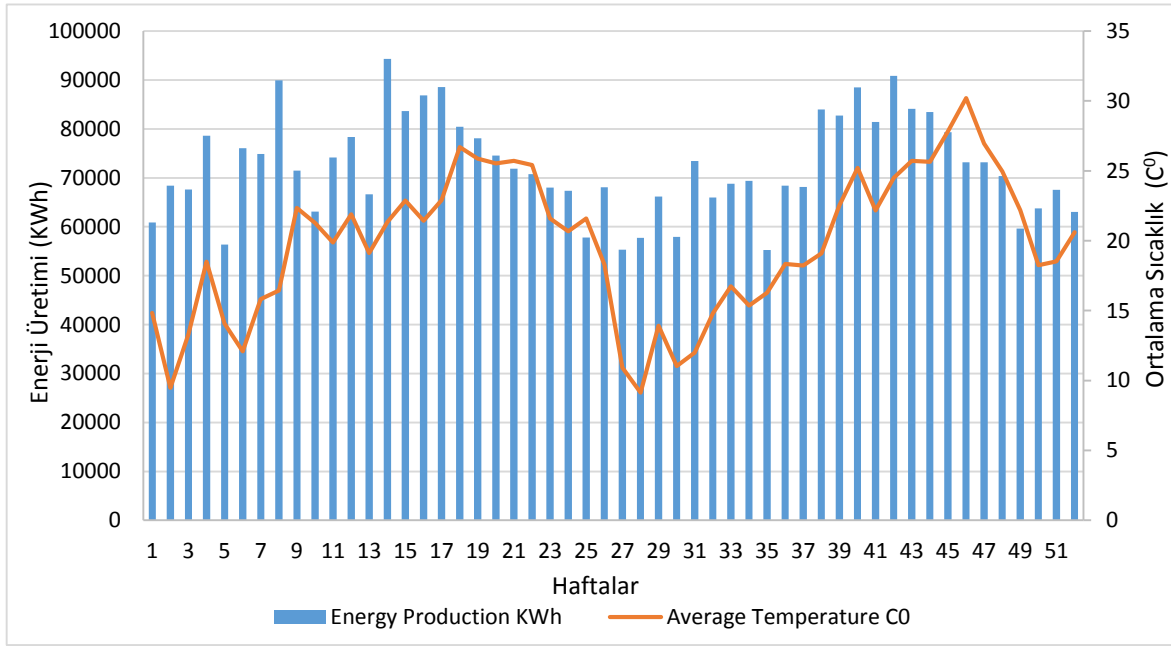
Enerji Üretimine Doğrudan Etki Eden Faktörler	Pearson Korelasyon Katsayısı r	Korelasyon Derecesi
Ortalama Sıcaklık C0	0.49	Oldukça yüksek korelasyon
Albedo	0.14	Korelasyon yok
Doğrudan Normal Işınım (W/m ²)	0.53	Oldukça yüksek korelasyon
Küresel Yatay Işınım (W/m ²)	0.46	Oldukça yüksek korelasyon
Çökebilir Su (mm)	0.05	Korelasyon yok
Yağış Oranı	-0.45	Oldukça yüksek korelasyon
Bağıl Nem	-0.41	Oldukça yüksek korelasyon
Rüzgar Hızı (Km/h)	0.34	Düşük korelasyon

Bu korelasyonları anlamak, enerji üretim verimliliğini etkileyebilecek temel çevresel faktörleri belirlemeye ve optimal enerji elde etme stratejilerini planlamaya yardımcı olmaktadır.

- Sıcaklık ve Işınım Faktörleri: Bu faktörler genellikle enerji üretimiyle pozitif ve oldukça yüksek bir korelasyona sahiptir, bu da enerji çıkışını optimize etmek için önemli olduklarını gösterir.
- Yağış ve Nem: Bu faktörler enerji üretimini olumsuz yönde etkiler, olumsuz hava koşullarının enerji verimliliğini engelleyebileceğini gösterir.
- Rüzgar Faktörleri: Rüzgar yönü önemli bir olumsuz etkiye sahipken, rüzgar hızı düşük bir pozitif korelasyon gösterir.

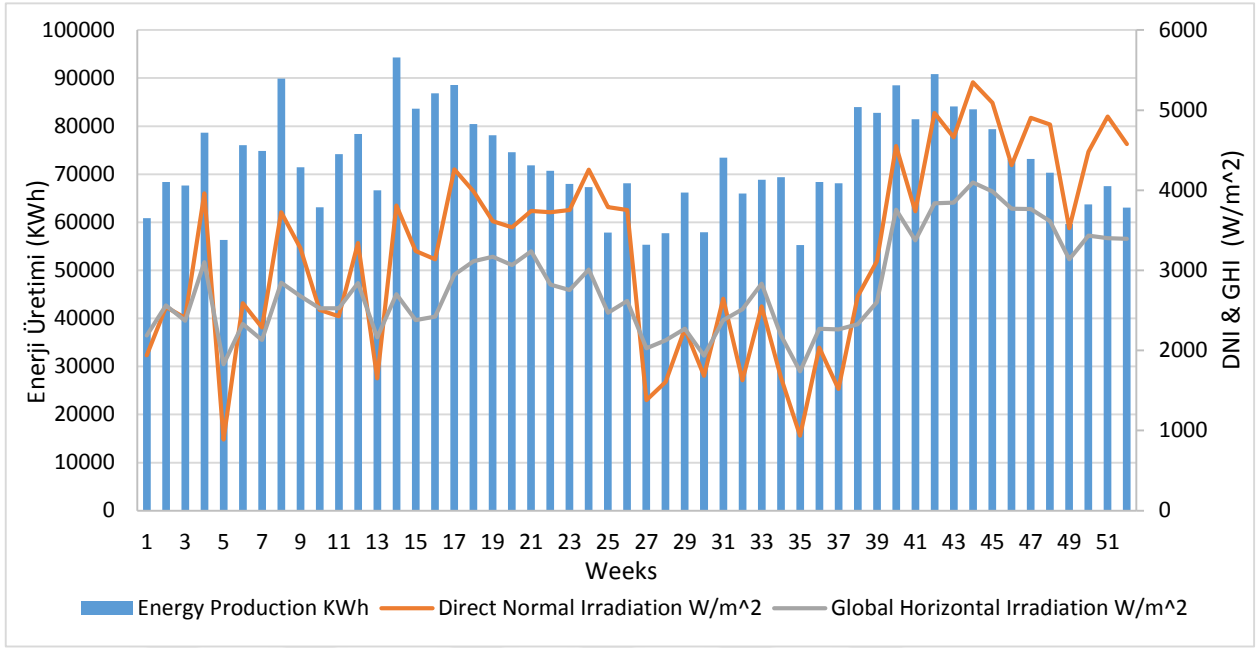
- Albedo ve Yoğuşabilir Su: Bu faktörler, enerji üretimiyle önemli bir korelasyon göstermez, minimal veya tutarsız bir etkiye sahip olduklarını düşündürmektedir.

Şekil 4.8, kuru mevsimde güneş enerjisi santralının haftalık enerji üretimini göstermektedir. Enerji üretimi genellikle sıcaklığın yüksek olduğu haftalarda artmış ve daha serin haftalarda azalmıştır. Haftalık ortalama sıcaklık ile toplam enerji üretimi arasındaki korelasyon katsayısı (r) 0,49227'dir.



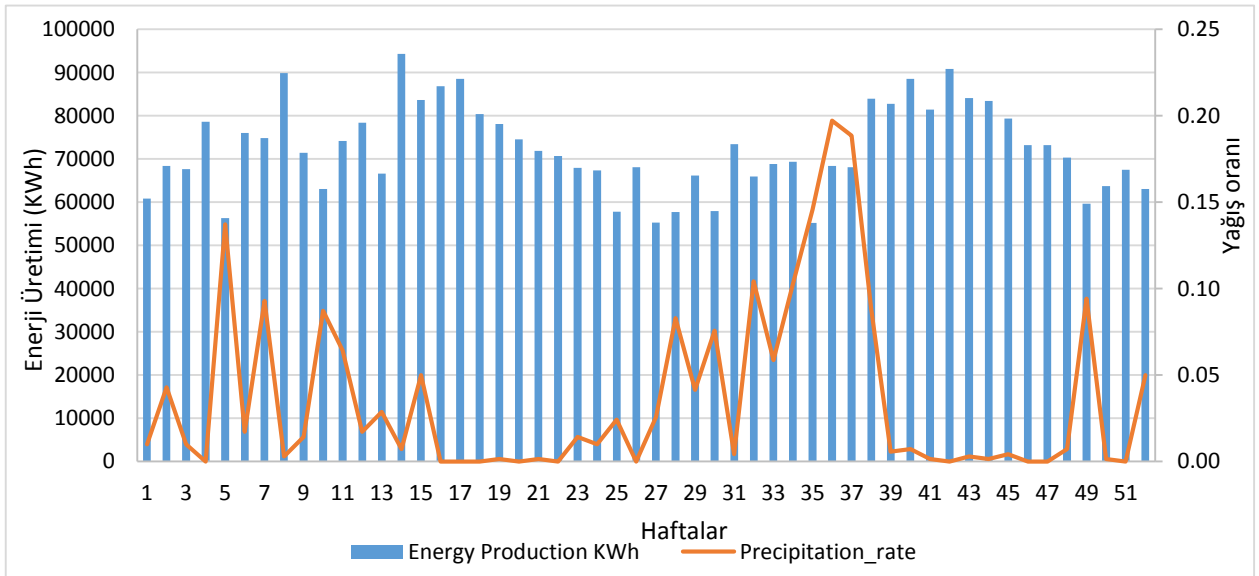
Şekil 4.8. Haftalık ortalama sıcaklık değerleri ve toplam güneş enerjisi üretimi.

Şekil 4.9, kuru mevsimde güneş enerjisi santralının haftalık enerji üretimini, direkt normal ışınımı (DNI) ve global yatay ışınımı (GHI) göstermektedir. Haftalık DNI, GHI ve toplam enerji üretimi arasındaki korelasyon katsayıları (r) sırasıyla 0,52709 ve 0,46232'dir.



