



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE
TOZLANMANIN PANEL VERİMİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve TAN BAYAR

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI

Ağustos-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Merve TAN BAYAR tarafından hazırlanan “**Fotovoltaik sistemlerde tozlanmanın panel verimi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması**” adlı tez çalışması 17/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dal’ında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI

Üye

Doç. Dr. Melih KUNCAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza
Merve TAN BAYAR
Tarih: 17.08.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE TOZLANMANIN PANEL VERİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Merve TAN BAYAR

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI

2022, 99 Sayfa

Jüri

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI
Prof. Dr. Hüseyin AYDIN
Doç. Dr. Melih KUNCAN

Fotovoltaik hücreler, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerin en temel bileşenleridir. Bu hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan fotovoltaik panellerin enerji dönüştürme miktarını en çok etkileyen parametre, panel yüzeylerinin maruz kaldığı ışınım değeridir. Bundan dolayı fotovoltaik sistemler, güneşten yeryüzüne gelen ışıınımdan azami derecede faydalanmak üzere, genellikle güneşlenme süresi ve ışınım miktarı bakımından yeterli olarak bilinen güneş bandı bölgelerinde tesis edilirler. Açık hava şartlarında çalışan bu sistemler, her türlü çevresel olumsuzlukla karşı karşıyadır. Fotovoltaik sistemlerin verimi üzerindeki en önemli faktörlerden biri de, panel yüzeyinde oluşan tozlanmadır. Çeşitli etkenlerle havada bulunan tozların zamanla panel yüzeyini kaplaması, hücrelere ulaşan ışınım miktarını azaltmaktadır. Işıınımin azalmasıyla meydana gelen enerji dönüşüm oranındaki kayıplar önemli değerlere ulaşabilmektedir. Tozlanma eğilimi, bu sistemlerin kurulduğu bölgenin hava sıcaklığı, nem miktarı, rüzgâr rejimi, toprak yapısı ve bitki örtüsüne göre değişmektedir. Bu çalışmada, Batman ilinde tozlanmanın panel verimi üzerindeki etkisini araştırmak üzere bir deney seti kurulmuştur. Deneysel çalışmada, killi, kireçli ve şehirselsel toz numuneleri kullanılmıştır. Panellerin gün sayısına göre tozlanma miktarı, bir dizi ön test ile belirlenmiştir. Orta ve uzun vadede panel yüzeyinde meydana gelecek doğal tozlanma miktarını belirlemek zor olduğundan, bu miktarlar geliştirilen YSA modeli ile saptanmıştır. Temiz bir fotovoltaik panel ile yüzeyinde 1, 2, 3, 4, 5 günlük ve 1, 3 ve 6 aylık toz biriken fotovoltaik panellerin ürettiği enerji değerleri ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre, temiz panele kıyasla 5 günlük tozlanmaya maruz kalan paneller, killi, kireçli ve şehirselsel toz numuneleri için sırasıyla %3,53, %5 ve %5,18 daha az enerji üretmiştir. Temiz panele kıyasla 1 aylık tozlanmaya maruz kalan paneller, killi, kireçli ve şehirselsel toz numuneleri için sırasıyla yaklaşık %18, %26 ve %28 daha az enerji üretmiştir. Temiz panele kıyasla 3 aylık tozlanmaya maruz kalan paneller, killi, kireçli ve şehirselsel toz numuneleri için sırasıyla yaklaşık %46, %61 ve %63 daha az enerji üretmiştir. Temiz panele kıyasla 6 aylık tozlanmaya maruz kalan paneller, killi, kireçli ve şehirselsel toz numuneleri için sırasıyla yaklaşık %67, %77 ve %78 daha az enerji üretmiştir. Ölçülen veriler kullanılarak yapılan hesaplamalar, grafik ve tablolar halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, PV hücre verimi, PV sistemlerde tozlanma, Yenilenebilir enerji

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DUST ACCUMULATION ON PANEL EFFICIENCY IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Merve TAN BAYAR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. İsmail KAYRI

2022, 99 Pages

Jury

**Advisor: Asst. Prof. Dr. İsmail KAYRI
Prof. Dr. Hüseyin AYDIN
Assoc. Prof. Dr. Melih KUNCAN**

Photovoltaic cells are the most basic components of systems that convert solar energy into electrical energy. The parameter that have the most affects the energy conversion amount of the photovoltaic panels formed by combining these cells is the irradiation value by which the panel surfaces are exposed. Therefore, photovoltaic systems are generally installed in sun belt regions that are known to be sufficient in terms of sunshine duration and amount of radiation in order to make maximum use of the radiation coming from the sun to the earth. These systems that operate in outdoor conditions are faced with all kinds of environmental obstacles. One of the most important factors effecting on the efficiency of photovoltaic systems is dusting on the panel surface. Due to various factors, dust in the air covers the panel surface over time, reducing the amount of irradiation reaching the cells. The losses in the energy conversion rate that occur with the reduction of irradiation can reach significant values. Dusting tendency varies according to the air temperature, humidity, wind regime, soil structure and vegetation of the region where these systems are installed. In this study, an experimental setup was manufactured in order to investigate the effect of dust accumulation on panel efficiency. In the experimental study clay dust, calcareous dust and urban dust samples were used. The amount of dust accumulation on the panels according to the number of days was determined by a series of preliminary tests. Since it is difficult to determine the amount of natural dusting on the panel surface in the medium and long term, these amounts were determined by the developed ANN model. The energy values produced by a clean panel and panels with 1, 2, 3, 4, 5 days and 1, 3 and 6 months dust accumulation on the surface were measured. According to the findings, compared to the clean panel, the panels exposed to dust for 5 days produced 3.53%, 5% and 5.18% less energy for the clay dust, calcareous dust and urban dust samples, respectively. Compared to the clean panel, the panels exposed to dust for 1 month produced approximately 18%, 26% and 28% less energy for the clay dust, calcareous dust and urban dust samples, respectively. Compared to the clean panel, the panels exposed to 3 months of dust produced approximately 46%, 61% and 63% less energy for the clay dust, calcareous dust and urban dust samples, respectively. When compared with the clean panel, the panels exposed to dust for 6 months produced approximately 67%, 77% and 78% less energy for the clay dust, calcareous dust and urban dust samples, respectively. The calculated results by using the measured data are presented in graphs and tables.

Keywords: Dust accumulation in PV systems, PV cell efficiency, Renewable energy, Solar energy

TEŞEKKÜR

Fotovoltaik sistemlerde tozlanmanın panel verimi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması adlı yüksek lisans çalışmamın yürütülmesinde, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşmada gösterdiği sonsuz sabrı, yardımı ve desteği için saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI'ye ve tüm değerli bölüm hocalarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında olduğu gibi, bu tezin hazırlanmasında da yardımı ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Mehmet BAYAR'a teşekkür ederim.

Canım aileme özellikle de sevgili anneme ve sevgili babama hayatım boyunca maddi ve manevi sonsuz destekleri için teşekkür ederim.

Merve TAN BAYAR
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Araştırması	3
1.2. Tezin Yapısı	14
2. GENEL BİLGİLER.....	16
2.1. Yenilenebilir Enerji.....	16
2.2. Güneş Enerjisi.....	20
2.2.1. Dünyada güneş enerjisi.....	22
2.2.2. Türkiye’de güneş enerjisi.....	23
2.2.3. Batman’da güneş enerjisi.....	27
3. FOVOLTAİK (PV) PANELLER	31
3.1. Fotovoltaik Güneş Panellerinin Tarihçesi.....	32
3.2. Fotovoltaik Panel Çeşitleri.....	33
3.2.1. Kristalize silikon fotovoltaik hücreler	34
3.2.2. İnce film fotovoltaik hücreler	35
4. PV SİSTEMLERDE VERİM KAYBINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	39
4.1. Fotovoltaik Sistemlerde Tozlanma Kayıpları	39
4.2. Tozun Tanımı ve Çeşitleri	39
4.3. Kaynağına Göre Tozlar.....	40
4.3.1. İnsan kaynaklı tozlar	40
4.3.2. Doğal kaynaklı tozlar	40
4.4. Kimyasal Kökenine Göre Tozlar	40
4.4.1. Organik tozlar	40
4.4.2. İnorganik tozlar	40
4.5. Biyolojik Etkisi Açısından tozlar.....	41
4.5.1. Fibrojenik tozlar.....	41
4.5.2. Toksik tozlar	41
4.5.3. Kanserojen tozlar	41
4.5.4. Radyoaktif tozlar.....	41
4.5.5. Alerjik tozlar	42

4.5.6. İnert tozlar	42
4.6. Toz Birikim Oranına Etki Eden Etmenler	42
4.6.1. PV panellerin eğim açısı	42
4.6.2. Rüzgâr hızı	43
4.6.3. Nem.....	43
4.6.4. Yağış	43
4.6.5. Kaplama	43
4.6.6. Temizleme	43
4.6.7. Mevsimsel etki.....	44
4.6.8. Cam karakteristiği.....	44
4.6.9. Karlanma.....	44
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	45
5.1. Materyal.....	45
5.1.1. Deney setinin tanıtılması	45
5.1.2. Deneyde kullanılan toz çeşitleri.....	51
5.2. Yöntem.....	52
5.2.1. Doğal tozlanma miktarının belirlenmesi.....	52
5.2.2. Uzun vade tozlanma miktarlarının hesaplanması	54
5.2.3. Geliştirilen yapay sinir ağı modeli.....	56
5.2.4. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi.....	57
6. BULGULAR.....	64
6.1. Meteorolojik Veriler	64
6.1. Testlere Ait Veriler	66
6.1.1. 1 günlük test verileri	67
6.1.2. 2 günlük test verileri	68
6.1.3. 3 günlük test verileri	69
6.1.4. 4 günlük test verileri	70
6.1.5. 5 günlük test verileri	71
6.1.6. 1 aylık test verileri	72
6.1.7. 3 aylık test verileri	73
6.1.8. 6 aylık test verileri	74
6.1.9. Test günlerine ait kümülatif enerji üretimleri	75
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
7.1. Sonuçlar	78
7.2. Öneriler	80
KAYNAKLAR	82
EKLER	92
ÖZGEÇMİŞ	100

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 3.1. Değişik tip PV hücre ve modül verimlerinin karşılaştırılması	33
Tablo 5.1. PV panellerin karakteristik özellikler ($AM=1.5$ $E=1000$ W/m^2 $T_o=25$ C°). ..	46
Tablo 5.2. Farklı test günlerine ait ölçülen toz miktarları.....	54
Tablo 5.3. Uygulanan yöntemlerin başarımlar istatistikleri	55
Tablo 5.4. Orta ve uzun vade için YSA modelinin tahmin ettiği tozlanma miktarları ..	57
Tablo 5.5. Farklı test günü sayıları için hücre üzerinde tozların dağılımı	62
Tablo 6.1. Test günlerine göre kümülatif enerjiler ve verim kayıpları	76



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Türkiye kurulu güç gelişimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	17
Şekil 2.2. 09.04.2021 itibarıyla Türkiye’de üretimin kaynaklara göre dağılımı	18
Şekil 2.3. Türkiye 2019 enerji kaynakları kurulu güç tablosu.....	19
Şekil 2.4. Türkiye 2020 enerji kaynakları kurulu güç tablosu.....	19
Şekil 2.5. Yakın ve uzak gelecekte elektrik talebi ve farklı kaynakların payı	20
Şekil 2.6. Güneş enerji tarlası	21
Şekil 2.7. 2018 Yılı dünya birincil enerji arzında kaynakların payı.....	22
Şekil 2.8. Güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA)	23
Şekil 2.9. Türkiye güneşlenme süresi (saat)	25
Şekil 2.10. Türkiye global radyasyon değerleri.....	25
Şekil 2.11. Türkiye PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (KWh-Yıl).....	26
Şekil 2.12. Türkiye’de PV güneş kurulu gücü (MW /2015-2018 Temmuz).....	26
Şekil 2.13. Batman güneş enerjisi potansiyel atlası.....	27
Şekil 2.14. Batman güneşlenme süresi (saat)	28
Şekil 2.15. Batman global radyasyon değeri	28
Şekil 2.16. Batman ili PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (KWh-Yıl).....	29
Şekil 2.17. Batman ili ve Türkiye’nin global ışınlam değeri ve güneşlenme süresi	29
Şekil 3.1. Hücre panel ve dizi oluşumu	31
Şekil 3.2. Fotovoltaik panelin fiziksel yapısı	32
Şekil 3.3. Kare, yarı kare ve daire şeklindeki tek kristal silisyum hücreler	34
Şekil 3.4. Polikristal fotovoltaik hücreler	35
Şekil 3.5. İnce film fotovoltaik hücre	35
Şekil 3.6. Amorf silisyum fotovoltaik paneller	36
Şekil 3.7. Kadmiyum tellürid fotovoltaik panel	37
Şekil 3.8. Bakır İndiyum Diseleneid bir PV modül.....	38
Şekil 4.1. PV sistemde kayıplar.....	39
Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan taşıyıcı sistem ve PV paneller.....	45
Şekil 5.2. Meteoroloji istasyonu ve data logger	47
Şekil 5.3. Deneysel çalışmada kullanılan sensörler.....	48
Şekil 5.4. Rezistif yükler	49
Şekil 5.5. Gerilim bölücü devre (ön ve arka yüz).....	50
Şekil 5.6. Hassas terazi (RADWAG PS 1000.R2)	50
Şekil 5.7. Kullanılan toz türleri	51
Şekil 5.8. Toz türlerinin yakın görüntüsü	52
Şekil 5.9. Farklı zaman dilimlerine ait toz birikme görüntüleri	53
Şekil 5.10. Geliştirilen YSA modelinin mimari yapısı.....	56
Şekil 5.11. 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük testler için toz tartım işlemi	58
Şekil 5.12. 1, 3 ve 6 aylık testler için toz tartım işlemi	58
Şekil 5.13. 1 günlük yapay tozlandırma için toz numuneleri	59
Şekil 5.14. By-pass diyotları.....	60
Şekil 5.15. Temiz ve tozlu panel – Tozlandırılmış hücre	61
Şekil 5.16. Şeffaf yapıların hücre üzerindeki görüntüsü	61
Şekil 6.1. Veri setinin elde edilmesine ait genel blok diyagram	64
Şekil 6.2. Test günlerine ait meteorolojik veriler	65
Şekil 6.3. 1 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	67
Şekil 6.4. 2 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	68

Şekil 6.5. 3 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	69
Şekil 6.6. 4 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	70
Şekil 6.7. 5 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	71
Şekil 6.8. 1 aylık toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	72
Şekil 6.9. 3 aylık toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	73
Şekil 6.10. 6 aylık toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi	74
Şekil 6.10. Test günlerine ait temiz ve tozlu panellere ilişkin kümülatif enerjiler.....	76



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\bar{A}$	: Gerçek değerlerin ortalaması
A_i	: Gerçek değer
e	: Hata değeri
I_{mp}	: Maksimum güç noktası akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
N	: Örneklem sayısı
P_i	: Tahmin edilen değer
P_{max}	: Maksimum güç
R	: Korelasyon katsayısı
T_o	: İşletme sıcaklığı
V_{mp}	: Maksimum güç noktası gerilimi
V_{oc}	: Açık devre gerilimi

Kısaltmalar

AM	: Hava kütlesi
a-Si	: Amorf silikon
CdTe	: Kadmiyum tellürid
CIGS	: Bakır indiyum galyum diselenid
EVA	: Etilen vinil asetat
GaAs	: Galyum arsenit
GES	: Güneş enerjisi santrali
MAE	: Ortalama mutlak hata
MAPE	: Ortalama mutlak yüzde hata
mc-Si	: Monokristal silikon
MPPT	: Maksimum güç noktası izleyicisi
MSE	: Ortalama kare hata
pc-Si	: Polikristal silikon
PV	: Fotovoltaik
RES	: Rüzgâr enerjisi santrali
RMSE	: Kök ortalama kare hata
RSE	: Bağlı kare hata
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
STC	: Standart test koşulları
TEP	: Ton eşdeğer petrol
YSA	: Yapay sinir ağları

1. GİRİŞ

Dünyadaki ve ülkemizdeki ekonomik gelişmelerin artması, teknoloji kullanımının yaygınlaşması ve dünya nüfusunun hızla artması nedeniyle daha fazla enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden enerji, ekonomik büyüme ve sosyal gelişim için önemli bir unsur haline gelmiştir [1]. Dünya ülkelerinin yeni kaynaklar arayışına girdiği ve maliyeti düşük olan enerji kaynaklarına ilgi duyduğu açıktır. Küresel ısınma ve çeşitli iklim sorunlarının yol açabileceği problemler uzun bir zamandan sonra dikkate alınmaya başlanmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

Günümüzde tüketilen enerjinin büyük bir çoğunluğu fosil yakıt türlerinden (kömür, petrol ve doğal gaz) sağlanmaktadır. Fosil yakıtlar enerji üretimi sırasında toprak, hava ve suyu kirletip, insan, bitki ve hayvanlar üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır [2]. Asit yağmurlarına, sera gazları etkisiyle küresel ısınmalara, buzulların erimesine kadar birçok çevresel olaya sebep olmaktadır. Fosil yakıtların gözle görülür boyutta olumsuz etkilere yol açması, enerji kaynakları rezervlerinin tükenme sınırına yaklaşması ve bunun sonucuna bağlı olarak pahalı olmasına neden olduğundan, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) olan ilgi artmıştır.