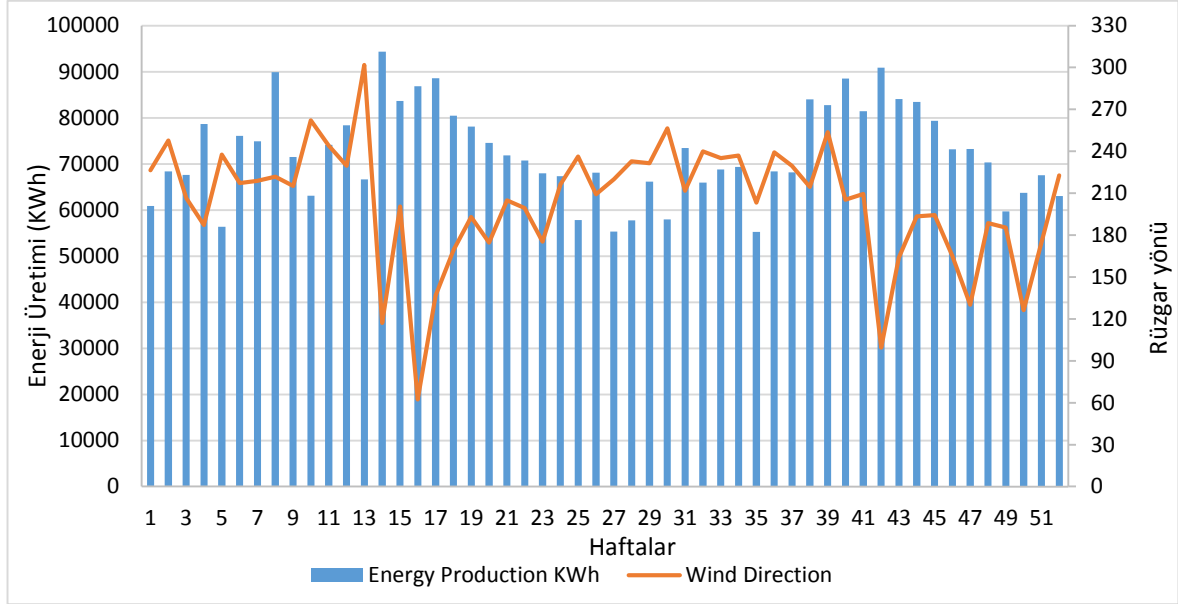
Şekil 4.9. Haftalık toplam enerji üretimi, doğrudan normal ışınım (DNI) ve küresel yatay ışınım (GHI).

Şekil 4.10, kuru mevsimde yağış oranı ile güneş enerjisi üretimi arasındaki ters ilişkiyi göstermektedir. Yağışın daha yüksek olduğu haftalarda enerji çıkışının daha düşük olması, hava durumunun güneş santrali verimliliği üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır. Haftalık yağış oranı ile toplam enerji üretimi arasındaki korelasyon katsayısı (r) $-0,44623$ 'tür.



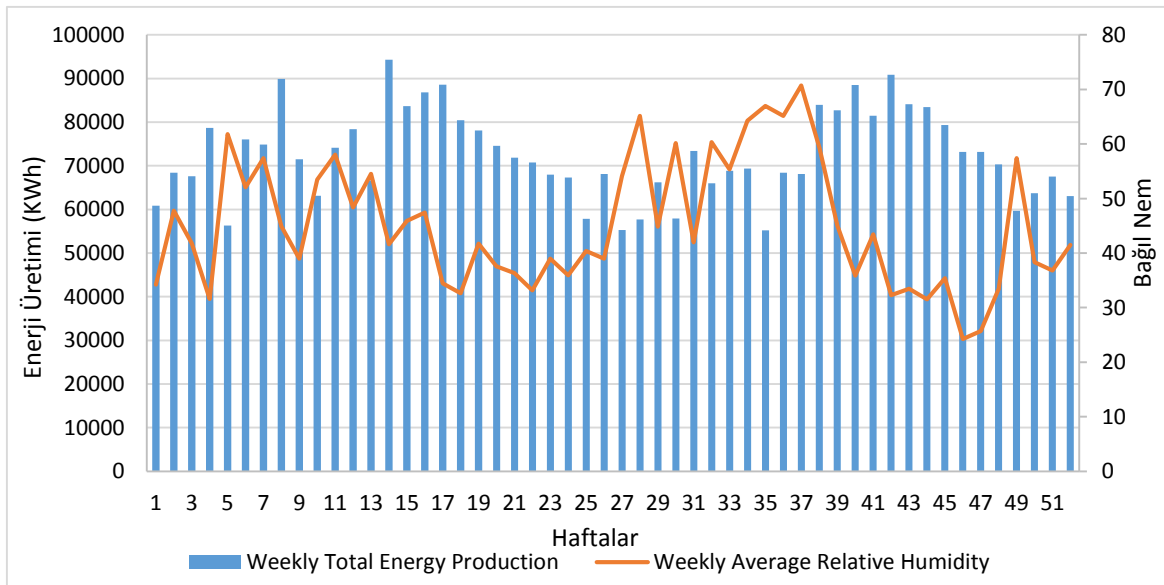
Şekil 4.10. Haftalık ortalama yağış oranı ve haftalık toplam güneş enerjisi üretimi.

Şekil 4.11, kuru mevsimde rüzgar yönü ile enerji üretimi arasındaki ters ilişkiyi göstermektedir. Haftalık rüzgar yönü ile toplam enerji üretimi arasındaki korelasyon katsayısı (r) -0,48702'dir. Rüzgar yönü, tozun bir bölgeden diğerine taşınma yönünü belirlemede önemli bir faktördür.



Şekil 4.11. Haftalık ortalama rüzgar yönü ve haftalık toplam güneş enerjisi üretimi.

Şekil 4.12'teki veriler, kuru mevsimde bağıl nem ile enerji üretimi arasında ters bir ilişki olduğunu, bağıl nemdeki artışların enerji üretimindeki düşüşlerle uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.12. Haftalık ortalama bağıl nem ve haftalık toplam güneş enerjisi üretimi.

Çizelge 4.2, SPSS yazılımı kullanılarak yapılan çoklu doğrusal regresyon analizini göstermektedir.

Çizelge 4.2. Çoklu Doğrusal Regresyon Modeli Analizi.

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken	R	R-Kare	F-Değeri	F-Katsayısı	β Standartlaştırılmamış	t-Değeri	t-Katsayı	Varyans şişirme faktörü (VŞF)
Haftalık Toplam Enerji Üretimi	Sabit	0,861842	0,742771	15,52081	0,000	187624.14	7.020	0.000	-
	Ortalama Sıcaklık C ⁰					1289.01	5.027	0.000	2.900
	Albedo					-680955.07	-6.815	0.000	2.652
	Doğrudan Normal Işınım (W/m ²)					9.12	4.029	0.000	11.928
	Küresel Yatay Işınım (W/m ²)					-6.82	-1.984	0.054	7.246
	Yağış Oranı					-87603.82	-2.527	0.015	5.176
	Bağıl Nem					525.17	2.937	0.005	7.251
	Rüzgâr Hızı (Km/h)					2810.19	1.802	0.079	1.387

Toplam haftalık enerji üretimi ile çeşitli çevresel faktörler arasındaki ilişkiyi anlamak için çoklu doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır. Ele alınan bağımsız değişkenler ortalama sıcaklık (C⁰), albedo, direkt normal ışınım (W/m²), küresel yatay ışınım (W/m²), yağış oranı, bağıl nem, rüzgâr yönü ve rüzgâr hızı (Km/h) olmuştur. Bağımlı değişken ise toplam haftalık enerji üretimi olarak belirlenmiştir.

Regresyon modelinin sonuçları, toplam haftalık enerji üretimi ile açıklayıcı değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu, t-değerleri ve ilişkili p-değerlerinden çıkarılabilmektedir. Açıklayıcı değişkenler, toplam haftalık enerji üretimindeki değişimlerin %74,3'ünü açıklamaktadır (R-Kare değeri 0,742771 ile gösterildiği gibi). Bu, bağımlı değişken ile açıklayıcı değişkenler arasındaki ilişkinin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir.

F-değeri ve p-değerine bakıldığında, model geçerlidir ve toplam haftalık enerji üretimi ile açıklayıcı değişkenler arasında bir korelasyon vardır. İlişkinin varlığını doğrulamak için çoklu doğrusallık testi yapılmıştır. Sonuçlar, modelin VIF faktörlerinin tümünün 10'un altında olduğunu, dolayısıyla çoklu doğrusallık sorununun olmadığını göstermiştir.

Böylece, sonuçlar aşağıdaki denklemi göstermektedir:

$$\begin{aligned} \text{Toplam Enerji Üretimi (KWh/hafta)} \\ = 187624.14 + 1289.01 * \text{Sıcaklık} - 680955.07 * \text{Albedo} + 9.12 * \text{DNI} \\ - 6.82 * \text{GHI} - 87603.82 * \text{Yağış Oranı} + 525.17 * \text{Bağıl Nem} - 68.52 \\ * \text{Rüzgar Yönü} + 2810.19 * \text{Rüzgar Hızı}. \end{aligned}$$

4.3 Kuru Mevsimde Karşılaştırmalı Analiz

Bu bölüm, daha önce belirlenen enerji üretimini etkileyen temel faktörlere dayalı olarak 2022-2023 verilerini karşılaştırmaktadır. 2023 yılının kuru mevsim verileri (robotik temizleme kullanılarak), 2022 yılının verileriyle (temizleme işlemi olmadan) karşılaştırılmıştır. İki yıl arasındaki verilerin karşılaştırılabilirliğini doğrulamak için Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Çizelge 4.3, elde edilen karşılaştırmalı analiz bulgularını özetlemektedir.

Çizelge 4.3. 2022 Ve 2023 kuru sezonu için Varyans (ANOVA) analizi.

ANOVA ($\alpha=0.005$)	Toplam SS (Sum Meydanı)	Toplam df (özgürlük derecesi)	F	P-value	F crit
Ortalama Hava Sıcaklığı (c°)	1357	51	0.04414	0.83446	4.03431
Doğrudan Normal Işınım (W/m ²)	71632984		0.16019	0.69069	
Küresel Yatay Işınım (W/m ²)	18868012		3.57655	0.06440	
Yağış Oranı	0.12999		3.42821	0.07000	
Bağıl Nem (%)	6979		1.20934	0.27673	

Analiz edilen tüm faktörler için 0,05 anlamlılık düzeyinde sıfır hipotezi (H_0) reddedilmemiştir. Bu, ölçülen değişkenlerden herhangi biri için örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir. Ayrıca, genel F-kritik değeri (F-crit) 4,03431'dir. Bireysel F değerlerinin hiçbiri bu kritik değeri aşmadığından, bu durum test edilen değişkenlerden herhangi biri için örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı sonucunu desteklemektedir.

Sonuç olarak, bu ANOVA analizine dayanarak, incelenen faktörlerin herhangi birinde sıfır hipotezini (H_0) reddetmek için yeterli kanıt bulunmamaktadır. Bu, karşılaştırılan iki dönem arasındaki (2022'de temizlik olmadan ve 2023'te robotik temizlikle) çevresel koşulların benzer olduğunu göstermektedir. Bu durum, yürütülen çalışmada iki zaman dilimi arasında yapılan karşılaştırmaların geçerliliğini güçlendirmektedir.