Yenilenebilir enerji sürekliliği olan, doğadaki kaynaklardan elde edilebilen temiz bir enerjidir [2], bunun yanında dünya ve güneş var olduğu sürece bitmeyecek enerji anlamına gelmektedir. Fosil yakıtların alternatifi olan yenilenebilir enerji kaynakları; jeotermal enerji, hidrolik enerjisi, biokütle enerjisi, dalga enerjisi, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, gel-git enerjisi ve hidrojen enerjisidir [3].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, jeotermal enerji dışında kalan tüm enerji kaynaklarının başında güneş enerjisi gelmektedir. Dünyamızı yaşama elverişli bir yer haline getiren güneş enerjisidir [4]. Güneşten enerji elde etmek, yeterli ışınımı aldığı takdirde, kapalı havalarda bile mümkündür. İhtiyaç olunan enerji her alanda, her coğrafyada ve her iklim koşulunda bulunabilir [5]. Bu kullanım kolaylığını sağlayan güneş enerjisi, saf, tekrarlanabilir, uzun vadeli ve doğayı daha az kirleten ana enerji kaynağıdır.

Türkiye, güneş enerjisinden yararlanma açısından elverişli bir konuma sahiptir. Ülkemizde güneşlenme süresi oldukça fazladır. Bu durum bölgelere göre farklılık gösterse de Türkiye'nin tamamında güneş enerjisinden elektrik elde edebilme potansiyeli mevcuttur. TEİAŞ'ın 2009 ve 2019 yılları için birincil enerji kaynaklarına göre Türkiye'de bulunan kurulu gücü incelediğimizde Türkiye'de 2009 yılında güneş

enerjisinden elektrik elde edilmemiştir. 2019 yılında ise güneş enerjisinden 5.995,2 MW elektrik elde edilmiştir. Birincil enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi, kurulu gücün %6,57'sini oluşturmaktadır [6].

Güneş yaşadığımız evrendeki tüm enerji kaynaklarının temelidir ve fotovoltaiik (PV) panellerden elektrik almak için tek ihtiyaç güneştir. PV paneller yüzeylerine gelen güneş ışınlarını direkt doğru akım (DC) elektrik enerjisine dönüştürebilen bu işlem sırasında kristal silikon, galyum arsenit, kadmiyum tellürid gibi yarı iletken malzemeleri kullanan düzeneklerdir [7].

PV paneller hassas imalat tekniklerinden dolayı her türlü çevresel olaydan (toz, kuş pislikleri, nem, yağmur, eğim açısı, rüzgâr hızı, yüzey kalitesi vb.) farklı önem düzeylerinde etkilenirler. Çevresel olaylarla oluşacak kirlenmeler, panellerin yüzeylerine gelen ışınımlarda azalmaya sebep olacaktır. Bu durum da panellerin veriminin düşmesine neden olacaktır. Panellerin veriminin düşmesi, panelden alınan enerjiyi önemli derecede etkilemektedir [8-10].

Paneli etkileyen çevresel olayların başında kirlilik faktörü gelmektedir. Kirlenme bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Kirlenmeden kaynaklanan kayıpların bölgeye göre farklılık göstermesinin asıl sebebi kirlenme olayının kendisidir. Endüstriyel bölgelerin yakınında bulunan PV panellerde kirlenme, endüstriyel atık ürünlerinin bir kısmını içerebilir. Denize yakın bölgelerde kirlenme tuz içerebilir. Tarım alanlarına yakın konumda bulunan, PV sistemlerde ise kirlenme bitkisel ürünler içerebilir [7, 11].

Fotovoltaiik sistemlerde eğim açısı yatay olarak konumlandırılmış panellerin kir toplama oranları daha fazladır. Bu durum yaklaşık olarak %4 veya daha fazla verim kaybına neden olur. 20 derecelik bir açıdan yüksek bir açıyla konumlandırılan PV paneller, yağın yağmurun etkisiyle kendiliğinden temizlenebilmektedir [12]. PV panellerin yağmur etkisiyle temizlenmediği zamanlarda paneller belirli zaman aralıklarıyla temizlenmelidir [13]. Bilinen bu gerçeklere rağmen, PV panellerin kirlenme düzeyi birçok meteorolojik faktörden etkilendiği için, panelin eğimi, panelin kullanıldığı bölgenin rüzgâr, nem, sıcaklık, arazi yapısı, toprak yapısı, bitki örtüsü gibi birçok etmene bağlı olarak değişecektir. PV panellerde toz ve/veya kirlenmeye bağlı etkilerin ortaya konulduğu, çeşitli verim iyileştirmelerinin ve optimizasyon çalışmalarının yapıldığı bir dizi araştırma örneği aşağıda verilmiştir.

1.1. Kaynak Araştırması

Asl-Soleimani ve arkadaşları [14], PV sistemler üzerine yaptıkları çalışmada, endüstriyel ve otomobil kaynaklı hava kirliliğinin panel verimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada hava kirliliğinin mevsimlere göre değişiklik gösterdiğini ve bu değişikliğin sistem verimine olan etkilerinin de farklı olduğu ifade edilmiştir. Aynı zamanda çalışmada eğim açıları farklı olan PV modüller incelenmiştir. Kış şartlarında en fazla hava kirliliğinin olduğu ve bunun sonucunda verimin azaldığı sonucuna varılmıştır. Sonbahar mevsiminde ise havanın daha çok rüzgârlı olmasından dolayı hava kirliliğinde azalma olduğu ve buna bağlı olarak verimin kış şartlarına oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Yağmurlu havanın en çok olduğu ilkbahar mevsiminde ise; panellerdeki kirlenmenin doğal yıkanmadan dolayı azaldığı ve verimin en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kurulmuş olan sistemin eğim açısı arttıkça verimin de arttığı görülmüştür. Yaz mevsiminde yapılan ölçümlerin ise sonbahar ve ilkbahar mevsimlerinde ölçülen değerler aralığında olduğu kaydedilmiştir. En yüksek verimin yaz mevsiminde ve 23° eğim açısıyla olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda PV panel veriminin hava kirliliğine bağlı olarak %60'tan fazla azaldığı sonucuna varılmıştır.

Elminir [15], yaptığı çalışmada toz etkisinin 3 mm kalınlığındaki panel camlarının üzerindeki etkisini incelemiştir. Cam yüzeyine yerleşen toz miktarını ölçebilmek için sekiz farklı yönde yedi farklı açıya sahip 100 mm x 100 mm boyutunda cam örnekleri kullanılmıştır. Camlar ahşap çerçeve üzerine yerleştirilerek yedi ay boyunca bir aylık periyotlarla geçirgenlikleri ölçülmüştür. Deney öncesinde ve deney süreci boyunca 0.001 gram hassasiyete sahip Mettler PJ3000 terazisi kullanılmıştır. Cam yüzeyler üzerinde oluşan toz birikimleri ve yakındaki bir santralden PV paneller üzerinde biriken tozlar alınarak minerolojik analiz yapılmıştır. Çalışma sonucunda cam çerçeveler üzerinde biriken toz miktarlarının eşit olduğu tespit edilmiştir. Temiz ve kirli camların geçirgenliklerini kıyaslayabilmek için geçirgenlik ölçüm cihazına yerleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda iki cam arasındaki geçirgenlik farkının kirlenmeden dolayı azaldığı görülmüştür.

Kaldellis ve ark. [16] yaptıkları çalışmada, Yunanistan'ın başkenti Atina'da iki ay boyunca kentsel hava kirliliğinin PV paneller üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada güney eğimli 30° lik açıyla toplamda 5 çift PV panel üzerinde performans çalışması yapılmıştır. Bu panellerin hem temiz hem de kirli yüzey koşulları incelenmiştir. Çalışma sonucunda ortalama 1 g/m^2 'lik toz biriktirme yoğunluğu ele alındığında PV

panellerin enerji üretiminin %6,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kentsel hava kirliliğinin PV paneller üzerinde enerji verimini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Ju ve Fu [17] yaptıkları araştırmada, kirlenmenin PV panel performansına etkisini incelemişlerdir. Doğal ortam koşullarında kirlenen bir panel düzeneği ile yapay bir şekilde kirlenmesi sağlanan panel düzeneği hazırlamışlardır. Doğal ortam koşullarında tozlanmaya maruz kalan sistem 20 Temmuz ile 4 Ağustos tarihleri arasında incelenmiştir. Fotovoltaik panelin yüzeyinde biriken kirlilik belirli zamanlarda alınarak ağırlığı tartılmıştır. Alınan veriler ışığında PV panel yüzeyinde biriken kirlilik miktarının artması ile panelden alınan verim miktarının düştüğü gözlenmiştir. Yapay şekilde kirlenmesi sağlanan deney düzeneğinde ise $0,22 \text{ gr/m}^2$, 7 gr/m^2 , $13,82 \text{ gr/m}^2$, $38,11 \text{ gr/m}^2$ ve $41,97 \text{ gr/m}^2$ miktarlarında farklı kirlenme koşulları altında PV panel verimi incelenmiştir. Yapay kirlenme sonucu elde edilen veriler incelendiğinde toz miktarının bir metrekare için 10 grama kadar olan kısmı panel verimini yüksek oranda etkilediği gözlemlenmiştir ancak bir metrekare için 10 gramdan daha fazla yapay kirlenme oluşturulduğunda, kirlenme etkisinin verim kaybını daha az etkilediği tespit edilmiştir. Alınan veriler ışığında panel yüzeyinde kirlenmenin ilk oluşum sürecinin daha fazla verimi etkilediğinden daha fazla dikkat edilmesi gerektiği yorumu yapılmıştır.

Cano [18] yaptığı çalışmada eğim açısının kirlenme ve tozlanma üzerindeki etkisini incelemiştir. Eğim açısı azaldıkça kirlenme etkisinin arttığını buna bağlı olarak da tozlanmanın arttığını belirtmiştir. Yapılan araştırmada mevsimsel değişimlerden eğim açısının etkilendiği gözlemlenmiştir. Işınım değerinin ise rüzgârın ve yağmurun olmadığı zamanlarda panelde biriken toz miktarından dolayı azaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan değerlendirmede yağmurun etkisi ile panel yüzeyindeki tozlanma miktarının azaldığı da gözlemlenmiştir.

Sulaiman ve arkadaşları [19], yaptıkları araştırmada, toz birikiminin fotovoltaik panel performansına etkisini incelemişlerdir. Silikon monokristal fotovoltaik panel, ışınım kaynağı, multimetre ve ışınımölçer olarak deney düzeneği 4 parçadan oluşmaktadır. Kum ve pudra olmak üzere 2 tip yapay kirletici kullanılmıştır. Scanning Electron Microscope (SEM) kullanılarak PV panel üzerinde birikmiş olan parçacıkların boyutları ölçülmüştür. Deneylerde panelden elde edilen verim ve elektriksel güç üretimi hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda PV panel yüzeyinde biriken toz nedeni ile sistemden alınacak verimin yarı yarıya düşmesine neden olabileceği ve bununla birlikte

panellerin ürettiği elektrik enerjisi değerinin maksimum %18'e kadar azalabileceği sonucuna varılmıştır.

Jiang ve arkadaşları [20] yaptıkları araştırmada, panel yüzeyinde biriken toz yoğunluğunun verim kaybına etkisini incelemişlerdir. Farklı birikim yoğunluğundaki tozun verim kaybını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Panel yüzeyinde 22 g/m² toz yoğunluğunda verim oranının ne kadar düştüğü araştırılmıştır. Buna göre temiz panellerle kıyaslandığında metrekareye 22 gram toz birikim yoğunluğunun olduğu panelden alınan verimin %26 oranında düştüğü tespit edilmiştir.

Qasem ve ark. [21] PV panellerin eğim açısının tozlanma faktörüne etkisini araştırdığı çalışmalarında ayrıca modüllerin yerleştirilme şeklinin de verime olan etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada modüllerin dikey veya yatay konumlandırılması verimi ve gölgelendirmeyi etkilediği sonucuna varılmıştır. İnce film modüller dikey olarak konumlandırıldığında, silikon modüllere oranla gölgelenmeden çok daha az etkilendiği tespit edilmiştir.

Touati [22] yaptığı çalışmada, tozun monokristal ve amorf silikon fotovoltaik panellerin güç verimliliği üzerine etkisini incelemiştir. İklimsel ve çevresel sorunların fotovoltaik panelin verimini düşürdüğünü tespit etmiştir. Yaptığı çalışmalar sonucu monokristal fotovoltaik paneller, amorf fotovoltaik panellere göre %70'e kıyasla %85'e varan yüksek verime sahip olduğunu gözlemlemiştir. Böylece monokristal panellerin, amorf fotovoltaik panellere göre daha iyi verim alacağı sonucuna varmıştır. Bu durumda monokristal panellerin, amorf silikon panellere kıyasla çevresel olaylardan meydana gelebilecek etkilere karşı daha dirençli olduğu sonucuna varmıştır. Yani amorf fotovoltaik paneller monokristal fotovoltaik panellere kıyasla toz birikimine daha duyarlıdır.

Bength Stridh [23] araştırmaları sonucunda panelin tozlanmasının, panelden alınan enerjiyi ve bununla birlikte panelin kullanım süresini azaltarak tozlanmanın panel verimliliğine olan etkisini gözlemlemiştir. Kirlenmeden meydana gelen enerji azalmasını, bununla beraber enerji miktarını ve alınan enerji miktarını artırabilmek için temizlik maliyetini analiz etmiştir. Murcia, Münih ve Helsinki gibi soğuk iklim koşullarına sahip birbirinden farklı üç şehri kıyaslamıştır. Bu kıyaslama sonucunda, temizlik için harcanan gidere kıyasla azalan enerjinin sağlayacağı faydanın yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür.

Mohamed ve Hasan [24], fotovoltaik sistemler üzerindeki tozlanmanın verim üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında sahra çölüne yerleştirilen PV

paneller şubat ve mayıs aylarında haftalık olarak su ile temizlenmiştir. Temizleme yapılmadan önce ve temizleme yapıldıktan sonra panellerin gerilim değeri ve akım değeri kaydedilmiştir. Değerler dijital multimetre ile kaydedilmiştir. Libya çölündeki meteorolojik değerlerle tozlanma değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada aylara göre parçacık boyut farklılıkları araştırılmıştır. Araştırma sonucunda düzenli olarak temizlenen modüllerde %2'lik bir verim kazanımı gözlenmiştir. Aynı zamanda temizlenmeyen modüllerde belirli verim kayıplarının olduğu görülmüştür. Araştırmada PV panel yüzeyinin günün erken saatlerinde temizlenmesi tavsiye edilmiştir.

Kumar [25] yaptığı çalışmada, PV panel üzerinde çevresel etmenlerin PV panelde kalıcı kayıplar yaratabileceğini tespit etmiştir. Bu çalışmada $12,5 \text{ g/m}^2$, 25 g/m^2 ve $37,5 \text{ g/m}^2$ toz yoğunluklarının PV paneldeki verim kaybına etkisini incelemiştir. Verim kayıp oranı sırası ile %10, %16 ve %20 olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada toz miktarı $12,5 \text{ gram}$ ve katları şeklinde yoğunluğa sahip olmasına rağmen verim kaybı toz miktarında olduğu gibi kat ve kat artmamıştır. Bu durum bize toz miktarı ile verim kaybının doğrusal orantıda olmadığını göstermektedir.

Ndiaye ve arkadaşlarının [26], yaptıkları çalışmada toz faktörünün PV panel yüzeyi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tek kristal PV panel ve çok kristal PV panel üzerinde biriken toz etkisinden dolayı performans üzerinde meydana gelen etkiler karşılaştırılmıştır. Toz, PV panellerin performansını etkileyen bir unsurdur. Bu çalışmada tek kristal PV panel ve çok kristal PV panel 1 yıl boyunca temizlenmeden, standart test koşullarına (AM 1.5, 25°C , 1000 W/m^2) göre akım gerilim (I-V) ve güç gerilim (P-V) eğrileri oluşturulmuştur. Maksimum akım (I_{max}) kaybı polikristal (pc-Si) modül ve tek kristalli (mc-Si) modül için %23 ile %80 arasında değişebilir. Maksimum güç çıkışı (Pmax) kaybı polikristal (pc-Si) modül ve tek kristalli (mc-Si) modül için %18 ile %78 arasındadır. Yapılan çalışmada, panel yüzeyleri toz tabakası ile kaplıyken mono kristal panelden alınan maksimum çıkış gücünün çok kristal panelden alınan maksimum çıkış gücünden az olduğu sonucuna varılmıştır.

Appels ve ark. [27], PV sistemlerde panel kirliliğinin verim üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada Apples, panel kirliliği üzerine yapılan araştırmaların genel olarak Ortadoğu'da yapıldığını vurgulayarak, kendi sistemlerini Avrupa Kıtasındaki Belçika'da kurmuşlardır. Bu çalışma sonucunda PV paneller üzerindeki kirlenmenin Ortadoğu'daki kirlenmeye oranla daha az olduğu gözlemlenmiştir. Yaşanan yağış olaylarının yalnızca büyük partiküller ($60 \mu\text{m}$) üzerinde temizleme özelliğinin olduğunu

belirtmişlerdir bununla birlikte küçük partiküller (2-10 μm) üzerinde temizlenme etkisinin çok az veya hiç gözlemlenmediği görülmüştür.

Gostein ve arkadaşları [28] yaptıkları çalışmada kirlenme kayıplarının ölçülmesinin panel performansı için büyük önem taşıdığı sonucuna varmışlardır. Çevresel faktörlerin sebep olduğu, paneller üzerindeki kirlenmeden kaynaklanan verim kayıplarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada PV panellerde meydana gelen kirlenme kayıplarının ölçülmesi ve buna bağlı güç kayıplarının hesaplanması incelenmiştir.

Pillai ve ark. [29] yaptıkları çalışmada, PV sistemler üzerinde iklime göre toz faktörünün etkisini incelemişlerdir. Bu incelemede bölgeler sınıflara ayrılmıştır. Ayrılan bölgelere göre PV sistem performansını etkileyen kirlilik ve toz etkisi gibi faktörlerin önüne geçilebilmesi için bazı öneriler sunulmuştur. Ayrıca PV sistemlerin ürettiği enerji değeri ile tozun boyutu, bileşimi, güneşten gelen ışığın iletimi, toz yoğunluğu ve toz şekli arasındaki ilişki incelenmiştir.

Ghazi ve ark. [30] yaptıkları çalışmada 3 yöntem ile hava koşullarının PV panel performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu yöntemlerden ilki olan kapalı alanda oluşturulan yapay güneş ile camın geçirgenliğinde meydana gelen azalma ölçülmüştür. Kapalı ortamda yapılan çalışmada toz partiküllerinin panel yüzeyine dağıtılmasını sağlamak için kapalı bir kübik kutu içerisine düşük hızda bir fan yerleştirilmiştir. Bir diğer yöntem olan açık hava koşullarında sistem çıktıları yardımıyla 6-8 cm boyutlarında 3 mm kalınlığında 28 adet özdeş cam kullanılmıştır. Bu camlar 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° açılarda güney yönünde yerleştirilmiştir. İki aylık bir sürede toz birikimi dışında bağıl nem, rüzgâr hızı ve yönü, sıcaklık gibi hava parametreleri de incelenmiştir. Bir piranometre (SP110 Apogee) aracılığıyla bir ışık kaynağı altına kirli cam ile temiz cam üniteleri yerleştirilerek cam ünitelerinin geçirgenlikleri karşılaştırılmıştır. PV paneller üzerindeki toz boyutları ve toz miktarı incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda toz miktarının 0,001 gramdan 0,02 grama çıktığı görülmüştür. Bu artışa bağlı olarak geçirgenliği %1'den %10'a kadar azaltmıştır. Yapılan araştırmada açık hava koşullarında dört haftalık periyotlar sonunda 48 m^2 'lik olan örneklerde toz artışı 0,0003 gramdan 0,00075 grama çıktığı gözlemlenmiştir. Bu artış sonucunda enerji kaybının %5 oranında olduğu tespit edilmiştir. Yatay olarak yerleştirilen panellerde geçirgenlik ve açı değişiminde toz birikiminin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Dört hafta boyunca toz birikiminin geçirgenlik üzerindeki etkisinin %1,5, %2, %2,5, %3,5, %4,5, ve %5 oranında azaldığı görülmüştür.

Anto ve Jose [31], yaptıkları araştırmada 100 kWp PV enerji santralinin performansını, iklim ve çevre koşullarının etkisiyle birlikte incelemiştir. Işınımın azaldığı zaman aralıklarında, yani akşam saatlerinde verimliliğin azaldığını gözlemlemişlerdir. Sabah saatlerinde panel sıcaklığı yaklaşık 41 °C, öğlen saatlerinde 48-60 °C aralığında ve akşam saatlerinde panel sıcaklığı 46-54 °C aralığında tespit edilmiştir. Yaptıkları çalışmada elde ettikleri verilerden yararlanarak PV panelin gerilimi analiz edilmiştir ve güneş enerjisindeki artışla PV panelin çıkış gücünün arttığı görülmüştür. Fotovoltaik panel veriminin güneşlenme, toz ve modül çalışma sıcaklığı gibi etmenlere bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Said ve Walwil [9], çevresel etkilere maruz kalan 8 farklı eğim açısına ayarlanabilen 2 adet monokristal PV panel için akım-gerilim (I-V) eğrileri çizmişlerdir. Kullanılan 2 adet PV modülün de özellikleri aynıdır. İlk kullandıkları modüller düzenli bir şekilde ince fırçalar kullanılarak temizlenmiştir. Alt sırada kalan modüller ise test süresi boyunca temizlenmemiştir ve panel yüzeyinde toz birikintisi oluşmuştur. Herhangi bir temizleme işlemi olmadan beş hafta boyunca çevresel etmenlere maruz kaldıktan sonra %6 ortalama güç azalması görülmüştür. Bunun yanında, kısa devre akımındaki ortalama azalma yaklaşık olarak %13'tür. Yaptıkları çalışma sonuçlarına göre, eğim açısı arttığında toz yoğunluğunun azaldığını gözlemlemişlerdir. Güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, rüzgâr, yağmur ve toz fırtınaları gibi hava koşullarının paneli etkilediğini de gözlemlemişlerdir.

Ghazi ve ark. [32] ile Mazumder ve ark. [33] yaptıkları kapsamlı çalışmalarda, dünyanın farklı ülkelerindeki toz birikim oranlarını ve bunların solar enerji dönüşümü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tozun, potansiyeli çok yüksek olan güneş enerjisi cihazlarının yüzeyine yerleşen ve sistem verimini önemli ölçüde düşüren dünyada yaygın bir dağılıma sahip olduğunu belirten bu çalışmada, örneğin dünyanın en temiz bölgelerinden biri olan İngiltere'de, bir ay sonra temizlenmedikleri takdirde toz etkisinin güneş yoğunluğunu %5-6 oranında azalttığı bildirmekle beraber, Sudan'da, temizlik yapılmadan bir ayda düşen toz miktarının İngiltere'dekinden 9 kat daha büyük olduğu belirtilmektedir. Çalışmada 1 m² alanda 4 gram toz tabakası birikmesinin güneş enerjisi dönüşümünü %40 oranında azalttığı ve Arizona'da her ay bu miktarın yaklaşık 4 katı kadar toz biriktiği ifade edilmektedir. PV panellerin yüzeyinde biriken parçacıklar ve toz etkisi, iklime ve çevreye göre farklılıklar gösteren etmenlere bağlıdır. Çok kuru ve çöl benzeri bir bölgede, modülün kirlenme nedeni, güneş modülünün elektrostatik olarak çektiği rüzgârla taşınan inorganik maddeler (toz ve kir parçacıkları) olabilir. Bundan

dolayı, bu çalışmada araştırmacılar toz biriktirme oranlarının Orta Doğu, Avustralya ve Hindistan'da daha yüksek olduğunu gözlemlediklerini ifade etmektedirler.

Rao ve arkadaşlarının [34] yaptıkları çalışmada, toz faktörünün Hindistan'da iç ve dış mekânda bulunan PV paneller üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda toz birikiminin açık devre gerilimi üzerinde etkisinin fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Dış mekân deneylerinde kısa devre akımı %4-5 iç mekânlarda ise %30-40 etkilendiği tespit edilmiştir.

Kazem ve arkadaşlarının [35] yaptıkları çalışmada, Bağdat şehrindeki University of Technology kampüsünün yanında bulunan Mohammed Al Qasim karayolundan kaynaklanan hava kirliliğinin PV paneller üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma aralığı Aralık 2014'ten Mart 2015'e kadar belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda paneller üzerinde egzoz gazlarından kaynaklanan yüksek miktarda partikül madde tespit edilmiştir. Bunun sonucunda kirlenmiş panellerin temiz panellere oranla %12 daha az güç ürettiği tespit edilmiştir.

Boyle ve arkadaşlarının [36] yaptıkları çalışmada Colorado Bölgesindeki doğal kirliliğin PV paneller üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda PV paneller üzerinde günlük toz birikiminin 1-50 mg arasında olduğu gözlemlenmiştir. PV paneller üzerinde metrekare başına biriken 1 gram toz miktarının ışık geçirgenliğini %4.1 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak ışın geçirgenliği ile toz birikimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Guo ve arkadaşları [37], çöl bölgesi olan Katar'ın başkenti Doha'da toz kaynaklı yüzey kirlenmelerinin PV performansına etkisi üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Çalışmada her biri güney yönüne 22° eğim açısı (β) ile doğrultulmuş 220 Wp gücünde olan 8 adet poli-kristal panelden oluşan 3 dizi kullanılmıştır. Kullanılan bu 3 PV dizisi farklı periyotlarla yıkanmıştır. “Yüksek yıkama” olarak sınıflandırılan dizi haftada bir, “orta yıkama” olarak sınıflandırılan dizi iki ayda bir ve “düşük yıkama” olarak sınıflandırılan dizi altı ayda bir yıkanmak suretiyle bu dizilerden elde edilen enerji değerleri 6 ay gibi uzun bir süre boyunca ölçülmüştür. Fotovoltaik panelin performansını; bağıl nemin, toz konsantrasyonunun, rüzgâr hızının ve yüzey kirlenmesinin büyük oranda etkilediğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda panel yüzeyinde biriken toz ve kirlenmelerden dolayı panelin güç çıkışında önemli bir kayıp olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuçların farklı frekanslarda temizlik indeksi olarak sunulduğu bu çalışmada, üretilen enerji değerlerinden yola çıkılarak elde edilen grafiklere göre iki ayda bir yıkanan PV dizisindeki enerji üretim kaybının %30, altı ayda bir temizlenen PV

dizisindeki enerji kaybının ise %60'ın üzerinde olduğu görülmektedir. Deney sürecinde iki kez yağan yağmurun panelleri temizlemesi, altı aylık periyotlarla temizlenen diziye ait enerji kaybının tam olarak belirlenememesine neden olmuştur.

Darwish ve arkadaşları [38], PV panel verimi üzerine yaptıkları çalışmada farklı toz faktörlerine maruz kalan paneller incelenmiştir. Çalışmada; çimento, kireçtaşı, kırmızı toprak, çamur, kum, kum kili, toprak kül, karbon, kalsiyum, silika, karbonat gibi 15 çeşit toz kullanılmıştır. PV panel üzerinde; toprak, silika, kireçtaşı, kül, kalsiyum ve kum olan toz çeşitlerinin verime etkisinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca araştırma sonucunda yapılacak yeni deneyler için farklı toz çeşitleri de sunulmuştur.

Klugmann-Radziemska [39], fotovoltaik sistemler üzerinde toz faktörünün verime olan etkilerini araştırmıştır. Yaptığı çalışmada toz kalınlığının mikrometre başına verimliliği %25,5 oranında düşürdüğü sonucuna varmıştır. Bununla birlikte coğrafi bölgelerin ve çevresel faktörlerin toz faktörünün fiziksel durumunu değiştirebileceğine de değinmiştir.

Zaihidee ve arkadaşları [40] yaptıkları çalışmada toz faktörünün PV paneller üzerindeki etkisi incelenmiştir. PV paneller üzerinde biriken toz, yüzey geçirgenliğini ve gelen güneş ışınımını azaltıp panel sıcaklığını arttırarak panel üzerinde oluşacak verimin bozulmasına sebep olmuştur. Metrekare başına biriken 20 gram tozun açık devre gerilimini %2-6, kısa devre akımını %15-21, verimliliği ise %15-35 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Micheli ve arkadaşları [41], fotovoltaik sistemler üzerine yaptıkları çalışmada panellerin mevsimsel tozlanma ve mevsimlerin yağış miktarının çıkış verimine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırma sonucunda tozlu veya kuru mevsimlerden sonra başlayan yağışın diğer mevsimlerdeki yağışa oranla modül üzerindeki kirlenmeyi arttırdığını tespit etmişlerdir. Çalışmaya göre; PV panellerdeki kirliliğin, kuru yaz mevsimine oranla yağmurlu kış mevsiminde daha fazla olduğu görülmüştür.

Kazem ve Chaichan [42], yaptıkları araştırmada fotovoltaik panellerde tozlanmanın çıkış verimine olan olumsuz etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada Kuzey Umman'da altı farklı bölgeden toplanan çeşitli toz türleri kullanılarak PV panel üzerinde üç ay boyunca deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, toz partiküllerinin %64'ünün çaplarında 2 µm ile 63 µm aralığında bir değişme görüldüğü ancak fotovoltaik paneldeki tozlanmanın sistemin bulunduğu konuma göre farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Yapılan araştırmada, sistem üç aydan fazla aynı hava

şartlarında incelendiğinde verimde %35 ila %40 aralığında kayıp değerleri yaşandığı ortaya çıkmıştır.

Urrejola ve arkadaşları [43], PV sistemlerin verimini araştırdıkları çalışmalarını Santiago’da iki yıl süren deneylerle yapmışlardır. Deneylerin sonucunda temizlik giderlerine ve enerji fiyatlarına rağmen panellerde 45 gün boyunca temizleme yapılmasını tavsiye etmişlerdir. Ayrıca şehrin iklim koşullarında meydana gelen tozlanmanın günlük %0,13 ila %0,56 aralığında panel veriminde kayıplara yol açtığı görülmüştür.

Genç [44] gerçekleştirdiği araştırmada, fotovoltaiik panellerde toz ve gölge etkisinin panel performansına etkisini incelemiştir. Doğal ortam koşullarında kirlenen bir panel düzeneği ile yapay bir şekilde kirlenmesi sağlanan panel düzeneği hazırlanmıştır. Hacettepe Üniversitesi Güneş Evi bahçesinde gerçekleştirilen test sisteminde, 5 farklı eğim açısında (6° , 10° , 20° , 25° ve 40°) paneller kullanılmıştır. Toz birikiminin en çok olduğu panelin eğim açısı 6° ’dir. Bu eğim açısının ardından toz birikimin en çok olduğu açılar sırasıyla 10° , 20° , 25° ve 40° ’tır. Eğim açısının artması ile panel yüzeyindeki tozların, panel yüzeyinden kayarak yüzeydeki toz miktarının azalmasına neden olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada PV panel yüzeyinde biriken kirlilik belirli zamanlarda alınarak kirin ağırlığı tartılmıştır. Alınan veriler ışığında PV panel yüzeyinde biriken kirlilik miktarının artması ile panelden alınan verim miktarının düştüğü gözlenmiştir. Manuel temizlik ile panel yüzeyinde biriken tozların temizlenmesi panelden alınan verimi artırmıştır. Yağışın panel üzerinde biriken tozu temizlemesi beklenirken yağışın türüne göre panel yüzeyinde toz birikimini artırıcı bir etkiye neden olabildiği tespit edilmiştir. Yaz aylarında meydana gelen yağmur yüzeyde biriken tozu temizlemek yerine, atmosferde bulunan toz partiküllerinin panel yüzeyinde birikmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan iç ortam saha deneylerinde ise paneller üzerinde yapay tozlanma gerçekleştirilmiştir. Yapay olarak tozlandırma işlemi için, kırmızı kil, sarı silt toprak ile siltli kum örnekleri kullanılmıştır. PV panel üzerine homojen olarak serpiştirilen tozun miktarı değiştikçe kullanılan farklı toz türleri için de elde edilen verimin değiştiği gözlemlenmiştir.

Sancar [45], PV panellerin performansına etki eden faktörlere dair bir takım deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu araştırma sürecinde 2 adet deney düzeneği hazırlamıştır. Bunlardan birincisi laboratuvar koşullarında diğer düzenek ise çevre faktörlerinden etkilenecek şekilde konumlandırılmıştır. Çevre faktörlerinden etkilenen PV panel ile nem, ışıınım değeri, sıcaklık ve rüzgâr değerleri birlikte incelenmiştir. Laboratuvar koşullarında yapılan çalışmada ise PV panelin performansını etkileyen tozun

etkisi incelenmiştir. Laboratuvar koşullarında yapılan deneysel çalışmada kül, toprak ve çimento olacak şekilde birbirinden farklı toz türleri kullanılmıştır. Panelden alınan verim %98 iken, kül tozu (35 gram/m^2) PV panel üzerine serpiştirildikten sonra alınan verim değerlerinin %46'ya düştüğü gözlemlenmiştir. Toprak tozunun ise (35 gram/m^2) PV panel üzerine serpiştirilmesi ile alınan verim %67 iken, çimento tozu (35 gram/m^2) serpiştirilmesi sonucu verim %58 olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada PV panel performansına etki eden toz türlerinden en fazla verim kaybına yol açan türün kül olduğu tespit edilmiştir. Bu sıralamayı sırasıyla çimento ve toprak izlemektedir.

Adıgüzel [11] yaptığı çalışmada, parçacık boyutuna göre PV panel üzerinde oluşturulan toz örtüsünün verim kaybına etkisini incelemiştir. Yapılan bu çalışma için mermer ve kömür tozları kullanılmıştır. Partikül boyutu -500 olan eğriler ile -38 olan eğriler karşılaştırıldığında farklı toz miktarları için -500 de ölçülen I_{sc} ve V_{oc} değerlerinin daha büyük olduğu deneysel olarak ölçülmüştür. Bu belirgin farklılığın temelinde parçacık boyutu arttıkça yüzeyde bulunan tozun daha küçük parçacığa kıyasla daha az yayılması ve tüm paneli kaplamaması gösterilebilir. Partikül boyutu arttıkça daha önce ince bir örtü gibi kaplayan toz, artık daha çok alanın ışıyım alabildiği bir yüzey haline gelmiştir.