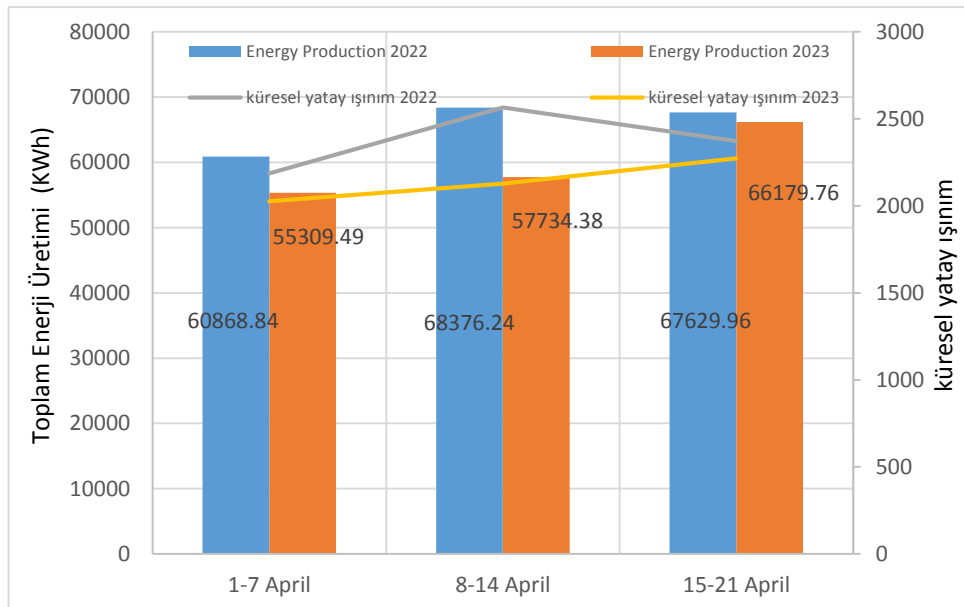
2022 ve 2023 kuraklık mevsimlerinin karşılaştırılması, toz birikiminin fotovoltaik sistem verimliliği üzerindeki etkisinin analiz edilmesini sağlar. 2023 yılında uygulanan robotik temizlik, enerji üretimini önemli ölçüde artırmış ve düzenli temizliğin etkinliğini göstermiştir. 2023 yılında robotik temizlik üç kez uygulanmıştır. 2023 yılındaki her temizlik olayı (27/04, 18/06 ve 23/09), enerji üretiminde belirgin bir artışla ilişkilendirilmiştir. Bu artışlar, toz uzaklaştırmanın panel verimliliğini geri kazandırdığını ve güneş ışınımı yakalamayı artırdığını ortaya koymaktadır.

2022 ve 2023 kuru mevsimleri, temizlik müdahalelerine dayalı olarak üç farklı zamansal döneme ayrılmıştır:

- **Temizlik öncesi dönem:** Kuru mevsimin başlangıcından 4. haftadaki ilk temizlik etkinliğine kadar olan süreçtir.
- **Birinci temizlik sonrası dönem:** 4. haftadaki ilk temizlik uygulamasından 12. haftadaki ikinci temizlik etkinliğine kadar olan süredir.
- **İkinci temizlik sonrası dönem:** 12. haftadaki ikinci temizlik etkinliğinden başlayıp 26. haftadaki üçüncü temizlik müdahalesine kadar devam eder.

4.3.1 Temizlik Öncesi Dönem

Şekil 4.13, 2022 ve 2023 yılları arasındaki enerji üretimini karşılaştırmakta ve hava koşulları veya sistem verimliliği değişiklikleri gibi üretimi etkileyebilecek potansiyel faktörleri vurgular.



Şekil 4.13. 2022 ve 2023 Kurak Mevsimlerde İlk Dönem için Haftalık Enerji Üretimi Karşılaştırılması.

Enerji üretim verilerinin analizi, ilk iki haftalık dönem için 2023'e kıyasla 2022'de daha yüksek bir çıktı eğiliminin tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu farklılık üçüncü hafta (15-21 Nisan) için azalmıştır.

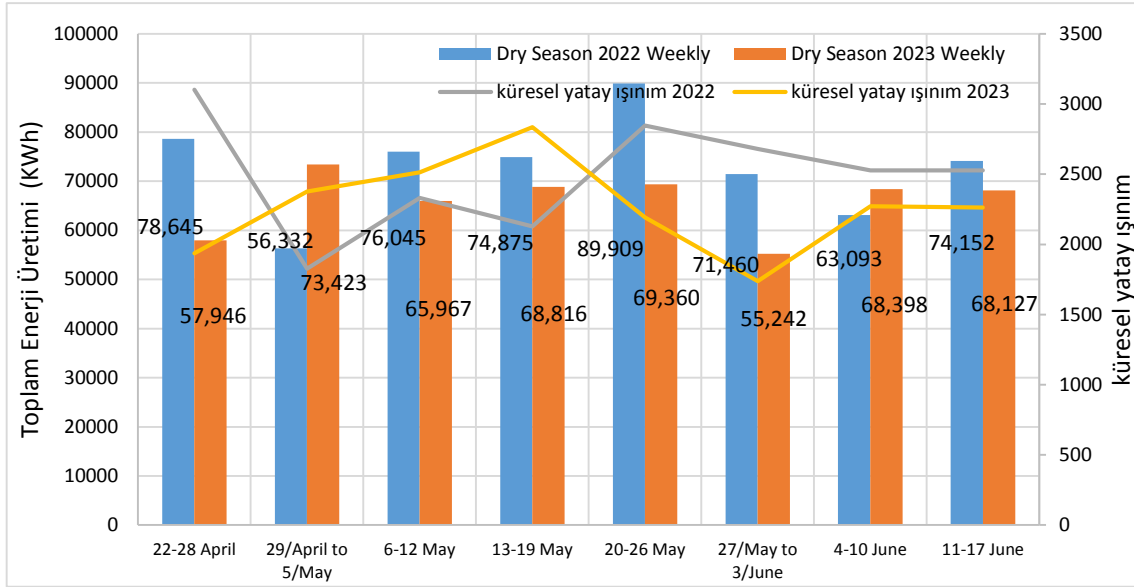
İlk temizlik öncesi dönemde 2023'te 2022'ye kıyasla gözlenen düşük haftalık enerji üretimi, güneş panelleri üzerindeki toz birikimini göstermektedir. Ek olarak, artan bulut örtüsünün göstergesi olan yüksek yağış oranları, panellere ulaşan güneş ışınımında azalmaya yol açmış ve böylece verimliliklerini düşürmüştür.

Temizlik öncesi dönemin incelenmesi aşağıdaki içgörülerini sağlamaktadır:

- 2023'te Azalan Enerji Verimi: yüksek global yatay ışınım (GHI) seviyeleri ve karşılaştırılabilir çevresel parametrelere rağmen, 2023'teki enerji üretimi, temizlik protokollerinin uygulanmasından önce 2022'ye kıyasla tutarlı bir artış sergilemiştir. Bu gözlem, partikül birikimi ve başlangıç kirlenme oranlarının etkisinin doğrudan normal ışınım (DNI), GHI, ortam sıcaklığı ve bağıl nemdeki küçük dalgalanmaların etkisini aştığını göstermektedir.
- Zamansal Üretim Düşüşü: veriler, temizlik müdahalelerinin yokluğunda fotovoltaik panel verimliliğinde zamana bağlı bir düşüş olduğunu güçlü bir şekilde göstermektedir. Bu olgu, panel yüzeylerinde ilerleyici toz birikimine atfedilmektedir. Temizlik prosedürlerinin başlatılmasından önce, 2023 için gözlenen enerji üretim rakamlarındaki düşüş, bu hipotez için ampirik destek sağlamaktadır.

4.3.2 Birinci Temizlik Sonrası Dönem

Şekil 4.14, Nisan sonundan Haziran ortasına kadar sekiz haftalık bir süre boyunca 2022 ve 2023 kuru mevsimlerindeki haftalık enerji üretimini karşılaştırmaktadır. Mavi sütunlar 2022 verilerini temsil ederken, turuncu sütunlar 2023 verilerini göstermektedir.



Şekil 4.14. 2022 ve 2023 kurak mevsimler için birinci temizlik dönem haftalık enerji üretimi karşılaştırması.

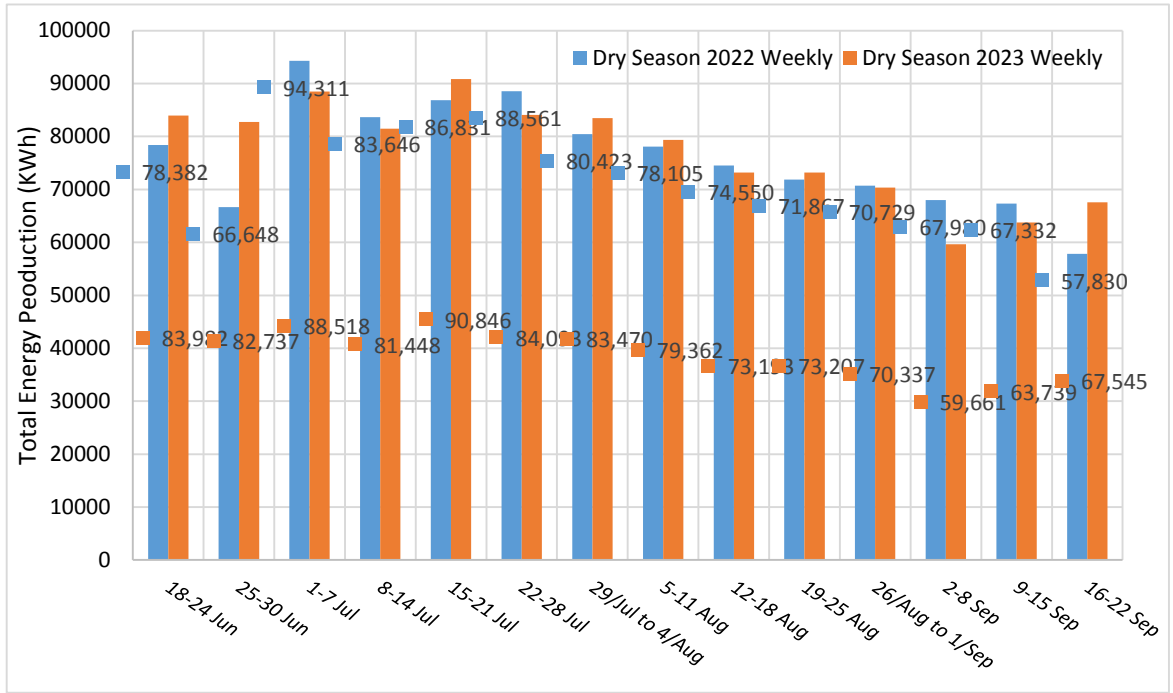
27 Nisan 2023'teki ilk temizlik işleminin ardından, takip eden haftada enerji üretiminde belirgin bir artış gözlenmiş, 58 MWh'den 73 MWh'ye yükselmiş ve yaklaşık %20,5'lik bir iyileşme kaydedilmiştir. Ancak bu artış kalıcı olmamış, sonraki haftada enerji çıkışı 66 MWh'ye düşmüş ve ikinci temizlik işlemine kadar 65,985 MWh/hafta civarında dengelenmiştir.

Buna karşılık, herhangi bir temizlik işleminin olmadan 22 Nisan ile 17 Haziran 2022 arasındaki dönem, dalgalı enerji üretimiyle karakterize edilmiştir. Maksimum haftalık enerji çıkışı, 20-26 Mayıs arasında 90 MWh'ye ulaşırken, minimum değer Nisan'ın dördüncü haftasında 56 MWh olmuştur. 2022'de ortalama haftalık enerji üretimi 75 MWh/hafta olup, 2023 ortalamasından daha yüksektir. Bunun nedeni güneş panelleri üzerindeki toz birikimidir.

2022 verileri, 2023 ile karşılaştırıldığında daha yüksek enerji üretim seviyeleri söz konusudur. Fakat 2023 yılında daha stabil değerler elde edilmiştir. Bu iyileşme, temizlik müdahalelerinin fotovoltaik yüzeyler üzerindeki partikül birikiminin etkisini etkili bir şekilde azalttığını güçlü bir şekilde göstermektedir. 2023'teki DNI ve GHI seviyelerindeki iyileşmeler enerji verimine katkıda bulunurken, üretim stabilitesi ve genel çıktıdaki gözlemlenen iyileşmeler, temizlik işleminin çok önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

4.3.3 İkinci Temizlik Sonrası Dönem

Şekil 4.15, 2022 ve 2023 kuru mevsimlerinde toplam enerji üretimini karşılaştırmaktadır. Temizlik yapılmayan 2022'nin aksine, düzenli temizlik işleminin ardından 2023'te enerji üretimindeki önemli artışı vurgulamaktadır. Veriler, fotovoltaik santralden daha yüksek ve daha istikrarlı enerji çıkışının sürdürülmesinde temizliğin etkinliğini göstermektedir. Düzenli temizlik, toz birikiminin olumsuz etkisini azaltarak, uzun kuru dönemler boyunca bile optimal panel performansını sağlamaktadır.



Şekil 4.15. 2022 ve 2023 Kurak Mevsimlerde Üçüncü Dönem için Haftalık Enerji Üretimi Karşılaştırılması.

İkinci temizlik sonrası, çalışmaya göre 12. haftanın başında, yani 18 Haziran'da gerçekleştirilmiştir. 12. haftada, temizliğin yapıldığı yıl olan 2023'teki toplam haftalık enerji üretimi, 2022'deki karşılığından daha yüksek olmuştur. Özellikle, haftalık enerji çıkışı 2023'te 84 MWh'ye ulaşırken, 2022'de 78 MWh olarak gerçekleşmiş, bu da temizliğin yapıldığı haftada yaklaşık %7'lik bir artışı temsil etmiştir.

Ancak, artan enerji üretimi potansiyelini işaret eden elverişli hava koşullarına rağmen, temizlik müdahalesini takip eden haftada görece, ancak önemli olmayan bir düşüş gözlenmiştir. Bu gözlem, o haftadaki pik üretim saatleri sırasında nispeten kapalı hava koşullarının varlığına atfedilmiş ve düşüş, öncelikli olarak toz birikimine bağlı olmamıştır. Hemen ardından, 4 Ağustos'a kadar haftalık enerji çıkışında istikrarlı bir artış kaydedilmiş ve ortalama 85,675 MWh'ye ulaşmıştır.

Daha sonra, üçüncü temizlik müdahalesinden önceki haftaya kadar enerji üretiminde kademeli bir düşüş gözlenmiş ve haftalık enerji çıkışı 67,5 MWh'ye ulaşmıştır. İki yıl arasındaki genel performans karşılaştırıldığında, 2022'de ortalama haftalık enerji üretimi 76,228 MWh iken, 2023'te 77,296 MWh'ye ulaşmış, bu da yaklaşık %1,4'lük bir artışı temsil etmiştir.

2023'teki enerji üretimi, 2022'ye kıyasla nispeten daha yüksek ve istikrarlıdır. Bu, ikincil temizlik müdahalesinin fotovoltaik panellerin verimliliğini koruma ve artırmada olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4.3.4 Özet

2022 ve 2023 arasındaki kuru mevsim performansının karşılaştırmalı analizi, temizlik müdahalelerinin fotovoltaik sistemin verimliliği üzerindeki önemli etkisini göstermektedir. 2023'teki müdahale öncesi dönem, toz birikimi nedeniyle 2022'ye kıyasla daha düşük enerji çıkışı gösterirken, 2023'teki temizlik etkinlikleri, 2022'deki temiz olmayan sisteme kıyasla ortalama haftalık enerji çıkışında yaklaşık %5-15'lik genel bir artışla enerji üretiminde istikrarlı iyileştirmelere yol açmıştır.

2022 ve 2023 arasındaki karşılaştırmalı değerlendirme, geçici performans dalgalanmalarına rağmen 2023'te haftalık ortalama enerji çıkışının biraz daha yüksek olmasıyla kanıtlandığı üzere, temizlik müdahalelerinin kümülatif faydalarını vurgulamaktadır. Bu, uzun kuru mevsimler boyunca optimal fotovoltaik sistem performansını sürdürmek için düzenli ve tutarlı temizlik uygulamalarının önemini vurgulamaktadır. 4. ve 12. haftalarda gerçekleşen temizlik süreci, toz birikiminin etkisini azaltarak sistemin enerji çıkışını iyileştirmeye yardımcı olmuştur. Bu, temizlik döneminde kuru mevsim haftalık değerlerindeki ve global yatay ışınımdaki belirgin artıştan anlaşılmaktadır. Bu durum, temizliğin biriken tozu etkili bir şekilde uzaklaştırdığını ve sistemin performansını iyileştirdiğini göstermektedir. İki yıl arasında çevresel koşullar istatistiksel olarak benzerdir fakat DNI, GHI ve sıcaklıkta küçük varyasyonlar haftalık toplam üretim değerlerinde ciddi farklılıklara sebep olmuştur.

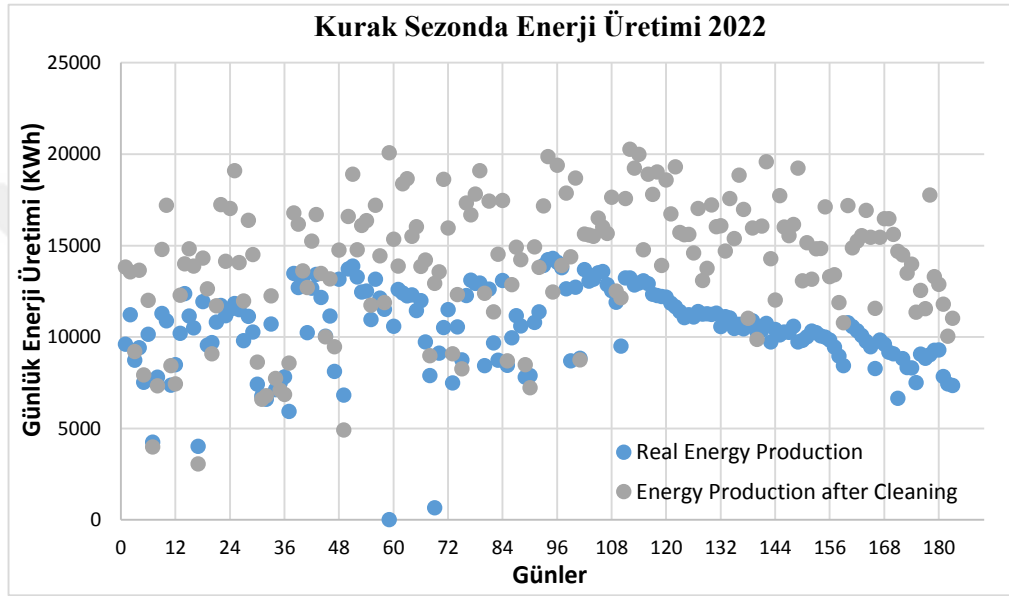
4.4 Kirlenme Oranı Hesaplaması ve Optimize Edilmiş Temizlik Sıklığı

Şekil 4.16 ve 4.17'de sunulan veriler, gerçek güç çıkışı ile Bölüm 3.4'te açıklanan temizlik sürecinin uygulanmasından sonra elde edilen güç çıkışı arasında, Denklem 2'de özetlenen metodoloji kullanılarak karşılaştırmalı bir analiz yapılmaktadır.

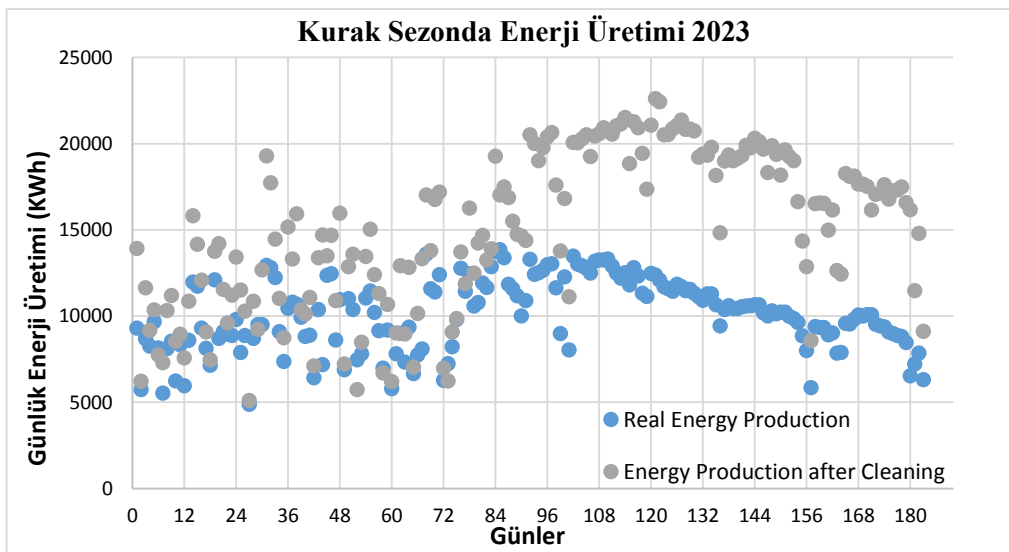
Sonuçlar, temizlik sürecinden sonra elde edilen güç çıkış değerlerinde, gerçek veya işlenmemiş güç çıkış verilerine kıyasla net ve önemli bir artış olduğunu göstermektedir. Temizlik müdahalesinin ardından artan bu enerji üretimi, temizlik

sürecinin daha elverişli çalışma koşulları veya sistem parametreleri ile sonuçlandığını, böylece enerji üretim kapasitesinin artmasına yol açtığını düşündürmektedir.

Veri noktalarının genel dağılımları, 2022 ve 2023 kuru mevsimleri arasında oldukça benzerdir. Bu durum, enerji üretim sistemindeki dinamiklerin tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, temizlik veya optimizasyon yoluyla elde edilen iyileştirmeler, gerçek ve temizlenmiş enerji üretimi arasındaki daha büyük farkla gösterildiği üzere, 2023 verilerinde daha belirgin görünmektedir.