Dişli [46] yaptığı çalışmada, fotovoltaik panellerdeki toz yoğunluğunun görüntü işleme yöntemi ile tespit edilmesini incelemiştir. Panel A ve panel B olmak üzere 2 adet panel kullanılmıştır. Fotovoltaik panellerden biri (panel A) doğal kirlenmeye maruz bırakılıp, diğer panel (panel B) ise her ölçüm sırasında temiz tutulmuştur. Kirli ve temiz panellerden alınan veriler ile görüntü işleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada görüntü işleme yöntemi ile tespit edilen toz yoğunluğu ile kirlilik arasındaki oranın, elektriksel verilerle tespit edilen panel verimliliği ile kirlilik arasındaki oran ile paralel olduğu tespit edilmiştir.

Gürbüz [47] yaptığı araştırmada, kir ve tozlanmanın fotovoltaik panel performansına etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışma, Elazığ il merkezinde 25 Haziran ile 25 Aralık tarihleri arasında gerçekleşmiştir. Deneysel çalışmada 8 adet eş polikristal panel kullanılmıştır. Panellerden dördünün yatayla yapmış oldukları açı 0° ve kalan diğer dört adet panelin yatayla yapmış oldukları açı 30° olarak ayarlanmıştır. 0° eğim açılı güneş panellerinden biri hiç temizlenmemiştir. Diğer üç panel ise sırasıyla günlük, haftalık ve aylık olarak temizlenmiştir. Aynı şekilde 30° eğim açılı güneş panellerinden de biri hiç temizlenmemiştir. Diğer üç panel ise sırasıyla günlük, haftalık ve aylık olarak temizlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda 0° ve 30° eğimle yerleştirilmiş fotovoltaik

panellerin günlük temizlenen ve hiç temizlenmeyen panellerin gücündeki fark incelendiğinde 0° eğim açılı panellerde %16,17'lik bir kayıp, 30° eğim açılı panellerde %15,3'lük bir kayıp olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, hiç temizlenmeyen panellerin, günlük, haftalık ve aylık olarak temizlenen panellere göre gerilimlerindeki fark temmuz ayında ağustos ayına oranla çok fazla olmadığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte ağustos ayının ortalarına doğru bu farkın artmaya başladığı ve eylül, ekim aylarında ise bu farkın daha da arttığı sonucuna varılmıştır. Ancak kasım ve aralık aylarına bakıldığında bu farkın daha fazla artmadığı, bu durumun, bu aylarda meydana gelen yağışların etkisiyle panellerin yağmurun etkisiyle temizlenmesinden kaynaklandığı öngörülmüştür.

Sonsuz [48], toz birikimi ile ilgili çalışmasında 2 adet 45 Watt gücünde mono-kristal PV panel ile 2 adet 50 Watt gücünde poli-kristal PV panel kullanmıştır. Mono-kristal ve poli-kristal PV panellerinden birer tanesi düzenli aralıklarla temizlenmiştir. Deneysel çalışmada her ölçme işleminden önce PV paneller temizlenmiştir. Bu çalışmada, PV paneller manuel olarak cam temizleyicisi ile temizlenip mikro fiber bez ile kurutulmuştur. Diğer paneller ise çevresel etkilere maruz bırakılmıştır. Temizlenmiş PV paneller ile kirli bırakılan PV panellerin I_{sc} ve V_{oc} değerleri, verim oranları karşılaştırılmak üzere 210 gün boyunca sabah, öğlen ve akşam olmak üzere günde 3 defa ölçülmüştür. Ölçüm alınmadan önce her seferinde temizlenen mono-kristal panelin ortalama kısa devre akımı 1,207 A, ortalama açık devre gerilimini 21,641 V olarak bulunmuştur. Ölçüm alınmadan önce her seferinde temizlenen poli-kristal panelin ortalama kısa devre akımı 1,599 A, ortalama açık devre gerilimi ise 20,986 V olarak bulunmuştur. Çalışmada, kirli paneller üzerindeki verim kayıpları incelenince poli-kristal PV panel için en büyük kaybın %5,70 mono-kristal PV panel için en büyük kaybın %5,22 olarak gerçekleştiği ifade edilmiştir.

Yukarıda 2000 ile 2020 yılları arasında tozlanma ve kirlenmenin PV panel performansı üzerine olan etkilerinin araştırıldığını bazı öne çıkan çalışmalar kronolojik olarak verilmiştir. Bu araştırmalar bir arada değerlendirildiğinde, tozlanmanın PV panel verimi üzerindeki etkisinin negatif olduğu ortaya çıkmaktadır, ancak bu olumsuzluğun boyutunun her çalışmada farklı olduğu da görülmektedir. Bunun sebebinin; çalışmaların yürütüldüğü bölgelerin enlem, boylam açılarına bağlı olarak tespit edilen panel eğim açıları, güneşlenme miktarları, kullanılan PV panel teknolojileri, yapay tozlandırmada kullanılan tozların içeriği ve boyutları, ilgili bölgenin nem, sıcaklık, rüzgâr gibi meteorolojik değişkenleri olduğu söylenebilir. Bu çıkarsama, tozlanmanın PV panel

verimi üzerindeki etkilerinin sahaya özel olabileceğini ortaya koymaktadır. Belirli bir bölgede kullanılan PV sistemlerin tozlanmadan etkilenme düzeyi hakkında kesin bir şey söyleyebilmek için, o bölge ile eşdeğer veya benzer özellikler taşıyan bölgelerde yapılmış çalışmaların sonuçlarının incelenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, yapay veya doğal tozlandırma yöntemlerinin kullanıldığı deneysel çalışmaların tekrarlanması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında tozlanmanın yoğun sayılabileceği Batman ilinde, farklı toz türleriyle farklı miktarlarda yapılan yapay tozlandırma senaryolarının PV panel verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

1.2. Tezin Yapısı

Bu tez çalışmasında, PV panel üzerinde biriken tozun PV panelden elde edilen enerji miktarına olan etkisi incelenmiştir. Bu tez çalışması 7 bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde yenilenebilir enerji kaynakları, PV paneller ve kirlenmenin PV panel verimine etkisine değinilmiştir. Bölümün son kısmında toz faktörünün PV panel verimine etkisinin araştırıldığı çalışmalar arasından öne çıkanlar kronolojik olarak sıralanmış ve bu çalışmalarda kullanılan yöntem ve elde edilen bulgular özet olarak sunulurken mevcut literatür hakkında önemli bilgiler vermeye çalışılmıştır.

İkinci bölümde; yenilenebilir enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları ele alınmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji, biokütle enerjisi, hidroelektrik enerjisi ve hidrojen enerjisi hakkında kısa açıklamalar yapılmıştır. Devamında ise tezin kapsamını oluşturan güneş enerjisi daha detaylı ele alınmış, dünyadaki, Türkiye'deki ve Batman ilindeki güneş enerji potansiyeli hakkında bilgiler sunulmuştur.

Üçüncü bölümde; PV sistemler konusu işlenmiştir. Bu bölümde Fotovoltaik panellerin yapısı, tarihçesi ve PV panel çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde; PV sistemlerde panel performansını etkileyen unsurlar hakkında genel bilgiler verildikten sonra, PV sistemlerde tozlanma olayı ve etkileri incelenmiştir. Devamında toz türleri hakkında bilgiler verilmiştir. Eğim açısı, rüzgâr hızı, nem, yağış, kaplama, temizleme, mevsimsel etki, cam karakteristiği ve karlanma gibi unsurların PV panel yüzeyinde toz birikimine olan etkileri ele alınmıştır.

Beşinci bölümde; araştırmanın kapsamına ve amacına uygun olarak hazırlanan ve Batman Üniversitesi Merkez Kampüsünde bir binanın çatısına konumlandırılan deney düzeneği hakkında bilgiler verilmiştir. Deney düzeneği, dört adet 90 Wp güce sahip mono-kristal panel, meteoroloji istasyonu ve ölçülen verileri ölçmek üzere programlanan

data loggerden oluşmaktadır. Kullanılan dört adet mono-kristal PV panelden birincisi düzenli olarak temizlenmiştir. İkinci panel şehirsel tozlanmaya maruz bırakılmıştır. Şehirsel tozlanmaya maruz bırakılan panelden 1, 2, 3, 4 ve 5 gün olmak üzere toz birikim miktarları ölçülmüştür. Üçüncü panel killi toprak ile yapay tozlandırılmıştır. Dördüncü panel ise kireçli toprak ile yapay tozlandırılmıştır. Yapay tozlandırılan paneller şehirsel tozlanmaya maruz bırakılan panellerde biriken toz miktarları dikkate alınarak yapay olarak tozlandırılmıştır. Kirlenmeye maruz bırakılan panellerin 1 ay, 3 ay ve 6 aylık tozlanma miktarının ölçülmesi oldukça zaman alacağından 5 güne ait veriler kullanılarak, toz miktarları yapay sinir ağı (YSA) yöntemi ile hesaplanmıştır.

Altıncı bölümde; şehirsel tozlanmaya maruz bırakılan panel ile yapay tozlandırılan killi ve kireçli PV panellerden 1, 2, 3, 4 ve 5. gün sonunda verileri alınarak temiz PV panel verileri kıyaslanmıştır. Yapay sinir ağı yöntemi ile belirlenen 1 aylık, 3 aylık ve 6 aylık tozlanma miktarları PV paneller tozlandırılmış ve alınan veriler temiz PV panel verileri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca killi, kireçli ve şehirsel tozlanmaya maruz bırakılan PV panellerin 6 aylık süre zarfında verim miktarlarında meydana gelen değişimler sunulmuştur.

Yedinci bölümde; hazırlanan tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve ileride yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

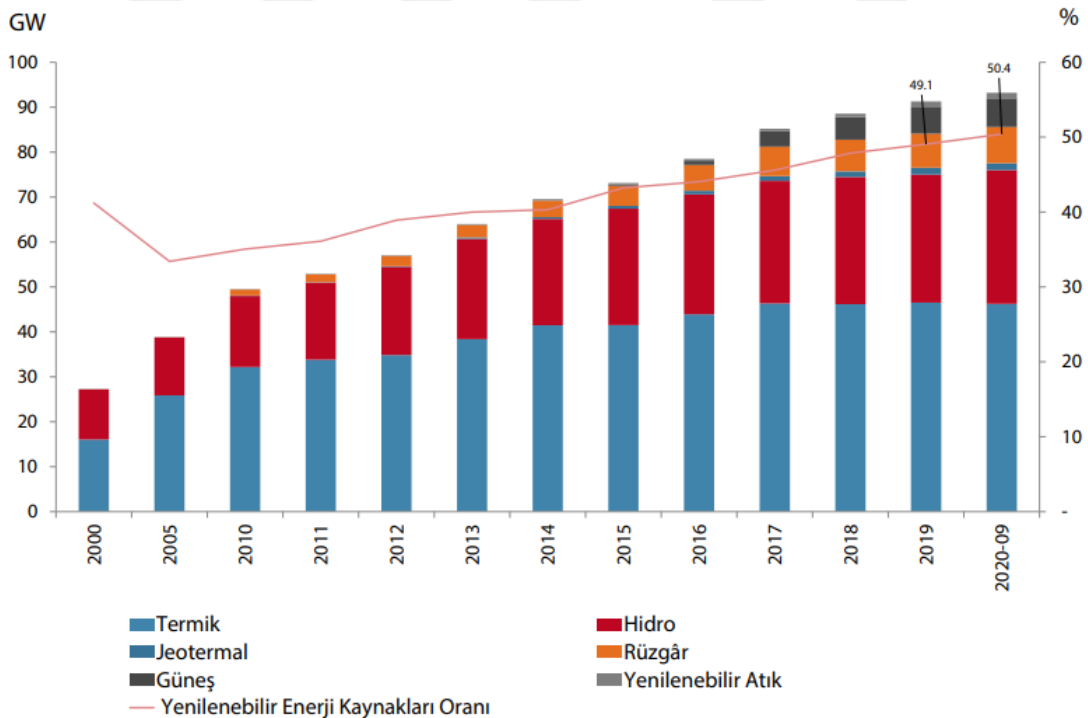
2.1. Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerjinin genel bir tanımı yapılacak olursa; kısa bir sürede kendini sürekli yenileyen ve kaynağının tükenme ihtimali bulunmayan enerji kaynak çeşitleri olduğu söylenebilir. Farklı yöntemler kullanılarak elde edilen farklı yenilenebilir enerji türleri bulunmaktadır. Bu enerji çeşitlerinin kaynakları da birbirlerinden farklıdır. Bazı yenilenebilir enerji kaynaklarından daha yüksek verim elde edilebilirken bazı yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen verim oldukça düşüktür. Temel olarak yenilenebilir enerji kaynakları; jeotermal, hidrolik, güneş, dalga, rüzgâr, biokütle ve hidrojenidir [49, 50].

- **Güneş Enerjisi:** Kaynağı güneş olan, güneşten gelen ısı ve ışıktan yararlanılarak elde edilen enerjidir. Yenilenebilir enerji denildiğinde ilk akla gelen kaynaklardan birisidir. Güneş enerjisi ışıma yolu ile ortaya çıkan bir enerjidir. Güneş çekirdeğinde bulunan hidrojenin helyuma dönüşmesi sonucu ortaya çıkar. Atmosferin engelleyici özelliğinden dolayı atmosfer dışında yaklaşık 1370 W/m^2 olan enerji atmosferin içinde 1100 W/m^2 civarındadır. Bahsedilen miktarlardaki enerjinin çok az bir kısmı tüm dünyanın enerji ihtiyacını karşılayabilecek bir seviyededir. Güneşte 24 saatte ortaya çıkan enerjinin çok küçük bir miktarı dünyaya yansımaktadır [51].
- **Rüzgâr Enerjisi:** Kaynağı rüzgârlardır. Genellikle rüzgâr türbinleri kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülür. Dünyanın güneşin etrafındaki hareketinin elipsoidal olması ve dünyanın kendi etrafında dönmesi, yeryüzünde bulunan bölgelerin yıl ve gün içerisinde farklı miktarlarda ısınmasına neden olmaktadır. Dünya üzerinde farklı ısı değerlerinin ortaya çıkması sıcaklığı ve basıncı etkileyerek, atmosfer içerisinde hava akımlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu doğrultuda ortaya çıkan reaksiyon rüzgâr olarak tanımlanır [52]. Güneş temelli bir enerji olan rüzgâr enerjisi, güneş var olduğu sürece devam edecektir [53].
- **Dalga Enerjisi:** Kaynağı okyanus ve denizlerdir. Rüzgâr yoluyla oluşan dalgalardaki kuvvetin kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile elde edilir. Dalgalarda oluşan enerji su baloncuklarının daire şeklinde hareket etmesi ile kinetik bir enerji ortaya çıkarır. Ayrıca suyun ısı farkından dolayı da bir enerji açığa çıkar. Açığa çıkan bu enerjiye dalga enerjisi denmektedir [54].
- **Jeotermal Enerji:** Yer ısısı anlamı taşımaktadır. Kaynağı yer altı sularıdır. Yeraltında bulunan ve derinliği çok olmayan ısının sıvılar aracılığıyla taşınması

sonucu ortaya çıkan buhar, oluşan sıcak su ve ısınmış kuru kayalardan elde edilen enerjidir. Yeraltında oluşan bu ısı yeryüzüne yüksek sıcaklıktaki yeraltı suları olarak çıkabilir [55].

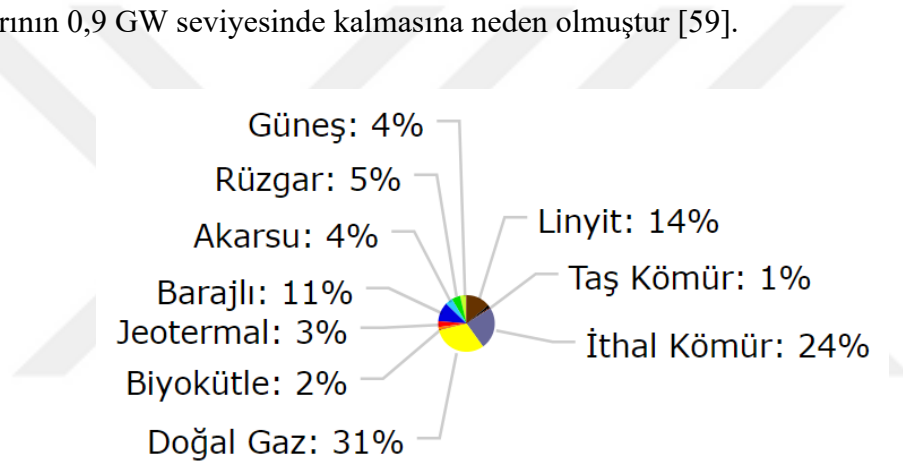
- **Biyokütle Enerjisi:** Kaynağı biyolojik atıklardır. Organik maddelerden çeşitli yollarla elde edilen enerjidir. Canlı varlıkların ürettikleri maddeleri içine alan enerji kaynağıdır. Sürdürülebilir olması, bulunmasının kolay olması, çevreye duyarlı olması ve verimliliğinin yüksek olması tercih edilme nedenlerindendir [56].
- **Hidroelektrik Enerjisi:** Akan suyun elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile elde edilir. Kaynağı nehirlerdir. Durağan suyun hareketli bir su haline gelmesi ile enerji açığa çıkar. Ortaya çıkan bu enerji kinetik bir enerjidir. Sonrasında bu enerjiden elektrik enerjisi elde edilir. Elektrik enerjisi elde edilebilmesi için kurulacak santraller su kaynaklarının üstünde yer almak zorundadır [57]. Büyük su debisine sahip nehirlerde veya yüksek düşüş hızı sağlanabilen santrallerde büyük oranlarda enerji üretimi sağlanabilir [58].
- **Hidrojen Enerjisi:** Hidrojenin saf halde ayrıştırılması sonucu ortaya çıkan bir kimyasal enerjidir. Kaynağı su ve hidroksitlerdir.



Şekil 2.1. Türkiye kurulu güç gelişimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı [59]

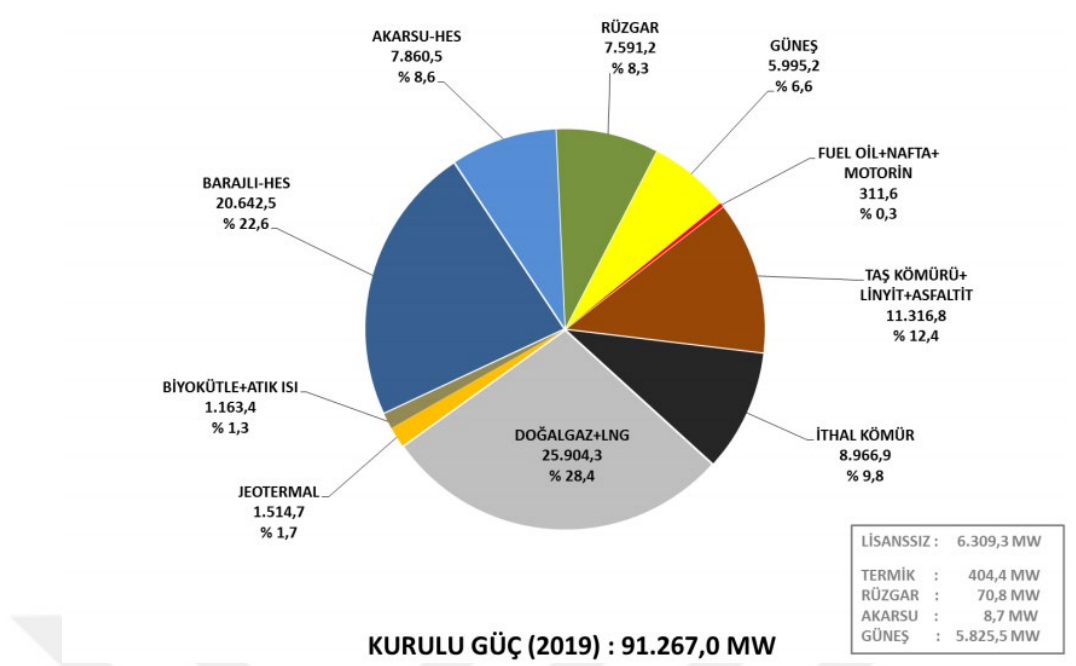
Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç içindeki gelişimi 2005 yılından 2020 yılının 9. ayına kadar incelendiğinde, toplam kurulu güç içinde

yenilenebilir enerji kaynakları sürekli artmaktadır. 2005 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içindeki payı %33 seviyesindedir. 2019 yılında ise yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güç içindeki payı %49,1 seviyelerine ulaşmıştır. Yenilenebilir enerji kurulu gücünün %63,7'sini hidroelektrik santralleri (HES), %13,4'ü güneş enerji santralleri (GES) ve %17'sini rüzgâr elektrik santralleri (RES) oluşturmaktadır. Bununla birlikte 2019 yılında yenilenebilir enerji kurulu gücü toplam 44,8 GW'a ulaşmıştır. 2020 yılının ilk 9 ayında ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güçteki payı %49,1 den %50,4'e yükselmiştir. Bu yükselişin temel nedeni ülkemizde enerji üretimine başlayan yüksek kapasiteli hidroelektrik santralleridir. 2020 yılı içerisinde yaşanan Covid-19 pandemisi sebebi ile yurtdışından ekipman sağlanmasında güçlük yaşanmıştır. Bu durum GES ve RES'lerin kurulu güç içindeki artış miktarının 0,9 GW seviyesinde kalmasına neden olmuştur [59].

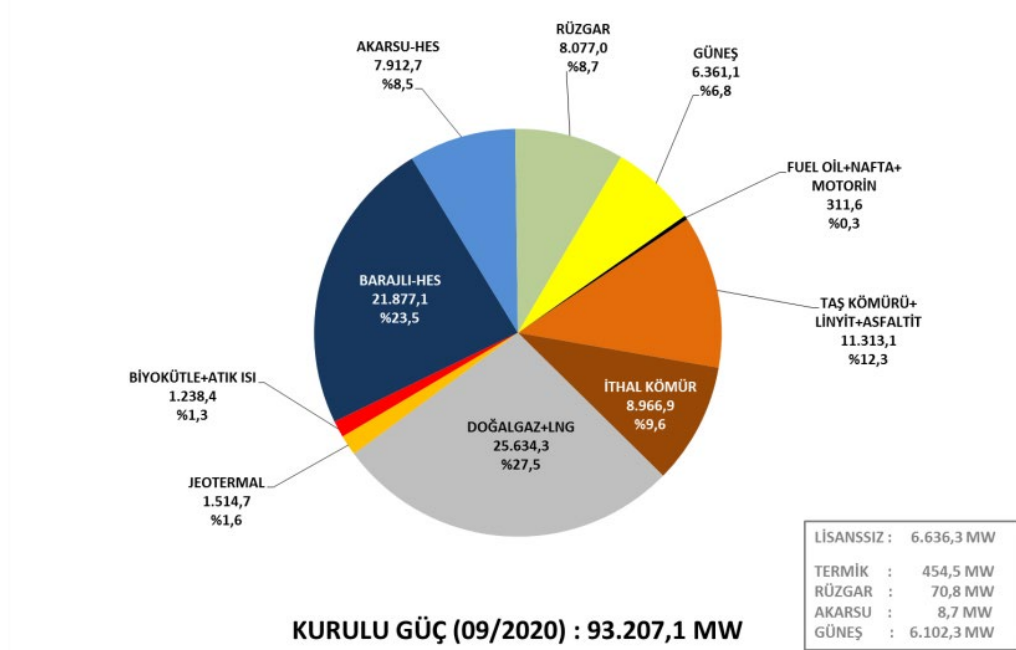


Şekil 2.2. 09.04.2021 itibarıyla Türkiye'de üretimin kaynaklara göre dağılımı [60]

TEİAŞ güncel verilerine baktığımızda ise 03.02.2021 tarihli günlük istatistiklerinde yenilenebilir enerjinin toplam enerji kolları arasındaki payının %29 olduğu görülmektedir. Bu durum ülkemizin yenilenebilir enerji bakımından henüz yolun çok başında olduğunu göstermektedir. Güneş enerjisinin 03.02.2021 tarihinde toplam enerji üretimindeki payı ise %4 tür.



Şekil 2.3. Türkiye 2019 enerji kaynakları kurulu güç tablosu [61]

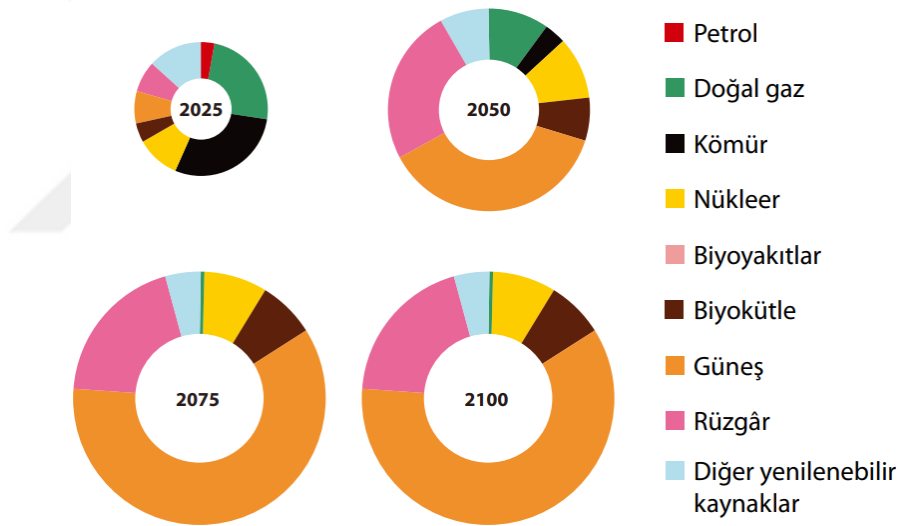


Şekil 2.4. Türkiye 2020 enerji kaynakları kurulu güç tablosu [61]

Türkiye’de 2019 yılı ve Eylül 2020 yılı yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimini kıyaslayacak olursak; 2019 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinden 7.591,2 MW, güneş enerjisinden 5.995,2 MW, hidroelektrik santrallerinden 28.503 MW ve biokütle-atık ısıdan 1.163,4 MW’lık bir kurulu güce sahiptir. Türkiye bu yenilenebilir enerji kaynaklarında bulunan kurulu gücünü artırarak 2020 Eylül ayında rüzgâr enerjisinden 8.077 MW, güneş enerjisinden 6.361 MW, hidroelektrik

santrallerinden 29.912,7 MW ve biokütle-atık ısıdan 1.238,4 MW seviyelerine ulaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından jeotermal enerjide ise bir artış yaşanmamış 1.514,7 MW seviyesinde kalmıştır. 2019 yılı sonundan 2020 Eylül ayına kadar Türkiye'nin toplam kurulu gücü içerisinde linyit kömürü ve doğalgaz yakıtlı enerji santrallerinde toplam 273,7 MW'lık bir düşüş yaşanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan kurulu güçte toplam 2.213,5 MW'lık bir artış gerçekleşmiştir.

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları, 2020 yılının ilk 3 ayında %1,5 büyüme oranı ile üretim miktarında artış yaşanan tek enerji kaynağıdır. Covid-19 pandemisine karşı alınan tedbirler sonucunda tüketilen elektrik miktarında ve dolayısıyla üretilen elektrik miktarında azalma meydana gelmiştir. Nisan, mayıs aylarında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı %60'ı aşmıştır. Nisan ve mayıs ayları karşılaştırıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı %66,1'den %62,2'ye yükselmiştir [62].



Şekil 2.5. Yakın ve uzak gelecekte elektrik talebi ve farklı kaynakların payı [63]

Yenilenebilir enerjinin toplam elektrik üretimi içindeki payının 2050 yılına kadar %62 olacağı tahmin edilmektedir [64]. Şekil 2.5'e bakıldığında 2025, 2050, 2075 ve 2100 yıllarında farklı kaynakların elektrik talebi içindeki payı yer almaktadır. Tahminlere göre fosil yakıtlar yerini yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakacaktır. Güneş enerjisinin gelecek yüzyılda payının oldukça artacağı tahmin edilmektedir.

2.2. Güneş Enerjisi

Güneşin çapı 1,4 milyon kilometredir. Dünyamız ile kıyaslandığında dünyadan yaklaşık 110 kat daha büyüktür. Dünyadan uzaklığı 149,597 milyon kilometredir.

Yüksek basınç ve sıcaklık değerine sahiptir. Dış yüzey alanının yaklaşık sıcaklığı Kelvin termometresine göre 6.000 °K olduğu tahmin edilmektedir [65, 66]. Çapı, dünyanın çapı ile aynı olan bir alan yüzeyine gelen güneş ışınımının gücünün, 178 trilyon kW düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir. Güneşten dünyaya gelen enerjinin, bir yılda tüketilen enerjiden 20 bin kat fazla olduğu düşünülmektedir [65, 66].

Güneş enerjisinin temel amaçlarından ilki güneş enerjisini kullanarak elektrik elde edilmesidir. İkinci amaç olarak da güneş enerjisinden yararlanılarak ısı elde edilmesidir. Ulaşılmak istenen bu amaçlar için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılan bu farklı yöntemler ve teknolojiler zamanla gelişmekte, elde edilen verim artmaktadır [65]. Güneş enerji teknolojilerinde kullanılan yöntem, kullanılan materyal ve gelişmişlik yönünden farklılıklar gösterir. Güneş enerji teknolojilerinden biri olan ve temel amacı elektrik elde edilmesi olan güneş pilleri yani fotovoltaik piller yarı-iletken malzemelerin kullanılması ile elde edilir. Temel kullanım amacı güneşten gelen ışığı elektrik enerjisine dönüştürmektir [67].



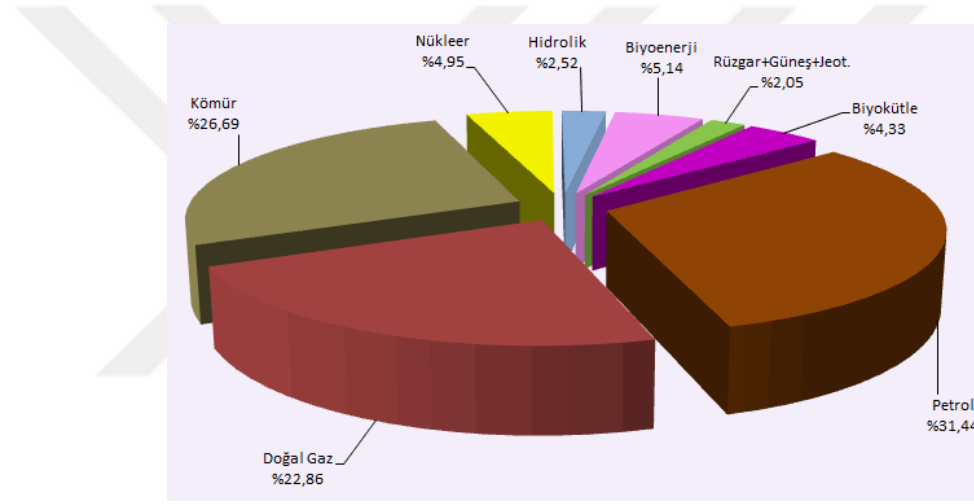
Şekil 2.6. Güneş enerji tarlası [68]

Güneş enerjisi çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahip bir enerji çeşididir. Ancak güneş enerjisinin avantajları dezavantajlarına kıyasla oldukça fazladır. Güneş enerjisi Şekil 2.6’da görüldüğü üzere hibrit bir teknoloji olarak da kullanılabilir. Güneş enerjisinin çeşitli avantajları vardır. Küresel ısınmanın etkilerinin azaltılması ve yaşanabilir bir gezegen için temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Kurulum ve ekipman maliyeti dışında bir ücreti yoktur. Küçük enerji ihtiyacına sahip birçok teknoloji ürünü için enerji

kaynağı olarak kullanılabilir. Yenilenebilir bir enerji olduğundan güneş var oldukça bitmeyecek bir enerjidir. Bununla beraber çeşitli dezavantajları da vardır. Bunlardan bazıları arasında; enerji elde edilmesi için kullanılan ekipmanın maliyetinin yüksekliği, güneşlenme değerinin düşük olduğu hava koşullarında veriminin düşüklüğü, sadece -40 +40 enlemleri içinde kalan ve güneş bandı diye adlandırılan bölgelerdeki uygulamaların ekonomik olması ve uygulama için büyük arazilere ihtiyaç duyulması sayılabilir.

2.2.1. Dünyada güneş enerjisi

Gökyüzünün açık olduğu ve güneşli bir günde 15 dakika boyunca meydana gelen ışıma dünyanın bir yıl boyunca ihtiyaç duyduğu enerji miktarını karşılamaya yetecek kadar bir enerji ortaya çıkarır [69].



Şekil 2.7. 2018 Yılı dünya birincil enerji arzında kaynakların payı [70]

Dünyanın 2018 senesindeki toplam enerji arz miktarı 14.314 milyon ton eşdeğer petrol (TEP) olarak tespit edilmiştir. Bu enerji arzı kaynak bazlı incelendiğinde (Şekil 2.7) petrol ilk sırada yer alarak 4.501 milyon TEP ve toplam arzın %31'ini oluşturmaktadır. Kömür, 3.821 milyon TEP ve toplam enerji arzı içinde %27'lik pay ile ikinci en yüksek enerji arzına sahip kaynaktır [70]. Rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji 2018 yılında dünya birincil enerji arzının yalnız %2,05'lik bir kısmını kapsamaktadır.