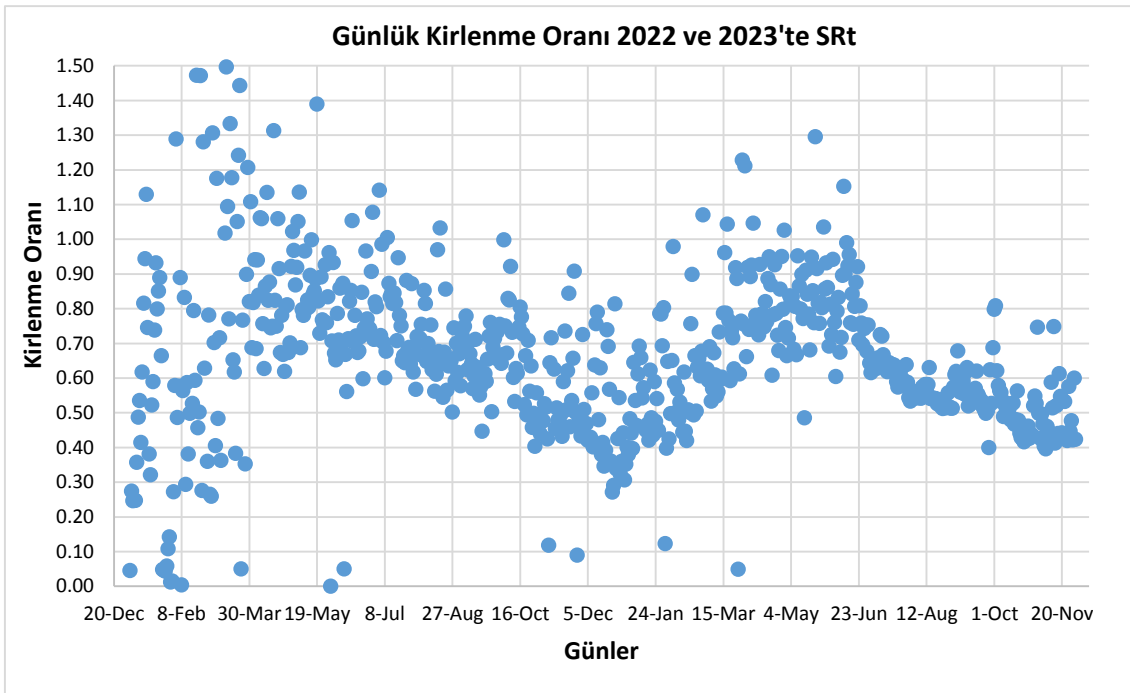


Şekil 4.16. Gerçek güç çıkışı ile 2022'nin kurak sezonunda her temizlikten sonra güç çıkışı arasındaki karşılaştırma.



Şekil 4.17. 2023'ün kurak sezonu boyunca her temizlikten sonra gerçek güç çıkışı ve güç çıkışı arasındaki karşılaştırma.

Theil-Sen yüzdesi (%), her bir aralıktaki performanstaki göreceli değişimin bir ölçüsüdür ve FV sisteminin kirlenme oranını tahmin etmek için kullanılabilir. Theil-Sen yöntemi, sıradan en küçük kareler regresyonuna kıyasla aykırı değerlere daha az duyarlı olan sağlam bir doğrusal regresyon tekniğidir. Bu, çeşitli çevresel faktörlerden etkilenebilen FV sistemi performans verilerini analiz etmek için uygun bir seçim haline getirmektedir. Theil-Sen yüzdesinin analizi ve günlük kirlenme oranının tahmini, toz birikiminin FV sisteminin performansı üzerindeki etkisi hakkında kayda değer bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 4.18. Günlük Kirlenme Oranı SRT 2022 ve 2023, 1'den büyük değerler uç değerler olarak kabul edilir ve bu uç değerlerin veri analizi üzerindeki etkisini azaltmak için Theil-Sen kullanılmıştır.

Çizelge 4.4, tespit edilen temizlik olayları arasındaki her bir aralık için tahmini kirlenme oranlarını sunmaktadır. Aşağıdaki tablo, aralık başına tahmini kirlenme oranlarını vermektedir. Temizlik olayları arasındaki her bir aralık için tahmini günlük kirlenme oranı, ortalama %0,2959/gün kirlenme oranı ile gösterilmiştir. Bu kirlenme oranı bilgisi, temizlik programlarını optimize etmek ve FV sisteminin uzun vadeli verimliliğini korumak için çok önemlidir.

Çizelge 4.4. Kuru sezonda temizlik aralıkları için kirlenme oranının hesaplanması.

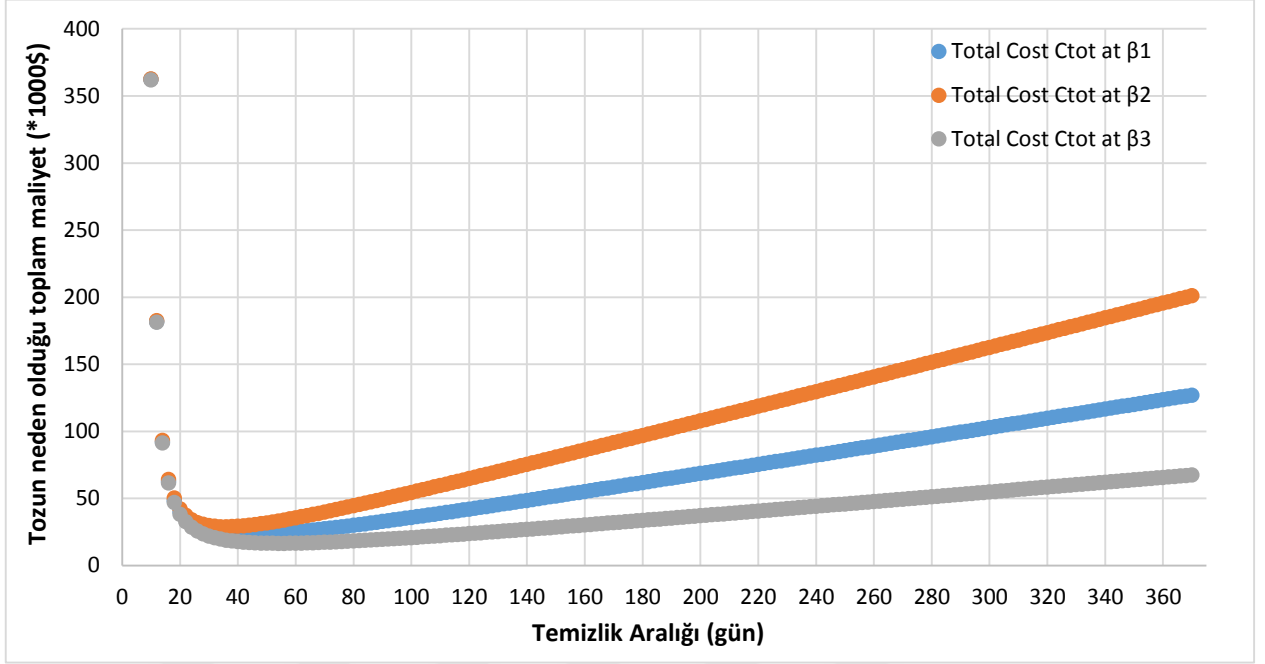
Aralık	Başlangıç Tarihi	Bitiş Tarihi	Toplam İşaretler	Uzunluk Aralığı (gün)	Theil-sen (%)
1	1.04.2023	27.04.2023	-1	27	-0.28490
2	28.04.2023	18.06.2023	-6	52	-0.452489
3	19.06.2023	23.09.2023	-7	97	-0.150344
-	-	-	Ortalama günlük		-0.2959%

Güneş panelleri santralini temizleyen her dönem arasında üç aralık bulunmaktadır:

- β_1 : (1.04.2023-27.04.2023), %0,2849/gün kirlenme oranı belirlenmiştir,
- β_2 : (28.04.2023-18.06.2023), %0,4525/gün kirlenme oranı kaydedilmiştir ve
- β_3 : (19.06.2023-23.09.2023), %0,1503/gün kirlenme oranı tahmin edilmiştir.

Robotik temizleme mekanizması, yaklaşık 1.000 \$/MW maliyetle temizleme işlemi yapmaktadır. Toplam iki yıldaki 366 gün süren kuru mevsimde, günlük enerji üretim oranı ortalama 10.296,11 kWh/gün olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'de, Temmuz başı itibarıyla, şebekeye bağlı sanayi tüketicileri için elektrik fiyatı 4,37 lira/kWh idi. Bu veri noktalarını kullanarak, belirtilen konumdaki güneş panelleri için optimal temizlik aralığını belirlemek üzere Bölüm 3.5'te özetlenen denklemler uygulanabilmektedir.

Şekil 4.19, β_1 , β_2 ve β_3 olarak belirtilen çeşitli kirlenme oranı senaryoları altında fotovoltaik (FV) güneş santralleri için toz birikiminin neden olduğu toplam maliyetler ile temizlik aralıkları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Grafik, toplam maliyetin kirlenme oranının ve temizlik sıklığının bir fonksiyonu olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 4.19. Temizlik aralıklarının bir fonksiyonu olarak tozun neden olduğu toplam maliyet.

Her üç eğri de benzer bir U şeklinde desen sergilemektedir, başlangıçta minimum bir noktaya hızla düşer, ardından temizlik aralığı uzadıkça kademeli olarak artar. Bu desen, her senaryo için toplam maliyetleri en aza indiren optimal bir temizlik aralığını göstermektedir.

Grafik açıkça, farklı kirlenme oranlarının (β değerleri) değişen maliyet profillerine yol açtığını ortaya koymaktadır. β_3 (yeşil çizgi), çoğu aralıkta genellikle en düşük toplam maliyetleri gösterirken, β_2 (turuncu çizgi) en yüksek maliyetleri sunar. Bu görselleştirme, FV güneş santrallerinin en uygun maliyetli temizlik stratejisini belirlerken, sahaya özgü kirlenme oranlarını dikkate almanın önemini vurgulamaktadır.