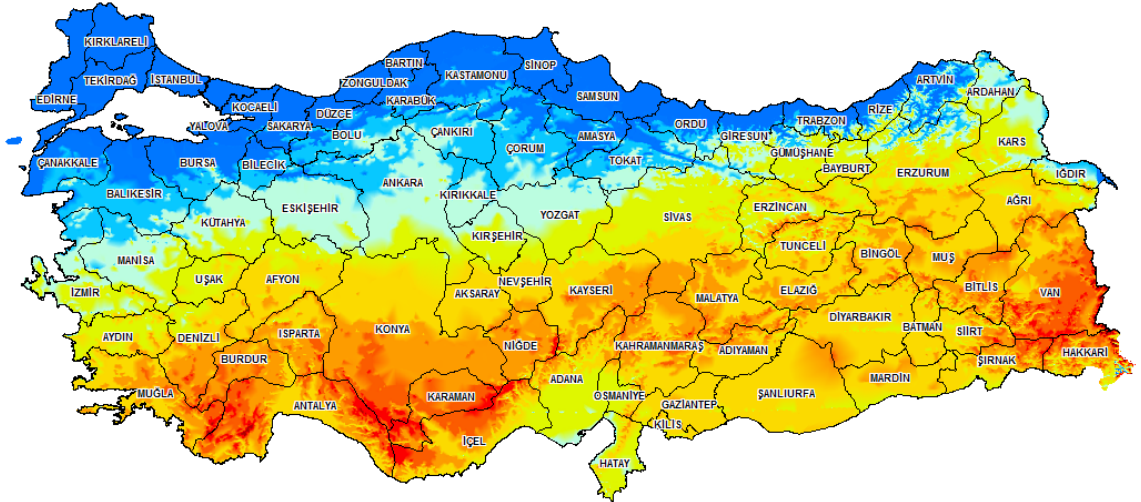
Dünyada birincil enerji arzı 2000 yılından 2018 yılına kadar %42,6 civarında artış göstermiştir. Bu artışla birlikte, petrolün enerji arzı içerisindeki payı 2000 yılında %36,5 iken 2018 yılında %31,44'e gerilemiştir. Aynı şekilde nükleer enerjinin payı 2000 yılında %6,7 iken 2018 %5'e gerilemiştir. Hidrolik enerjisi ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya birincil enerji arzındaki payı 2000 yılında %6,6 olarak belirtilmiş ve 2018 yılında %9,7'ye ulaşmıştır. Bununla birlikte kömür ve nükleer enerjinin birincil

enerji arzındaki payları da 2000-2018 yılları kıyaslandığında arttığı görülmektedir [70]. Yukarıda Şekil 2,7’de görüldüğü üzere birincil enerji kaynaklarının büyük kısmını yenilenemez enerji kaynakları oluşturmaktadır. Dünyada kullanılan yenilenemez enerji kaynaklarından petrol, kömür ve doğalgaz büyük bir paya sahiptir. Birincil enerji arzı içinde bu kaynakların payı %80,99 oranındadır.

Dünyada güneş enerjisinden elektrik üretimi sağlama ve kurulu güç kapasitesi bakımından Almanya ilk 5 ülke arasında yer almaktadır. Almanya’nın ışınlam değerleri dikkate alındığında, 1000 ile 1300 kWh/m² aralığında olduğu gözlemlenmektedir. Yukarıda bahsedilen bu ışınlam değerleri Türkiye’nin en düşük ışınlam değerine sahip bölgesinden bile daha düşüktür. Aynı şekilde güneş enerjisinden elektrik üretimi sağlama ve kurulu güç kapasitesi bakımından Japonya ilk üç ülke arasında yer almaktadır. Japonya’nın ışınlam değerleri ülkenin küçük bir alanında 1500 kWh/m²’yi geçmektedir. Japonya’nın diğer bölgelerine bakıldığında ışınlam değeri 1000-1500 kWh/m² aralığında yer almaktadır [62].

2.2.2. Türkiye’de güneş enerjisi

Ülkemizde yapılan veya yapılacak olan güneş enerjisi ile ilgili çeşitli çalışmaları desteklemek ve güneş enerjisinden en iyi şekilde fayda sağlayabilmek için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından Şekil 2.8’deki Türkiye’nin güneş enerji atlası yayınlanmıştır [71].



Şekil 2.8. Güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA)

Şekil 2.8’de koyu kırmızı renkten koyu mavi renge doğru metrekareye düşen güneş enerji miktarının azaldığı görülmektedir [72]. Görüldüğü üzere ülkemiz, sahip

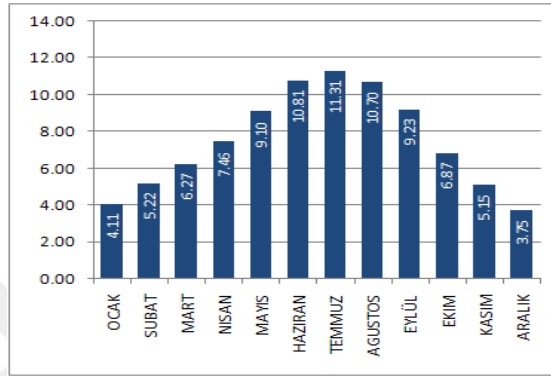
olduğu coğrafi konumu itibari ile güneş enerjisinden yararlanma olanağı bakımından dünyada ilk sıralarda yer alan ülkelerdendir [71]. Şekil 2.8’de ülkemizin farklı yerlerindeki güneş enerjisi parametre verilerine dikkat edildiğinde her konumda güneş enerjisinden doğrudan ya da dolaylı olarak yararlanma imkânının bulunduğu anlaşılmaktadır [71]. GEPA incelendiğinde ülkemizin güney kesimleri kuzey kesimlerine göre daha fazla güneş enerji potansiyeline sahiptir. Bu durum doğu-batı yönünde de aynı şekildedir. Ülkemizin doğusunda batısına göre daha fazla güneş enerji potansiyeli yüksek alan mevcuttur. Ülkemizde en düşük güneş enerji potansiyeline sahip yer Marmara Bölgesinin güney Marmara bölümü dışında kalan bölümleri ve Karadeniz Bölgesinin orta ve Batı Karadeniz bölümlerinin kuzey kesimleridir.

Yukarıda da değinildiği üzere en az ışıınım alan bölge Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesidir. Bu bölümlerin enlem değerleri büyüktür. Nem oranı ise yüksektir. Atmosferde bulunan yüksek su buharı miktarı, ışıınım oluşmasını engellemektedir. Karadeniz Bölgesi ve Marmara Bölgesi ülkemizin en düşük ışıınım değerine sahip bölgeleri olmasına rağmen bu düşük ışıınım değerlerinde bile verim elde edilebilecek şekilde elektrik enerjisi üretimi yapılabilir [72]. Ege Bölgesinin kuzey kesimleri, Karadeniz Bölgesi ile kıyaslandığında daha fazla ışıınım değerine sahiptir. Akdeniz Bölgesinin batısı, Ege Bölgesinin güneyi ve İç Anadolu Bölgesinin orta kesimleri yukarıda bahsedilen alanlara göre daha yüksek ışıınım değerlerine sahiptir. Akdeniz Bölgesinin doğu kesimleri ve Doğu Anadolu Bölgeleri yüksek ışıınım değerlerine sahip bölgelerimizdir. Güney Doğu Anadolu Bölgesinin Hakkâri bölümü ise en yüksek ışıınım değerine sahip olan bölümdür. Görece soğuk seyreden iklim rejimine rağmen kış aylarında en çok ışıınım değeri bu bölgelerde görülmektedir. Bu durumun nedeni ise havada bulunan su buharının, yağış olarak yoğunlaşması ve bunun sonucunda gökyüzünün berrak bir durumda olup güneşten gelen ışıınımı engellememesidir [73]. Güneş enerjisinden verimli şekilde elektrik enerjisi elde etme yönünden Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi ilk sırada yer almaktadır. Karadeniz Bölgesi dışında kalan tüm bölgelerimizde bir metre kareden ortalama 1.100 kWh’lik enerji elde edilebilir. Bu da Karadeniz Bölgesi dışında kalan tüm bölgelerde kâr amaçlı yatırım yapılabileceğini göstermektedir. Karadeniz Bölgesi dâhil ülkemizde yıllık alınan enerji miktarı ortalama 1015 kWh/m² civarındadır [67, 74].

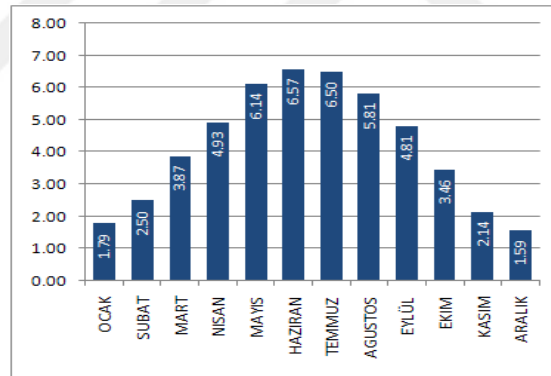
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığından alınan verilere bakıldığında Türkiye’nin güneşlenme süresi 2741,07 saat/yıl ve güneşlenme miktarı 1527,46 kWh/m²’dir. Ortalama günlük güneşlenme miktarı 4,18 kWh/m² ve ortalama günlük toplam

güneşlenme süresi 7,50 saat/gündür. Bu ortalamalar değerlendirildiği zaman ülkemizin en önemli enerji kaynakları arasında güneş yer alacaktır [66]. Ülkemiz bir senede birim metre kare cinsinden yaklaşık olarak 1.100 kWh'lık güneş enerjisi üretebilecek bir potansiyele sahiptir [74, 75].

Aşağıda, Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da Türkiye'nin aylara göre saat olarak güneşlenme süreleri ve yine aylara göre kWh/m²-gün olarak global radyasyon değerleri verilmiştir.



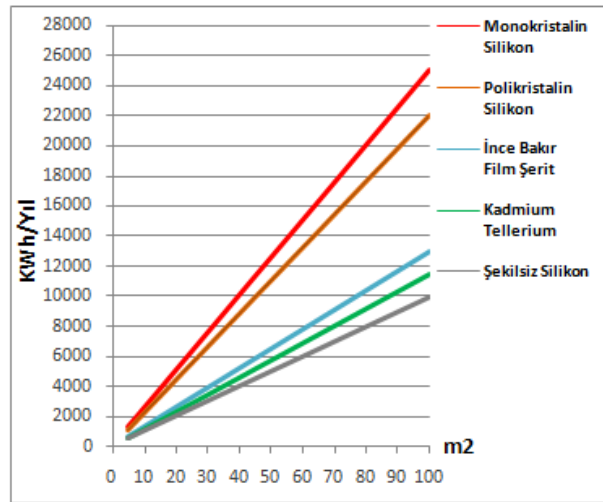
Şekil 2.9. Türkiye güneşlenme süresi (saat) [76]



Şekil 2.10. Türkiye global radyasyon değerleri [76]

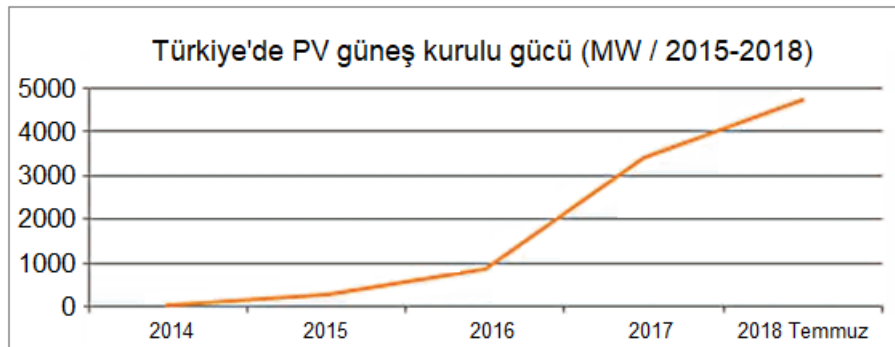
Şekil 2.9'da Türkiye'nin yıl içerisinde güneşlenme sürelerini göstermektedir. Buna göre en düşük güneşlenme süresi 3.75 saat ile aralık ayı iken en yüksek güneşlenme süresi 11,31 saat ile temmuz ayıdır. Şekil 2.10'da ise Türkiye'nin yıl içerisinde global radyasyon değerleri gösterilmektedir. Buna göre en düşük ortalama global radyasyon değeri 1,59 kWh/m²-gün ile aralık ayı iken en yüksek ortalama global radyasyon değeri 6,57 kWh/m²-gün ile haziran ayıdır. Güneşlenme süresi ve global radyasyon değerleri karşılaştırıldığında güneşlenme süresinin en yüksek olduğu ay temmuz ayıdır. Fakat

temmuz ayı global radyasyon değerleri kıyaslandığında haziran ayına göre daha düşük bir değere sahiptir [77].



Şekil 2.11. Türkiye PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (KWh-Yıl) [76]

Şekil 2.11 incelendiğinde Türkiye'de PV panellerin çeşitleri açısından panel yüzey alanına göre elde edilebilecek enerji miktarları gösterilmiştir. Şekil 2.11'e baktığımızda 100 m²'de yaklaşık 25000 KWh enerji üretebilecek mono-kristal silikon paneller ülkemizde m² bazında en çok verim elde edilebilecek PV panel çeşididir. En düşük verimle üretim yapan şekilsiz silikon (amorf silikon) PV paneller ile ise 100 m²'de yaklaşık 10000 KWh enerji elde edilebilir. Buna karşın söz konusu PV panellerin birim güç başına fiyatları arasında farklılıklar vardır. Üretilen enerji miktarında görülen farklılıklar, genel olarak hücre yapısında kullanılan yarıiletken teknolojisi ile alakalı bir durumdur.



Şekil 2.12. Türkiye'de PV güneş kurulu gücü (MW /2015-2018 Temmuz)

Türkiye'nin güneş enerji kaynaklı fotovoltaik kurulu gücü 2016 yılından 2018 yılına kadar yüksek hızda bir artış göstermiş ve kurulu gücü 1000 MW bile değilken 4800

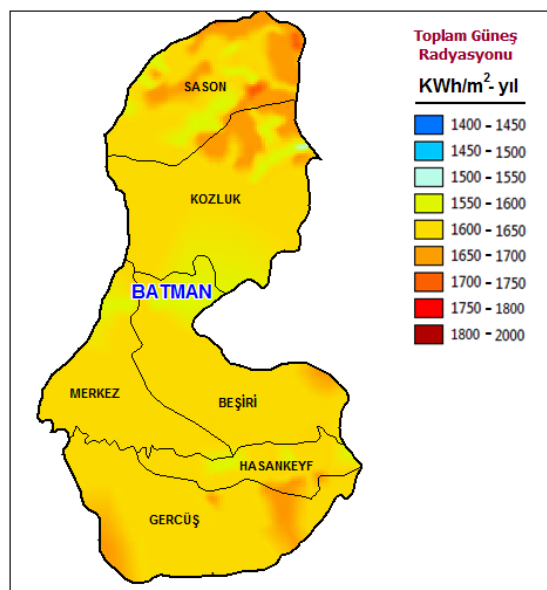
MW seviyelerine yaklaşmıştır. Türkiye 2023 yılı için 5 GW'lık bir hedefe sahiptir. Bu hedefin beklenenden önce gerçekleşme ihtimali yüksektir [78].

Ülkemizde güneş enerjisinden; tarım alanları, içme suyu temizlenmesi, yemek pişirme, ıslıklandırma, ısınma, sıcak su elde edilmesi, kurutma işlemleri, ulaşım, en önemlisi elektrik enerjisi elde edilmesinde ve birçok farklı alanda yararlanılır [79].

2.2.3. Batman'da güneş enerjisi

GEPA verilerine bakıldığında, Türkiye'nin güneş enerjisi bakımından en yüksek ışıınım değerine sahip bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesidir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan Batman ili karasal bir iklime sahiptir. Kuzey kesimleri dağlık arazilerle kaplıdır. Güney kesiminde ise engebeli araziler yoğunluktadır. Batman ilinin coğrafi konumu $41^{\circ}40''$ ve $41^{\circ}10''$ doğu boylamları ile $38^{\circ}40''$ ve $37^{\circ}50''$ kuzey enlemlerinin kesiştiği alanlarda yer alır. Rakım olarak kent merkezi 550 metredir. Şehrin komşu illeri Diyarbakır, Mardin, Muş, Bitlis ve Siirt'tir. Kış ayları ılık ve yağışlı, yaz ayları sıcak ve kuraktır. Kentin ortalama yıllık sıcaklık değeri 16°C ve ortalama yağış miktarı 552 milimetredir [80].

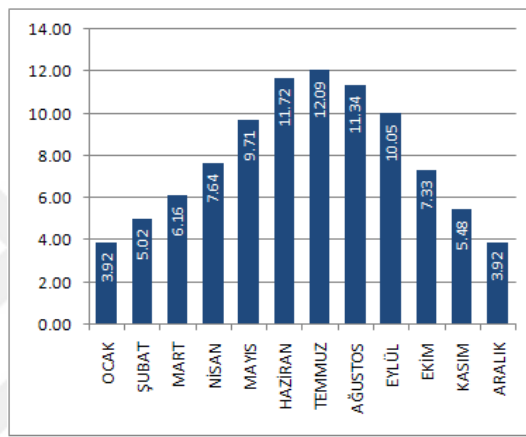
Batman ili için yapılan araştırmalarda ilin enerji kaynakları bakımından oldukça zengin bir konumda yer aldığı görülmektedir. Batman ili coğrafi konumu nedeni ile güneş enerjisinden günümüzde olduğundan çok fazla yararlanabilecek bir potansiyele sahiptir [81]. Aşağıda Şekil 2.13'te Batman ili Güneş Potansiyeli Haritası (KWh-Yıl) gösterilmiştir.