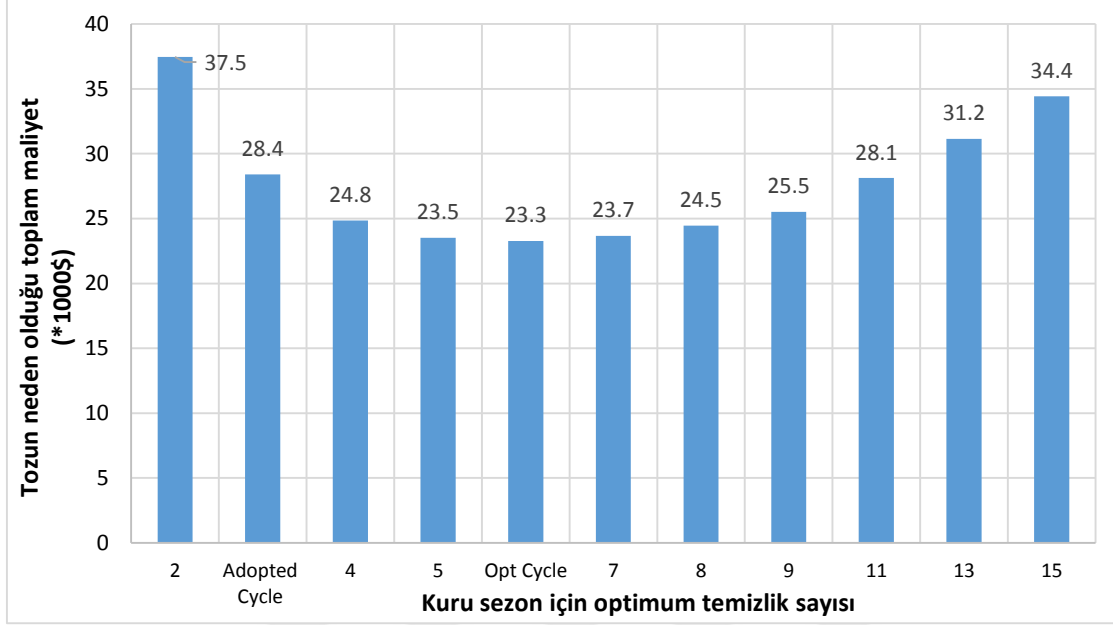
Bölüm 4,5'teki Denklem 10 aracılığıyla, bu tesisin enerji üretim verimliliğini optimize etmek için gerekli temizlik sayısı bulunabilir:

Kuru sezonda Optimum Temizlik Sayısı

$$= \frac{\text{Kurak mevsimdeki gün sayısı}}{\text{temizlik döngüleri arasında en uygun gün sayısı}}$$

Çalışma, güneş enerjisi santralının optimal temizlik döngüsünün 31 gün olduğunu ve kuru mevsim başına 6 temizliğe eşit olduğunu göstermektedir. Bu, toz birikiminden kaynaklanan toplam maliyeti optimize etmek için yılda 3 temizlik yapma mevcut uygulamasına kıyasla yıllık 3 ek temizlik operasyonu gerektirmektedir.

Şekil 4.20, incelenen konumda kuru mevsim boyunca toz kaynaklı toplam maliyet ile temizlik işlemi sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu analizin amacı, temizlik sıklığının optimizasyonu yoluyla toplam maliyetteki azalmayı tahmin etmektir.



Şekil 4.20. Temizlik döngüsünün bir fonksiyonu olarak tozun neden olduğu toplam maliyet.

Şekil, en düşük toplam maliyetin kuru mevsim başına 6 temizlik ile elde edildiğini göstermektedir. Bu, şekilde "opt döngü" olarak etiketlenmiştir. Bununla birlikte, 5 ila 8 temizlik (mevcut benimsenen döngü) arasındaki maliyet farkı nispeten küçüktür. Temizlik sıklığının yılda 3'ten 4'e çıkarılması, kuru mevsimde toplam maliyette 3600\$ azalma ile sonuçlanır. Aksine, temizlik sıklığının kuru mevsimde yılda 3'ten 2'ye düşürülmesi, toplam maliyette 9100\$'lık bir artışa yol açar. Önerilen optimal temizlik döngüsünü uygulayarak, FV modülleri üzerindeki toz birikiminden kaynaklanan toplam maliyet %18 oranında azaltılabilir.

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışma, toz birikiminin fotovoltaik (FV) sistemlerin verimliliği üzerindeki önemli etkisini, özellikle Konya ilindeki çalışma lokasyonu gibi kuru ve tozlu ortamlarda ortaya koymuştur. Güneş panelleri için düzenli bir temizlik programının uygulanmasının enerji üretimini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. 2022 (temizlik yapılmadan) ve 2023 (temizlik müdahaleleri ile) yılları arasında yapılan karşılaştırmalı analiz, temizlik müdahalelerini takiben ortalama haftalık enerji üretiminde yaklaşık %5-15'lik genel bir artışla, enerji çıkışında tutarlı iyileşmeler ortaya koymuştur.

Araştırma, kurak mevsim boyunca değişen kirlenme oranlarını vurgulamış, ortalama günlük kirlenme oranının % 0,2959 olduğu gözlemlenmiştir. Bu oran, optimal temizlik programlarının belirlenmesinde kritik önem taşımıştır. Ayrıca, çalışma çeşitli çevresel faktörler ile enerji üretimi arasındaki korelasyonu incelemiştir. Sıcaklık ve ışınım gibi faktörler enerji çıkışı ile pozitif korelasyon gösterirken, yağış ve nem negatif etkiler sergilemiştir. İstatistiksel analiz (ANOVA), 2022 ve 2023 yılları arasındaki çevresel koşulların benzerliğini doğrulayarak, bu iki dönem arasında yapılan karşılaştırmaların geçerliliğini teyit etmiştir.

Temizlik Tekniklerinin Etkinliği: Değerlendirilen çeşitli temizlik yöntemleri arasında, robotik temizlik en etkili yöntem olarak öne çıkmıştır. 2023 yılında üç kez uygulanan robotik temizlik, FV sisteminin enerji çıkışını ve stabilitesini önemli ölçüde artırmıştır. Manuel ve elektrostatik temizlik yöntemleri de verimlilikte iyileşmeler göstermiş, ancak robotik çözümlere kıyasla daha az etkili olmuştur.

Kapsamlı analiz ve modelleme çalışmaları sonucunda, güneş enerjisi santrali için optimal temizlik döngüsünün 31 gün olduğu, bunun da kurak mevsim başına 6 temizlemeye denk geldiği tespit edilmiştir. Bu optimal temizlik sıklığının uygulanması, FV modüllerinde toz birikiminden kaynaklanan toplam maliyeti potansiyel olarak %18 oranında azaltabilir. Özellikle, temizlik sıklığının yılda 3'ten 4'e çıkarılması, kurak mevsimde toplam maliyetleri 3600\$ düşürebilecektir.

Araştırma, özellikle uzun kurak mevsimler boyunca optimal fotovoltaik sistem performansını korumak için düzenli ve tutarlı temizlik uygulamalarının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, özellikle toz birikimine eğilimli bölgelerde güneş paneli verimliliğini korumak için robotik temizlik sistemlerinin etkinliğini göstermektedir. Bu çalışmada geliştirilen metodoloji, kirlenme oranlarını hesaplamak için Theil-Sen tahmincisinin kullanımı ve optimal temizlik sıklığını belirlemek için matematiksel model

dahil olmak üzere, benzer ortamlarda FV sistem bakımını optimize etmek için değerli bir çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma FV sistemleri için yerel çevre koşullarına ve kirlenme oranlarına dayalı özelleştirilmiş temizlik stratejilerinin kritik ihtiyacını vurgulamaktadır. Bulgular, optimize edilmiş bakım uygulamaları yoluyla enerji üretiminde önemli iyileştirmeler ve maliyet tasarrufu potansiyelini göstermektedir. Güneş enerjisinin küresel olarak benimsenmesi artmaya devam ederken, bu araştırmadan elde edilen bulgular, özellikle zorlu çevre koşullarında FV sistemlerinin verimliliğini ve ekonomik uygulanabilirliğini artırmaya katkıda bulunabilir.

5.2 Öneriler

Çalışmanın kapsamını Konya dışındaki bölgeleri, çeşitli bant genişliklerini ve birden fazla güneş enerjisi santralini içerecek şekilde genişletilebilir. Bu yaklaşım, farklı ortamlarda fotovoltaik üniteler üzerindeki temizleme etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Çalışma sahasındaki mevsimsel toz koşullarını izlemek için özelleştirilmiş sensörler veya gelişmiş yapay zekâ destekli takip sistemleri tasarlanabilir. Bu, optimum temizleme sıklığı, temizlemeler arası aralıklar ve takip süreçleri konusunda daha doğru karar vermeyi sağlayacak, temizlemenin gerçekten gerekli olduğunda yapılmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada kullanılan robot temizleme yönteminin ötesinde daha kapsamlı ve ekonomik temizleme teknikleri araştırılabilir. Otomatik temizleme sistemleri, kendi kendini temizleyen kaplamalar ve diğer yeni teknolojilerin potansiyelini değerlendirilebilir. Bu alternatifler enerji profesyonellerine karar alma aşamasında yardımcı olabilir.

KAYNAKLAR

- Abas, N., Kalair, A., & Khan, N. (2015). Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, 69, 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.03.003>
- Abdelsalam, M. A. M., Ahmad, F. F., Hamid, A., Ghenai, C., Rejeb, O., Alchadirchy, M., Obaid, W., & El Haj Assad, M. (2021). Experimental study of the impact of dust on azimuth tracking solar PV in Sharjah. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(5), 3671-3681. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i5.pp3671-3681>
- Abiola-Ogedengbe, A., Hangan, H., & Siddiqui, K. (2015). Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*, 78, 657-665. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.037>
- Addington, M., & Schodek, D. L. (2005). *Smart Materials and Technologies in Architecture*.
- Adinoyi, M. J., & Said, S. A. M. (2013). Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 60, 633-636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>
- Alami, A. H., Rabaia, M. K. H., Sayed, E. T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., Alasad, S., & Olabi, A. G. (2022). Management of potential challenges of PV technology proliferation. *İçinde Sustainable Energy Technologies and Assessments* (C. 51). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101942>
- Allouhi, A., Rehman, S., Buker, M. S., & Said, Z. (2022). Up-to-date literature review on Solar PV systems: Technology progress, market status and R&D. *İçinde Journal of Cleaner Production* (C. 362). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132339>
- Alonso-García, M. C., Ruiz, J. M., & Chenlo, F. (2006). Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(3), 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.04.022>
- Ansley, & Steven R. (2005). Calhoun: The NPS Institutional Archive The photovoltaic power converter: a technology readiness assessment. <http://hdl.handle.net/10945/10023>
- Aslam, A., Ahmed, N., Qureshi, S. A., Assadi, M., & Ahmed, N. (2022). Advances in Solar PV Systems; A Comprehensive Review of PV Performance, Influencing Factors, and Mitigation Techniques. *İçinde Energies* (C. 15, Sayı 20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15207595>
- Aslam, A., Khan, A. N., Ahmed, N., Ahmed, N., Imran, K., & Mahmood, M. (2021, Nisan 10). Effect of fixed and seasonal tilt angles on the performance of an ON-Grid PV plant. 2021 International Conference on Emerging Power Technologies, ICEPT 2021. <https://doi.org/10.1109/ICEPT51706.2021.9435464>
- Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., & Zabihi, M. (2001). The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran. *İçinde Renewable Energy* (C. 24). www.elsevier.nl/locate/renene