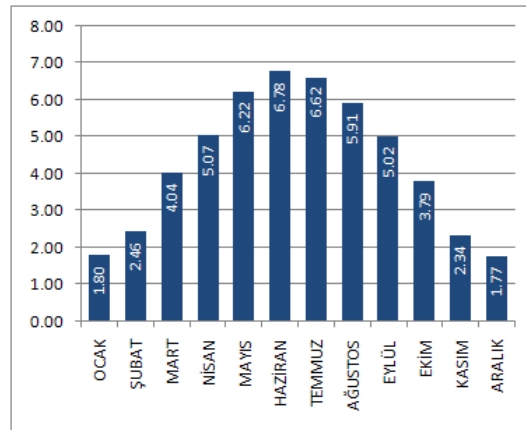
Şekil 2.13. Batman güneş enerjisi potansiyel atlası [82]

Şekil 2.13'te görüldüğü gibi Batman ili yıllık güneş radyasyonu miktarında oldukça yüksek değerlere sahiptir. Batman ilinin en düşük güneş enerji potansiyeline sahip konumunda dâhi 1550-1600 KWh/m²-yıl güneş radyasyonu vardır. Bu durum ilin güneş enerji potansiyelinin ne kadar yüksek olduğunu göstermektedir. Batman ilinde kurulacak güneş enerji santralleri maliyet-verimlilik oranları açısından oldukça avantajlıdır.

Aşağıda, Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te Batman ilinin aylara göre saat olarak ortalama güneşlenme süreleri ve yine aylara göre kWh/m²-gün olarak ortalama global radyasyon değerleri verilmiştir.



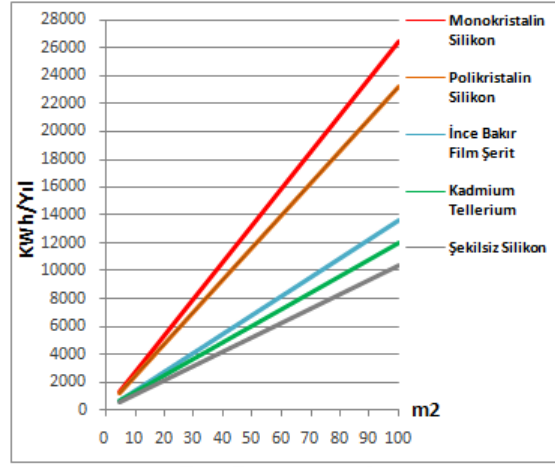
Şekil 2.14. Batman güneşlenme süresi (saat) [82]



Şekil 2.15. Batman global radyasyon değeri [82]

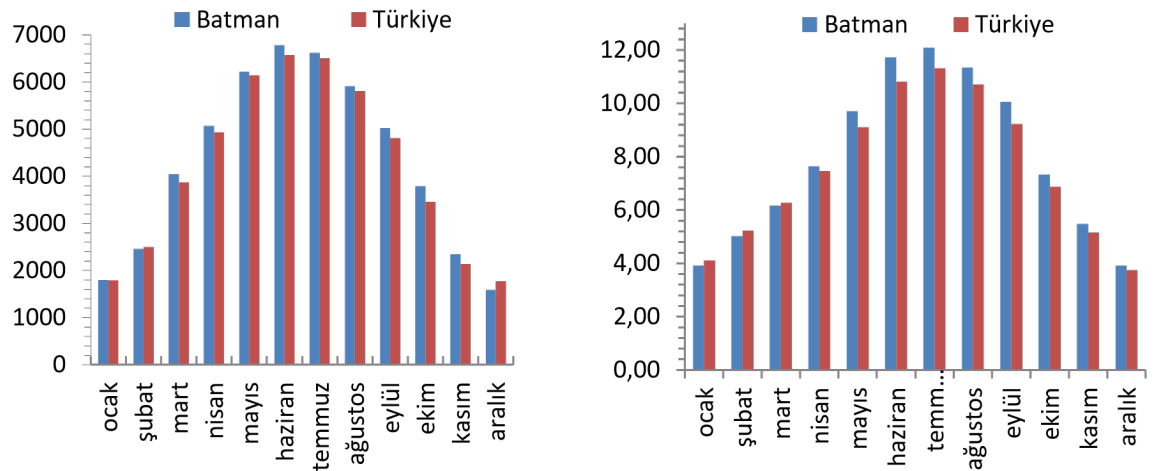
Bu grafiklere göre en düşük güneşlenme süresi ortalama 3,92 saat ile ocak ve aralık ayları iken en yüksek ortalama güneşlenme süresi 12,09 saat ile temmuz ayıdır. Ortalama global radyasyon değerinin en yüksek olduğu ay 6,78 kWh/m²-gün ile haziran, en düşük olduğu ay ise 1,77 kWh/m²-gün ile aralık ayıdır. Bu grafiğe göre Batman ilinde

Haziran ve temmuz aylarında en yüksek global radyasyon değeri ve en uzun güneşlenme süreleri ölçülmüştür.



Şekil 2.16. Batman ili PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (KWh-Yıl) [82]

Şekil 2.16’da batman ilinin PV panel tiplerine göre yıllık elde edilebilecek verim oranları yer almaktadır. Şekil 2.16 ve Şekil 2.15 kıyaslanarak incelendiğinde Türkiye de monokristal silikon panelden 100 m² de elde edilebilecek enerji miktarı bir yılda 25000 KWh iken Batman ilinde bu verim oranının 26000 KWh’tan daha yüksek bir değerde olduğu anlaşılmaktadır. Aynı şekilde bir yılda polikristal silikon panelden 100 m² de elde edilecek enerji değeri 22000 KWh/yıl iken Batman ilinde 24000 KWh’a yaklaşmaktadır.



Şekil 2.17. Batman ili ve Türkiye’nin global ışıınım değeri ve güneşlenme süresi

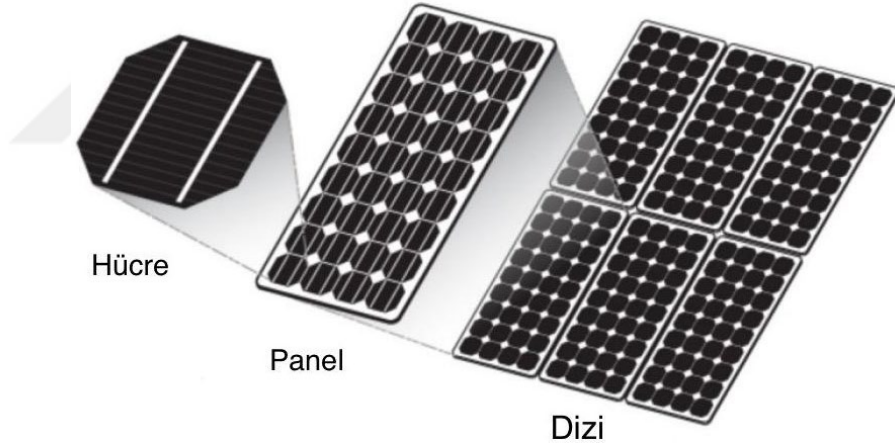
Şekil 2.17 incelendiğinde Batman ilinin global ışıınım değeri aralık ayında Türkiye ortalamasının altında, ocak ve şubat aylarında Türkiye ortalamasına eş bir değerde, diğer aylarda ise Türkiye ortalamasının üzerinde yer almaktadır. Aynı şekilde Türkiye ve Batman ilinin yıllık güneşlenme süresini karşılaştırdığımızda ocak, şubat ve mart ayları

Türkiye ortalamasının altında diğer aylar ise Türkiye ortalamasının üzerindedir. Bu durum Batman ilinin güneş enerji potansiyelinin ne kadar yüksek bir değere sahip olduğunu göstermektedir. Batman ilinde yapılacak güneş enerjisi yatırımlarının verimli olacağı anlaşılmaktadır. Güneşlenme sürelerinin uzun olduğu ve verim oranının yüksek olduğu bu şehirden en faydalı şekilde yararlanmak tasarruflu, temiz ve verimli olacaktır.



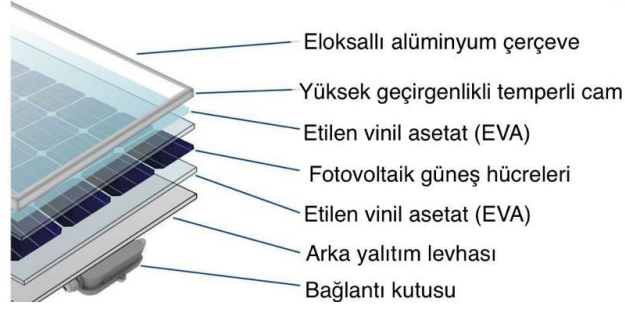
3. FOTOLTAİK (PV) PANELLER

Fotovoltaik panellerin bir diğer adı da güneş pili'dir. Fotovoltaik (Photovoltaic) kelime anlamı olarak güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi anlamına gelmektedir. Yunanca ışık anlamına gelen “photo” ve elektriksel voltaj anlamına gelen “voltaic” kelimelerinin birleştirilmesi ile bu kelime oluşur. Fotovoltaik olayını 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine elektrotlar batırarak meydana gelen gerilimin, elektrolit üzerine temas eden ışıktan kaynaklandığını bulmuştur [83]. Fotovoltaik paneller, üzerine gelen ışınımı elektrik enerjisine doğrudan çevirebilen mekanik cihazlardır [84, 85]. Fotovoltaik paneller, bakım maliyeti düşük, sabit parçalardan meydana gelen, sağlam ve tasarımı basit olan enerji kaynaklarıdır [86]. Fotovoltaik sistemler, güneşten gelen ışınları elektrik akımına çeviren, zamanla önemi artan güncel bir enerji teknolojisidir [87]. FV panellerin verimli çalışma ömrü ortalama 25 senedir. Üretici firmalar ortalama garanti süresi olarak bu süreyi vermektedir [88]. Şekil 3.1’de hücre, panel ve dizi yapıları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Hücre panel ve dizi oluşumu [89]

PV paneller doğrudan aldıkları güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren ve yarı iletken malzemelerin kullanılması ile üretilen cihazlardır ve temel olarak hücrelerden oluşurlar [90]. PV hücrelerin birleşmesi ile modüller, modüllerin birleşmesi ile de büyük güçlerin elde edilebildiği diziler meydana getirilmektedir. Bu sayede amaçlanan gerilim, akım ve güç değerlerinde PV sistemler elde edilir [91]. Kare, daire veya dikdörtgen biçiminde geometrik şekillerde üretilebilmekte olan güneş hücreleri, yüzey alanları 100 cm² civarında iken kalınlıkları üretim esnasında kullanılan teknolojiye bağlı olarak 0,2 ila 0,4 milimetre arasında değişmektedir [92- 94].



Şekil 3.2. Fotovoltaik panelin fiziksel yapısı [95]

Şekil 3.2’de tipik bir PV panelin ara kesiti gösterilmiştir. PV panelin çevresinde eloksallı alüminyum çerçeve bulunmaktadır. En üst katta yüksek geçirgenliğe sahip temperli cam, sırasıyla aşağı doğru etilen vinil asetat (EVA), PV güneş hücreleri, etilen vinil asetat (EVA) arka yalıtım levhası ve bağlantı kutusu bulunmaktadır. Bu tabakalar yüksek geçirgenlik özelliğine sahip yapıştırıcı reçinelerle birleştirilirler. Özellikle bitiş noktalarından panel içerisine doğru nem ve sıvı sızmalarının engellenmesi için bu tabakaların bitiş noktaları genellikle silikon türü sızdırmazlık malzemeleri ile izole edilmektedir.

3.1. Fotovoltaik Güneş Panellerinin Tarihçesi

Güneş enerjisi, yüzyıllardır insanoğlu tarafından farklı yöntemlerle kullanılmıştır. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmeyi amaçlayan çalışmaların 19. yüzyılda başladığı görülmektedir. Fotovoltaik etki Fransız bir fizikçi olan Alexandre Edmond Becquerel’in 1839 senesinde elektrolit içerisine elektrotlar daldırarak aralarında oluşan gerilimin, elektrolit üzerine yansıyan ışığa bağlı olduğunu gözlemlemesiyle ortaya çıktı [96, 97]. Becquerel, metal iki adet iletken elektrottan meydana gelen elektrolitik hücrenin, ışık altında bırakıldığında elektrik üretme miktarının arttığını bulmuş ve raporlamıştır [98, 99].

İlk olarak sıvı içinde elde edilen fotovoltaik etki, katı maddelerde 1876 senesinde G.W. Adams ve R.E. Day tarafından selenyum kristalleri üzerinde tespit edilmiştir. Daha sonra 1914 yılında %1 verimliğe ulaşan piller üretilmiş fakat bunlardan tam anlamıyla bir elektrik üretimi sağlanması mümkün olmamıştır. 1946 senesinde Russell Ohl modern güneş pili patentini almıştır. 1954 yılında Chaplin ve Fuller %6 verimli piller üreterek silikon kristali üzerinde elektrik üretimi sağlanmıştır [100]. Anlaşıldığı üzere fotovoltaik etki uzun süreden beri bilinmektedir. Buna rağmen fotovoltaik hücre ilk olarak 1957

senesinde Bell laboratuvarlarında üretilmiştir. Maliyetinin yüksek olması ve elde edilen enerjinin az olması ticari olarak kullanımına engel olmuştur [101].

3.2. Fotovoltaik Panel Çeşitleri

Yarı iletkenler galyum arsenit, kristal silisyum ve kadmiyum tellür gibi malzemelerden meydana gelir [102]. Panel üretiminde kullanılan temel madde genellikle silikon ve ince film şeklindedir. Silikon panellerin verimliliğinin yüksek olmasına rağmen, üretilmesinde ortaya çıkan maliyetler de fazladır. Bu durum değer-fayda ilişkisini etkileyerek talebi azaltmaktadır [103, 104].

Panel üretiminde hücre tabakasının yanında panelin uzun süre kötü hava ve ortam koşullarına dayanmasını sağlayan ve montaj yapılmasını sağlayan gerekli başka tabakalar da mevcuttur [105]. Son zamanlarda fotovoltaik sistemlerde verimliliğin yükselmesi ve maliyet miktarının düşmesi fotovoltaik sistemlerin kullanım oranlarının artması yönünde beklentilere yol açmıştır [2]. Tablo 3.1’de endüstride sıklıkla kullanılan PV teknolojilerine ilişkin hücre ve modül verimlerinin karşılaştırılmasına ait çeşitli firmaların eriştiği son değerler verilmiştir. Bu tabloda bulunan değerler, daha hassas üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle gün geçtikçe iyileştirilmektedir.

Tablo 3.1. Değişik tip PV hücre ve modül verimlerinin karşılaştırılması [106]

PV Teknoloji	Hücre Verimi (%)	Modül Verimi (%)	Hücre V_{oc} (Volt)	Hücre J_{sc} (mA/cm ²)
Tek kristal silikon	26,7 ± %0,5	24,4 ± %0,5	0,7380	42,65
Çok kristal silikon	24,4 ± %0,3	20,4 ± %0,3	0,7132	41,47
Galyum arsenit	29,1 ± %0,6	25,1 ± %0,8	0,9940	23,20
Amorf silikon	14,0 ± %0,4	12,3 ± %0,3	1,9220	9,940
Kadmiyum tellür	21,0 ± %0,4	19,0 ± %0,9	0,8750	30,25
CIS/CIGS	23,35 ± %0,5	19,2 ± %0,5	0,7340	39,58

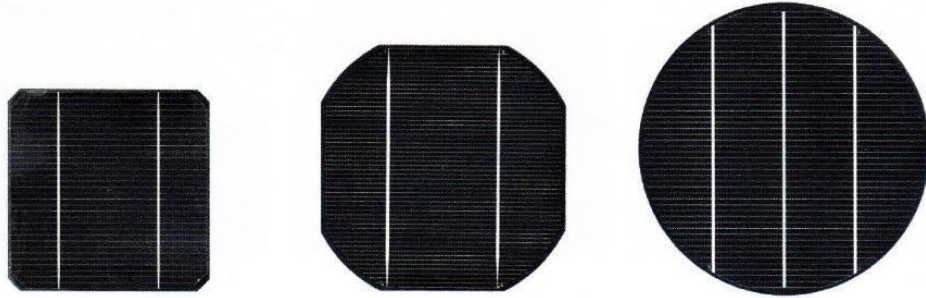
Üretim teknolojisine ve kullanılan malzeme yapısına göre fotovoltaik panellerin birçok türü bulunmaktadır. Öncelikle kristalize silikon fotovoltaik hücreler ve ince film fotovoltaik hücreler olarak ikiye ayrılır. Kristalize silikon fotovoltaik hücreler ise tek kristalli ve çok kristalli silikon fotovoltaik hücreler olarak ikiye ayrılır. İnce film fotovoltaik hücreler ise amorf silikon ince film, galyum arsenit ince film, kadmiyum tellürid ince film ve bakır indiyum diselenid ince film fotovoltaik hücreler olarak dörde ayrılır.

3.2.1. Kristalize silikon fotovoltaik hücreler

Fotovoltaik hücre imalatında kullanılan silisyum, dünyamızda en fazla bulunan ikinci elementtir. Dünyamızda en çok bulunan element ise oksijendir [107, 108]. Dünyada silisyum güneş pili ilk olarak 1954 yılında Chapin tarafından Bell laboratuvarlarında üretilmiştir [109]. Başlangıç aşamasında pil verimliliği %6 olarak tespit edilmiştir. Silisyum elementi kullanılan güneş pillerinin silisyumun saf halinin tek veya çok kristalleri ile oluşturulmuştur [110, 111]. Silisyum elementi ile üretilen güneş pilleri günlük yaşantımızda çeşitli ürünlerde; cadde aydınlatmalarında, uydularda, savunma sanayide ve farklı endüstri alanlarında kullanılmaktadır. Tek kristalle oluşturulan güneş pillerinde tek kristalin kusursuz ve kaliteli bir şekilde elde edilebilmesi için gerekli görülen enerjinin yüksek olması ve üretim maliyeti bu pillerin üretilmesini negatif yönde etkilemiştir. Silikon paneller yüksek verimliliğe sahiptir; ancak yüksek maliyetli olmaları fiyat-verim ilişkisini etkilemektedir [103]. Kristalize silikon güneş pillerinde bulunan kristallerde meydana gelen kusurlardan kaynaklı cihaz performansının düşmesi, amorf veya ince film inorganik pillerin kullanımını arttırmaktadır [110, 111].