- Assi, A., Hassan, A., Al-Shamisi, M., & Hejase, H. (t.y.). Removal of Air Blown Dust from Photovoltaic Arrays Using Forced Air Flow of Return Air from Air Conditioning Systems.
- Azzouz, A., Platon, N., Nousir, S., Ghomari, K., Nistor, D., Shiao, T. C., & Roy, R. (2013). OH-enriched organo-montmorillonites for potential applications in carbon dioxide separation and concentration. *Separation and Purification Technology*, 108, 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.02.006>
- Azzouz, A., & Roy, R. (2023). Innovative Strategy for Truly Reversible Capture of Polluting Gases—Application to Carbon Dioxide. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(22), 16463. <https://doi.org/10.3390/ijms242216463>
- Bagher, A. M., Mohsen, M., & Vahid, M. M. A. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94. <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
- Bakirci, K. (2012). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *İçinde Renewable and Sustainable Energy Reviews (C. 16, Sayı 8, ss. 6149-6159)*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009>
- Bürer, M. J., & Wüstenhagen, R. (2009). Which renewable energy policy is a venture capitalist's best friend? Empirical evidence from a survey of international cleantech investors. *Energy Policy*, 37(12), 4997-5006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.071>
- Chaichan, M. T., & Kazem, H. A. (2020). Experimental evaluation of dust composition impact on photovoltaic performance in Iraq. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1746444>
- Chapin, D. (1954). New silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. 25. <https://doi.org/10.1063/1.1721711>
- Chen, J., Pan, G., Ouyang, J., Ma, J., Fu, L., & Zhang, L. (2020). Study on impacts of dust accumulation and rainfall on PV power reduction in East China. *Energy*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116915>
- Chesnutt, J. K. W., Ashkanani, H., Guo, B., & Wu, C. Y. (2017). Simulation of microscale particle interactions for optimization of an electrodynamic dust shield to clean desert dust from solar panels. *Solar Energy*, 155, 1197-1207. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.064>
- Choobari, O. A., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *İçinde Atmospheric Research (C. 138, ss. 152-165)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.007>
- Costa, S. C. S., Diniz, A. S. A. C., & Kazmerski, L. L. (2016). Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015. *İçinde Renewable and Sustainable Energy Reviews (C. 63, ss. 33-61)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.059>

- Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M. A., & Alawadhi, H. (2015). Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 41, ss. 735-744). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.068>
- Deb, D., & Brahmabhatt, N. L. (2018). Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 82, ss. 3306-3313). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.014>
- Demenkova, T. A., Korzhova, O. A., & Phinenko, A. A. (2017). Modelling of Algorithms for Solar Panels Control Systems. *Procedia Computer Science*, 103, 589-596. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.072>
- Dewi, T., Risma, P., & Oktarina, Y. (2019). A Review of Factors Affecting the Efficiency and Output of a PV System Applied in Tropical Climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 258(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012039>
- Doble, D. M. J., Kurtz, S. R., Marion, B., Perdichizzi, R. F., Christian, T., Koch, M., Li, B., Muller, M., Ebert, M., & Duell, M. (2010). Impact of Structured Glass on Light Transmission, Temperature and Power of PV Modules. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135480228>
- Dobos, A. P. (2014). PVWatts Version 5 Manual. www.nrel.gov/publications.
- Du, X., Jiang, F., Liu, E., Wu, C., & Ghorbel, F. H. (2019). Turbulent airflow dust particle removal from solar panel surface: Analysis and experiment. *Journal of Aerosol Science*, 130, 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.01.005>
- Ekinci, F., Yavuzdeğer, A., Nazlıgöl, H., Esenboğa, B., Doğru Mert, B., & Demirdelen, T. (2022). Experimental investigation on solar PV panel dust cleaning with solution method. *Solar Energy*, 237, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.066>
- El-Shobokshy, M. S., & Hussein, F. M. (1993). Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy*, 51(6), 505-511. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90135-B](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90135-B)
- EnerData. (2023, Aralık 25). 99.5% of Türkiye's power capacity growth in 2023 came from renewables. <https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/995-turkiyes-power-capacity-growth-2023-came-renewables.html>.
- Farrokhi Derakhshandeh, J., Alluqman, R., Mohammad, S., AlHussain, H., AlHendi, G., AlEid, D., & Ahmad, Z. (2021). A comprehensive review of automatic cleaning systems of solar panels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101518>
- Figgis, B., & Bermudez, V. (2021). PV coating abrasion by cleaning machines in desert environments – measurement techniques and test conditions. *Çinde Solar Energy* (C. 225, ss. 252-258). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.039>

- Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. S. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 80, ss. 1499-1511). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>
- Ghazi, S., Sayigh, A., & Ip, K. (2014). Dust effect on flat surfaces - A review paper. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 33, ss. 742-751). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.016>
- Gholami, A., Khazaei, I., Eslami, S., Zandi, M., & Akrami, E. (2018). Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance. *Solar Energy*, 159, 346-352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.010>
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2012RG000388>
- Global Energy Statistical Yearbook. (2023). Global energy consumption growth slowed down in 2022 (+2.1%) but remained higher than its average 2010-2019 growth rate (+1.4%/year). <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>.
- González-Castillo, M., Navarrete, P., Tapia, T., Lorca, Á., Olivares, D., & Negrete-Pincetic, M. (2023). Cleaning scheduling in photovoltaic solar farms with deterministic and stochastic optimization. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101147>
- Grover, S. (2007). Energy, Economic, and Environmental Benefits of the Solar America Initiative. <http://www.osti.gov/bridge>
- Gu, Y., Liou, K. N., Jiang, J. H., Su, H., & Liu, X. (2012). Dust aerosol impact on North Africa climate: a GCM investigation of aerosol-cloud-radiation interactions using A-Train satellite data. *Atmos. Chem. Phys.*, 12(4), 1667-1679. <https://doi.org/10.5194/acp-12-1667-2012>
- Guan, Y., Zhang, H., Xiao, B., Zhou, Z., & Yan, X. (2017). In-situ investigation of the effect of dust deposition on the performance of polycrystalline silicon photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 101, 1273-1284. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.009>
- Gunerhan, H., Hepbasli, A., & Giresunlu, U. (2009). Environmental impacts from the solar energy systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 31(2), 1131-1138. <https://doi.org/10.1080/15567030701512733>
- Guo, B., Javed, W., Figgis, B. W., & Mirza, T. (2015). Effect of Dust and Weather Conditions on Photovoltaic Performance in Doha, Qatar. 2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE). <https://ieeexplore.ieee.org/document/7208718>

- Gupta, N., Mankar, A., Ghode, G., Charmode, K., & Halmare, A. (2019). The Solar Panel Cleaning Droid. *Çinde International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* (C. 7). www.ijraset.com
- Gwandu, B. A. L., & Creasey. (1995). Humidity: A factor in the appropriate positioning of a photovoltaic power station. *Çinde Renewable Energy* (C. 6, Sayı 3).
- Hachicha, A. A., Al-Sawafta, I., & Said, Z. (2019). Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. *Renewable Energy*, 141, 287-297. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.004>
- Hasan, K., Yousuf, S. B., Tushar, M. S. H. K., Das, B. K., Das, P., & Islam, M. S. (2022). Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review. *Çinde Energy Science and Engineering* (C. 10, Sayı 2, ss. 656-675). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/ese3.1043>
- Hasanuzzaman, M., Zubir, U. S., Ilham, N. I., & Seng Che, H. (2017). Global electricity demand, generation, grid system, and renewable energy polices: a review. *Çinde Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* (C. 6, Sayı 3). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/wene.222>
- Hassan, B., & Beshara, M. (2019). Using Renewable Energy Criteria for Construction Method Selection in Syrian Buildings. *Çinde Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* (C. 13, Sayı 2).
- Heiman, M. K., & Solomon, B. D. (2004). Power to the People: Electric Utility Restructuring and the Commitment to Renewable Energy. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(1), 94-116. <http://www.jstor.org/stable/3694070>
- Hoff, T. E., Wenger, H. J., Herig, C., & Shaw, R. W. (t.y.). A MICRO-GRID WITH PV, FUEL CELLS, AND ENERGY EFFICIENCY.
- Husain, A. A. F., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N., & Pandey, S. S. (2018). A review of transparent solar photovoltaic technologies. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 94, ss. 779-791). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.031>
- Ilse, K., Micheli, L., Figgis, B. W., Lange, K., Daßler, D., Hanifi, H., Wolfertstetter, F., Naumann, V., Hagendorf, C., Gottschalg, R., & Bagdahn, J. (2019). Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation. *Çinde Joule* (C. 3, Sayı 10, ss. 2303-2321). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.019>
- Ilse, K., Werner, M., Naumann, V., Figgis, B. W., Hagendorf, C., & Bagdahn, J. (2016). Microstructural analysis of the cementation process during soiling on glass surfaces in arid and semi-arid climates. *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*, 10(7), 525-529. <https://doi.org/10.1002/pssr.201600152>

- International Energy Agency. (2023, Aralık 23). IEA, Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2028. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2028>, IEA.
- Johansson, B. (2013). Security aspects of future renewable energy systems-A short overview. *Energy*, 61, 598-605. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.023>
- Kaddoura, T. O., Ramli, M. A. M., & Al-Turki, Y. A. (2016). On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 65, ss. 626-634). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.032>
- Kaldellis, J. K., & Kapsali, M. (2011). Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements. *Energy*, 36(8), 5154-5161. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.018>
- Kavlak, G., McNerney, J., & Trancik, J. E. (2018). Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy*, 123, 700-710. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>
- Kawamura, H., Naka, K., Yonekura, N., Yamanaka, S., Kawamura, H., Ohno, H., & Naito, K. (2003). Simulation of I2V characteristics of a PV module with shaded PV cells. *Çinde Solar Energy Materials & Solar Cells* (C. 75).
- Kaygusuz, K. (2001). Renewable Energy: Power For a Sustainable Future. *Çinde ENERGY EXPLORATION & EXPLOITATION* • (C. 19). <https://about.jstor.org/terms>
- Kazem, A. A., Chaichan, M. T., & Kazem, H. A. (2014). Dust effect on photovoltaic utilization in Iraq: Review article. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 37, ss. 734-749). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.073>
- Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2019). The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman. *Solar Energy*, 187, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.036>
- Kempe, M. D. (2006). Modeling of rates of moisture ingress into photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(16), 2720-2738. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.04.002>
- Khilar, R., Suba, G. M., Kumar, T. S., Isaac, J. S., Shinde, S. K., Ramya, S., Prabhu, V., & Erko, K. G. (2022). Improving the Efficiency of Photovoltaic Panels Using Machine Learning Approach. *International Journal of Photoenergy*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4921153>
- Klugmann-Radziemska, E. (2015). Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland. *Renewable Energy*, 78, 418-426. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.018>

- Kok, J. F., Parteli, E. J. R., Michaels, T. I., & Karam, D. B. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on Progress in Physics*, 75(10). <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>
- Lambert, R. J., & Silva, P. P. (2012). The challenges of determining the employment effects of renewable energy. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 16, Sayı 7, ss. 4667-4674). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.072>
- Lewis, N. S., Crabtree, G., Nozik, A. J., Wasielewski, M. R., Alivisatos, P., Kung, H., Tsao, J., Chandler, E., Walukiewicz, W., Spitler, M., Ellingson, R., Overend, R., Mazer, J., Gress, M., Horwitz, J., Ashton, C., Herndon, B., Shapard, L., & Nault, R. M. (2005). Basic Research Needs for Solar Energy Utilization. Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization, April 18-21, 2005. <https://doi.org/10.2172/899136>
- Li, X., Mauzerall, D. L., & Bergin, M. H. (2020a). Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling. *Nature Sustainability*, 3(9), 720-727. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0553-2>
- Li, X., Mauzerall, D. L., & Bergin, M. H. (2020b). Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling. *Nature Sustainability*, 3(9), 720-727. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0553-2>
- Louis, J. R., Shanmugham, S., Gunasekar, K., Atla, N. R., & Murugesan, K. (2016). Effective utilisation and efficient maximum over extraction in partially shaded photovoltaic systems using minimum distance-average-based clustering algorithm. *IET Renewable Power Generation*, 10(3), 319-326. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0316>
- Lu, X., Zhang, Q., & Hu, J. (2013). A linear piezoelectric actuator based solar panel cleaning system. *Energy*, 60, 401-406. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.058>
- Makki, A., Omer, S., & Sabir, H. (2015). Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 41, ss. 658-684). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.069>
- Mani, M., & Pillai, R. (2010a). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 14, Sayı 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
- Mani, M., & Pillai, R. (2010b). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 14, Sayı 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 16, Sayı 5, ss. 2920-2925). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>

- Meral, M. E., & Diner, F. (2011). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 15, Sayı 5, ss. 2176-2184). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.010>
- Micheli, L., Ruth, D., Deceglie, M. G., & Muller, M. (2013). Time Series Analysis of Photovoltaic Soiling Station Data: Version 1.0, August 2017. www.nrel.gov/publications.
- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Çinde Aeolian Research* (C. 24, ss. 53-63). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Miller, R. L., Tegen, I., & Perlwitz, J. (2004). Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2003JD004085>
- Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., & El-Sherif, H. (2013). Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels. *Energy Conversion and Management*, 68, 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.022>
- Mohiuddin, A. K. M., Bin Sabarudin, M. S., Ali Khan, A., & Ihsan, S. I. (2017). Design and development of hybrid energy generator (photovoltaics) with solar tracker. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 184(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/184/1/012043>
- Mondal, A. K., & Bansal, K. (2015). A brief history and future aspects in automatic cleaning systems for solar photovoltaic panels. *Advanced Robotics*, 29(8), 515-524. <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.996602>
- Mondol, J. D., Yohanis, Y. G., & Norton, B. (2007). The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, 32(1), 118-140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.05.006>
- Moodley, P. (2021). 1 - Sustainable biofuels: opportunities and challenges. *Çinde R. C. Ray (Ed.), Sustainable Biofuels* (ss. 1-20). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820297-5.00003-7>
- Morman, S. A., & Plumlee, G. S. (2013). The role of airborne mineral dusts in human disease. *Çinde Aeolian Research* (C. 9, ss. 203-212). <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2012.12.001>
- Morman, S. A., & Plumlee, G. S. (2014). Dust and Human Health. *Çinde P. Knippertz & J.-B. W. Stuut (Ed.), Mineral Dust: A Key Player in the Earth System* (ss. 385-409). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3_15
- Myyas, R. N., Al-Dabbasa, M., Tostado-Véliz, M., & Jurado, F. (2022). A novel solar panel cleaning mechanism to improve performance and harvesting rainwater. *Solar Energy*, 237, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.068>
- Ndiaye, A., Charki, A., Kobi, A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, P. A., & Sambou, V. (2013). Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy*, 96, 140-151. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>

- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Çinde Cogent Engineering (C. 3, Sayı 1)*. Cogent OA. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- Pabortsava, K., Lampitt, R. S., Benson, J., Crowe, C., McLachlan, R., Le Moigne, F. A. C., Mark Moore, C., Pebody, C., Provost, P., Rees, A. P., Tilstone, G. H., & Woodward, E. M. S. (2017). Carbon sequestration in the deep Atlantic enhanced by Saharan dust. *Nature Geoscience*, 10(3), 189-194. <https://doi.org/10.1038/ngeo2899>
- Pan, A., Lu, H., & Zhang, L. Z. (2019). Experimental investigation of dust deposition reduction on solar cell covering glass by different self-cleaning coatings. *Energy*, 181, 645-653. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.223>
- Park, Y. B., Im, H., Im, M., & Choi, Y. K. (2011). Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications. *Journal of Materials Chemistry*, 21(3), 633-636. <https://doi.org/10.1039/c0jm02463e>
- Parrott, B., & Aramco, S. (2018). Automated, Robotic Dry-Cleaning of Solar Panels in Thuwal, Saudi Arabia using a Silicone Rubber Brush Photocatalytic Water Splitting Device For Solar Power Generation [View project](https://www.researchgate.net/publication/326266398) [Solar Cells](https://www.researchgate.net/publication/326266398) [View project](https://www.researchgate.net/publication/326266398). <https://www.researchgate.net/publication/326266398>
- Patsalides, M., Evagorou, D., Makrides, G., Achillides, Z., Georghiou, G. E., Stavrou, A., Efthimiou, V., Zinsser, B., Schmitt, W., & Werner, J. H. (2007). The effect of solar irradiance on the power quality behaviour of grid connected photovoltaic systems. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(5), 323-330. <https://doi.org/10.24084/repqj05.284>
- Paudyal, B. R., & Shakya, S. R. (2016). Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu. *Solar Energy*, 135, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.046>
- Ramadhan, R. A. A., Heatubun, Y. R. J., Tan, S. F., & Lee, H. J. (2021). Comparison of physical and machine learning models for estimating solar irradiance and photovoltaic power. *Renewable Energy*, 178, 1006-1019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.079>
- Ravindra, K., Mittal, A. K., & Van Grieken, R. (2001). Health Risk Assessment of Urban Suspended Particulate Matter with Special Reference to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Review. *Çinde REVIEW ON ENVIRONMENTAL HEALTH (C. 16)*.
- Riffat, S., & Mardiana, A. (2015). Building Energy Consumption and Carbon dioxide Emissions: Threat to Climate Change. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, s3. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.s3-001>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.074>

- Roy, P., Sinha, N. K., & Khare, A. (2019). An investigation on the impact of temperature variation over the performance of tin-based perovskite solar cell: A numerical simulation approach. *Materials Today: Proceedings*, 39, 2022-2026. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.281>
- Said, S. A. M., Hassan, G., Walwil, H. M., & Al-Aqeeli, N. (2018). The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews (C)*, 82, ss. 743-760). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.042>
- Saidan, M., Albaali, A. G., Alasis, E., & Kaldellis, J. K. (2016). Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. *Renewable Energy*, 92, 499-505. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.031>
- Saidou Chaibou, A. A., Ma, X., & Sha, T. (2020). Dust radiative forcing and its impact on surface energy budget over West Africa. *Scientific Reports*, 10(1), 12236. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69223-4>
- Salamah, T., Ramahi, A., Alamara, K., Juaidi, A., Abdallah, R., Abdelkareem, M. A., Amer, E. C., & Olabi, A. G. (2022). Effect of dust and methods of cleaning on the performance of solar PV module for different climate regions: Comprehensive review. *Çinde Science of the Total Environment (C)*, 827). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154050>
- Sarannya, C., & Manoj, K. M. V. (2021, Haziran 16). Performance Evaluation of 50 kW Solar PV Power Plant Installed in a Technical Institution. *ICCISc 2021 - 2021 International Conference on Communication, Control and Information Sciences, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICCISc52257.2021.9484969>
- Sayyah, A., Horenstein, M. N., & Mazumder, M. K. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 107, 576-604. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>
- Shaikh, M. R. S., Waghmare, S. B., Labade, S. S., Fuke, P. V., & Tekale, A. (2017). A Review Paper on Electricity Generation from Solar Energy. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 887. www.ijraset.com1884
- Shao, Y., Wyrwoll, K. H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., Mikami, M., Tanaka, T. Y., Wang, X., & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Çinde Aeolian Research (C)*, 2, Sayı 4, ss. 181-204). <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>
- Skomedal, Å., Haug, H., & Marstein, E. S. (2019). Endogenous Soiling Rate Determination and Detection of Cleaning Events in Utility-Scale PV Plants. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(3), 858-863. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2899741>
- Solcast. (t.y.). Solcast API Toolkit. <https://kb.solcast.com.au/researcher-and-student-access-to-the-solcast-api-service>.

- Talaat, M., Said, T., Essa, M. A., & Hatata, A. Y. (2022). Integrated MFFNN-MVO approach for PV solar power forecasting considering thermal effects and environmental conditions. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107570>
- Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J., & Urmee, T. (2018). Energy and economic losses caused by dust on residential photovoltaic (PV) systems deployed in different climate areas. *Renewable Energy*, 120, 401-412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.076>
- The International Renewable Energy Agency (IRENA). (2017). *Renewable Power Generation Costs in 2017*.
- Udayakumar, M. D., Anushree, G., Sathyaraj, J., & Manjunathan, A. (2021). The impact of advanced technological developments on solar PV value chain. *Materials Today: Proceedings*, 45, 2053-2058. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.588>
- Vaishak, S., & Bhale, P. V. (2019). Effect of dust deposition on performance characteristics of a refrigerant based photovoltaic/thermal system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100548>
- Vasel, A., & Iakovidis, F. (2017). The effect of wind direction on the performance of solar PV plants. *Energy Conversion and Management*, 153, 455-461. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.077>
- Vasiljev, P., Borodinas, S., Bareikis, R., & Struckas, A. (2013). Ultrasonic system for solar panel cleaning. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 200, 74-78. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.009>
- Vidyanandan, K. V. (2017). An Overview of Factors Affecting the Performance of Solar PV Systems. <https://www.researchgate.net/publication/319165448>
- Viitanen, J. (2015). Energy efficient lighting systems in buildings with integrated photovoltaics. www.aalto.fi
- Wan, L., Zhao, L., Xu, W., Guo, F., & Jiang, X. (2024). Dust deposition on the photovoltaic panel: A comprehensive survey on mechanisms, effects, mathematical modeling, cleaning methods, and monitoring systems. *Içinde Solar Energy (C. 268)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112300>
- Yilbas, B. S., Abubakar, A. A., Al-Qahtani, H., Mohammed, A. S., & Al-Sharafi, A. (2021). A novel method for dust mitigation from PV cell surfaces. *Solar Energy*, 225, 708-717. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.068>
- Yu, K., & Chen, J. (2009). Enhancing solar cell efficiencies through 1-D nanostructures. *Içinde Nanoscale Research Letters (C. 4, Sayı 1, ss. 1-10)*. <https://doi.org/10.1007/s11671-008-9200-y>

- Zapata, J. W., Perez, M. A., Kouro, S., Lensu, A., & Suuronen, A. (2015). Design of a Cleaning Program for a PV Plant Based on Analysis of Energy Losses. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(6), 1748-1756. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2478069>
- Zhang, J., Su, X., Shen, M., Dai, Z., Zhang, L., He, X., Cheng, W., Cao, M., & Zou, G. (2013). Enlarging photovoltaic effect: Combination of classic photoelectric and ferroelectric photovoltaic effects. *Scientific Reports*, 3. <https://doi.org/10.1038/srep02109>
- Zhang, X., Zhang, X., Dong, H., Zhao, Z., Zhang, S., & Huang, Y. (2012). Carbon capture with ionic liquids: Overview and progress. *Çinde Energy and Environmental Science (C. 5, Sayı 5, ss. 6668-6681)*. <https://doi.org/10.1039/c2ee21152a>
- Zhang, X., Zhao, L., Tong, D. Q., Wu, G., Dan, M., & Teng, B. (2016). A systematic review of global desert dust and associated human health effects. *Çinde Atmosphere (C. 7, Sayı 12)*. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/atmos7120158>