3.2.1.1. Tek kristalli silikon fotovoltaik hücreler

Tek kristal silisyum bloklar ilk olarak büyütülür bu işlem yapıldıktan sonra 200 mikron kalınlığı olacak şekilde ince halde kesilir. Üretimi yapılan fotovoltaik hücreler laboratuvar şartlarında incelendiğinde %26 verim elde edilmektedir. Ticari olarak kullanılan modüllerde ise elde edilen verim %19'un üzerindedir [112]. Şekil 3.3'te çeşitli şekillerde üretilen tek kristalli silikon hücreler gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kare, yarı kare ve daire şeklindeki tek kristal silisyum hücreler [113]

3.2.1.2. Çok kristalli silikon fotovoltaik hücreler

Çok kristalli pillerden elde edilen verim laboratuvar ortamında %24 olarak tespit edilmiştir. Ticari olarak kullanılan modüllerde ise %18 civarında verim elde edilmektedir

[114]. Çok kristalli piller kare şeklinde, boyutları genellikle 100x100mm, 125x125mm ve 150x150mm olacak şekilde ve kalınlıkları 0,3 mm olacak şekilde üretimi yapılmaktadır [115]. Şekil 3.4'te bazı çok kristalli hücreler gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Polikristal fotovoltaik hücreler [116]

3.2.2. İnce film fotovoltaik hücreler

Güneş pilleri için kalınlığı daha az silisyum yapraklar üretme düşüncesi Wolf ve Lofersky tarafından gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada daha fazla verim elde edebilmek için ideal olan parametreleri geliştirmişlerdir [117]. İnce film fotovoltaik hücre üretme fikrinin ortaya atılmasının temel nedeni, bu film üretimi için maliyet oranlarının az olmasıdır [118]. Kadmiyum tellürid (CdTe) ince film, bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) ince film ve amorf ince film güneş pilleri ticari amaçla kullanılan ince film güneş pili çeşitleridir. Amorf ince film güneş pilleri tek kristalli silisyum esaslı güneş pillerinden daha az maliyetlidir ancak daha az verim elde edilmektedir [110, 111]. Verim oranları kullanılan teknolojiye göre geniş bir aralıkta değişkenlik göstermektedir [119]. Düşük verim oranlarından dolayı kullanılan alanda polikristal panellere göre daha az verim elde edilmektedir. Bununla birlikte kullanılacak olan kablo miktarı daha fazla olacaktır [120]. Şekil 3.5'te tipik bir ince film PV hücre görülmektedir.



Şekil 3.5. İnce film fotovoltaik hücre [121]

İnce film hücrelerin verimliliklerinin kristal silisyum hücrelere göre düşük olduğu bilinmektedir, ancak gelen ışınımın düşük olduğu ya da sıcaklığın fazla olduğu ortamlardaki performansı kristal silisyum hücrelerine kıyasla yüksektir. Bununla birlikte havanın bulutlu olduğu zamanlarda da enerji üretimini sürdürebilir. İnce film hücreler yapılarından kaynaklı gölgelenme olayından daha düşük oranda etkilenirler. Kristal silisyum güneş pilleriyle karşılaştırıldığında üretilmesi için kullanılan hammadde ve gerekli enerji miktarı daha azdır [122]. İnce film güneş pilleri yapısı itibari ile plastik, cam ya da metal yüzeylere ince bir tabaka halinde kaplanacak şekilde oluşturulabilen güneş pilleridir [123, 124]. İnce film güneş pillerinin diğer güneş pili türlerinden farkı esnek bir yapıya sahip olması, taşınabilirliğinin kolay olması ve kolay kurulabilir olmasıdır [121].

3.2.2.1. Amorf silikon ince film fotovoltaik hücreler

Amorf silisyum fotovoltaik paneller mono-kristal ve poli-kristal panellerin olduğu şekilde kristalli bir yapıya sahip değildir. Kıvrılabilir bir yapıda bulunur. Üretilen panellerin renkleri kahve, koyu kırmızı ve siyah şeklindedir. Modül verimlilik oranları %10 civarındadır. Kristal yapıli panellerle kıyaslandığında verimlilik miktarı daha azdır. Verimlilik miktarının az olmasına rağmen tercih edilme nedeni daha az güç gerektiren alanlarda kullanılabilmesidir. Bu panellerin yapımında kullanılan malzemeler nispeten azdır, bu da üretim maliyetini düşürmektedir [125, 126]. Şekil 3.6’da amorf silikon PV hücrelerle yapılan bir uygulama görülmektedir.



Şekil 3.6. Amorf silisyum fotovoltaik paneller [127]

Amorf silikon güneş pili diğer güneş pillerine kıyasla verim oranı en düşük ve maliyet olarak en ucuz olanıdır. Amorf silikon temel olarak, erimiş silikondan üretilmek yerine bir yüzey alanına ince bir film şeklinde uygulanır ve kesilir. Bu nedenle, a-Si güneş pillerinin diğer adı ince film güneş pili [11]. Yaygın olarak, daha çok elektrik ihtiyacı

az olan elektronik cihazların enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılır. A-Si güneş pilinin, farklı uygulama alanları da mevcuttur; binalarda bulunan yarı saydam cam kaplı yüzeylere, bina dış kaplamalarına uygulanarak enerji üretici olarak kullanılabilirler [128].

Amorf ince film silisyum güneş pili metal, cam ve plastik benzeri malzemelerin kullanılması ile şeffaf ve iletken bir yüzeye bir veya birden fazla ince film silisyum tabakasının eklenmesiyle meydana gelmektedir. a-Si güneş pilleri bilimsel amaçlı kullanılan hesap makinelerinin ve bahçe aydınlatmalarının elektrik ihtiyaçlarının karşılanmasında sıklıkla kullanılır [110, 111].

3.2.2.2. Galyum arsenit ince film fotovoltaik hücreler

Galyum Arsenit (GaAs) ile üretilen güneş pillerinde laboratuvar ortamında yapılan testlerde %25 ile %28 arası verim elde edilebildiği tespit edilmiştir. Başka yarı iletkenlerle birleşik oluşturulan galyum arsenit güneş pillerinde verim %30 civarlarına çıkmıştır. Üretim maliyeti yüksek olduğundan dolayı Galyum Arsenit güneş pilleri, optik yoğunlaştırma sistemlerinde ve uzay araştırmalarında tercih edilmektedir [129].

3.2.2.3. Kadmiyum tellürid ince film fotovoltaik hücreler

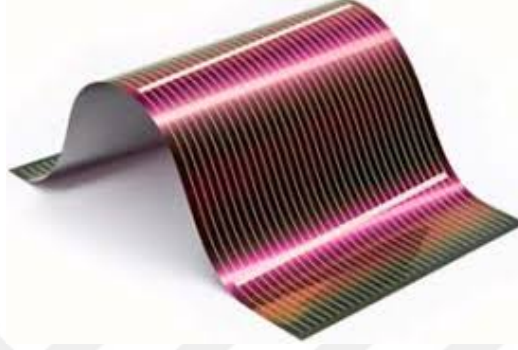
Kadmiyum elementinin ve tellür elementinin kullanılması ile üretilen kadmiyum tellür (CdTe) güneş pilleri geniş yüzey alanlarına sahip üretimlere imkân tanımakla beraber soğurma oranı yüksek bir pil çeşididir. Bu pillerden uzun sürede elde edilen verim oranı ise henüz istenilen seviyelere yaklaşamamıştır [130]. Şekil 3.7’de kadmiyum tellürid ince film panellere ait bir görsel sunulmuştur.



Şekil 3.7. Kadmiyum tellürid fotovoltaik panel [131]

3.2.2.4. Bakır indiyum diselenid ince film fotovoltaik hücreler

İnce film hücreli güneş pilleri arasında verimlilik oranı en yüksek olan panel türüdür. Ayrıca gökyüzünün bulutlu olduğu zamanlardaki verimi de diğer panel türlerine göre daha yüksektir [125]. Laboratuvar ortamında %20 dolaylarında verim elde edilmiştir. Ayrıca enerji üretme maksatlı üretilen prototip bir panelde %10,2 verim sağlanmıştır [132].



Şekil 3.8. Bakır İndiyum Diseleneid bir PV modül [127]

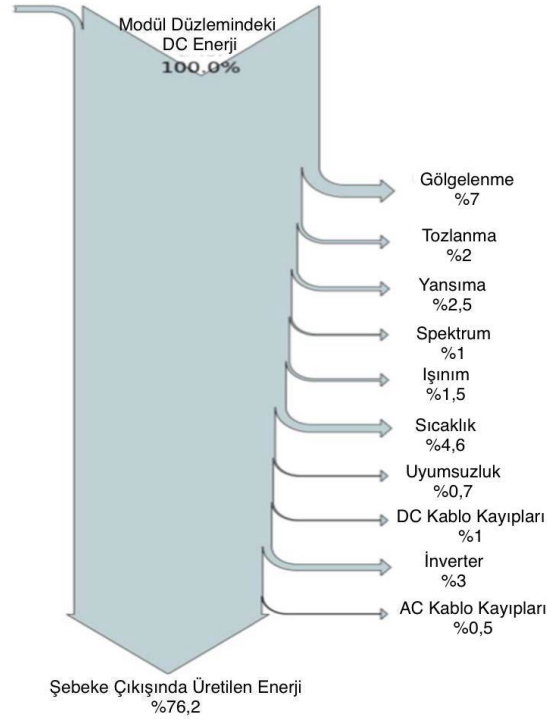
Yukarıda verilmiş olan fotovoltaik hücre çeşitlerinden verimi en yüksek olan ancak maliyeti de diğer seçeneklere göre yüksek olan hücre monokristal silisyumdur. Bununla beraber son yıllarda yapılan araştırmalar sayesinde, bütün hücre teknolojilerinin verimlerindeki iyileşme devam etmektedir [133].

Herhangi bir PV sistem tasarımında kullanılacak hücre teknolojisini belirleyen tek kıstas, verim-maliyet ilişkisi değildir. Uygulamanın yapılacağı alanın kısıtlılığı, uygulamanın boyutu, bölgenin iklim özellikleri, cephe, saha veya çatı uygulamalarından hangisinin yapılacağı gibi birçok değişken, tercih edilen hücre teknolojisini belirleyebilmektedir.

4. PV SİSTEMLERDE VERİM KAYBINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

4.1. Fotovoltaik Sistemlerde Tozlanma Kayıpları

Fotovoltaik panellerde verim kaybını etkileyen etmenler; tozlanma, gölgelenme, yansıma spektrum, ışınlım, sıcaklık, DC kablo kayıpları, uyumsuzluk, inverter ve AC kablo kayıpları şeklindedir. Şekil 4.1’de tipik bir PV paneldeki kayıplar çeşitleri ve yüzdelik değerleri ile gösterilmektedir. Bu panel örneğinde kayıpların toplamı, panel düzlemine gelen DC enerji miktarına göre %23,8’dir. Toz faktörü bu kayıplar arasında %8,4’lük bir etkiye sahiptir. Verilen kayıp oranları sembolik olup, özellikle gölgelenme, tozlanma ve sıcaklık kaynaklı kayıplar, ilgili büyüklüklerin değerine bağlı olarak daha düşük veya daha yüksek olabilmektedir.



Şekil 4.1. PV sistemde kayıplar [134]

4.2. Tozun Tanımı ve Çeşitleri

Toz bir cismin kırılma, ezilme, kimyasal değişim ve parçalanma gibi durumlara maruz kalması sonucunda oluşan küçük katı parçacıklardır. Bu küçük katı parçacıklar cismin asıl halinin özelliklerini taşıyan, boyutları 0,5-100 pm arasında değişiklik gösteren bir yapıya sahiptir [135]. Bir başka tanıma (ISO 4225-ISO,1994) göre çapı 75 mikrondan daha küçük olan, havada asılı durabilen ama sahip olduğu ağırlık sebebiyle de bir süre sonra çöken, küçük katı taneciklere toz denir [136].

Tozlar kapları veya boşlukları doldurabilecek şekilde akıcılığa sahiptirler ve gazlar gibi sıkıştırılabilirler. Toz döngüsü küresel ölçekte dünya sisteminin önemli bir parçası haline gelmiştir [137]. Tozlar, rüzgâr erozyonu ile bitki örtüsünün seyrek olduğu yerlerden diğer bir deyişle kurak bölgelerden türemektedir. Çukurlar atmosferik çöl tozlarının baskın kaynaklarıdır, çünkü bu bölgeler suların toprak taşıdığı yerlerdir ve rüzgâr erozyonuna oldukça müsaittir [138].

Tozun çeşitlerini üç ana başlık altında inceleyebiliriz. Bunlar:

- Kaynaklarına göre tozlar
- Kimyasal kökenine göre tozlar
- Biyolojik etkilerine göre tozlardır [139].

4.3. Kaynağına Göre Tozlar

4.3.1. İnsan kaynaklı tozlar

Malzemelerin işlenmesi ve taşınması, soğutma kulelerinden meydana gelen tozlar, asfalt veya asfalt olmayan yollarda meydana gelen araç trafiği, tarım gibi nedenlerden dolayı meydana gelen tozlardır [140].

4.3.2. Doğal kaynaklı tozlar

Çığ, sıcak su kaynakları, heyelanlar, kaya kaymaları, şelaleler, yanardağ gibi durumlardan dolayı meydana yayılan katı veya katı olmayan maddelerin bir araya gelmesiyle oluşan tozlardır [140].

4.4. Kimyasal Kökenine Göre Tozlar

Tozlar kimyasal kökenine göre organik ve inorganik tozlar olarak iki bölüme ayrılmaktadır.

4.4.1. Organik tozlar

- Un tozu, pamuk tozu, saman tozu, tahta tozu gibi bitkisel kökenli tozlar
- Saç, tüy gibi hayvansal tozlar
- Trinitrotoluen (TNT), Dikloro Difenil Trikloroetan (DDT) gibi sentetik bileşenli tozlardır [141, 142].

4.4.2. İnorganik tozlar

- Bakır, demir, çinko tozu gibi metalik olan tozlar

- Kömür tozu, kükürt tozu gibi metalik olmayan tozlar
- Manganez oksit, çinko oksit gibi kimyasal bileşikli tozlar
- Maden cevherleri, mineraller, killer gibi doğal bileşiklerden oluşan tozlardır.

4.5. Biyolojik Etkisi Açısından tozlar

Biyolojik etkileri bakımından tozlar altı bölüme ayrılır [141, 142].

4.5.1. Fibrojenik tozlar

Fibrojenik tozlar solunduğu takdirde zamanla akciğerde birikerek fibrotik değişikliklere yol açan, fibrojen (lif) kapasitesine sahip olan toz parçacıklarıdır. Zamanla akciğerin aktif dokularının yerini fibrotik dokular alır. Bu fibrotik dokulardan dolayı ciğerlerin normal çalışması güçleşir. Alüminyum, asbest, silis, talk en bilinen fibrojenik tozlara örnektir [141, 142].

4.5.2. Toksik tozlar

Toksik tozlar vücutta akut zehirlenme ve kronik etki yapan küçük partiküllerdir. Bu tozlar vücuda giriş yaptıktan sonra böbrekler, sinir sistemi, mide, kan yapıcı organlar, solunum organları, bağırsaklar, karaciğer gibi organlara etki ederler. Tozun bileşenlerinden en az biri bile toksik madde içeriyorsa yine de zehirlenmelere yol açabilir. Bu zehirlenmenin etkisinin büyüklüğü toksik maddenin; tozda bulunma oranına, tozun miktarına, tozun yoğunluğuna göre değişiklik göstermektedir. Mangan, kurşun, kadmiyum en bilinen toksik tozlara örnektir [141, 142].

4.5.3. Kanserojen tozlar

Kanserojen etmenler; nikel, berilyum, asbest ve arsenik bileşikleridir. Bu bileşikler çeşitli faktörlere bağlı olarak insanlarda kanser hastalığına sebep olmaktadır. Kanserojen etmenler üzerinde beslenme, çevre kirliliği, yaşam koşulları ve mesleki etkilerde etkilidir [141, 142].

4.5.4. Radyoaktif tozlar

Radyoaktif elementler; toryum, seryum, zirkonyum, trityum, radyum ve uranyumdur. Bu elementler hava içerisinde toz halinde bulunurlar ve iyonize ışınlar yayarlar. İnsan hücreleri radyoaktif ışınlara maruz kaldıklarında hücrelerde bozulmalar meydana gelir. Bu bozulmalar sonucunda tümör ve genetik bozukluklar meydana gelir [141, 142].

4.5.5. Alerjik tozlar

Alerjik tozlar; polenler, maya, küf ve çeşitli bakterilerden meydana gelen tozlardır. Hassas kişilerde alerjik tozların solunması çeşitli hastalıklara sebep olabilir. Fırıncılarda unun etkisiyle görülen astım, dokuma fabrikasında çalışan işçilerde görülen bisinoz astım alerjik tepkimelerdir [141, 142].

4.5.6. İnert tozlar

İnert tozlar; mermer, tütün tozu, alçı taşı ve kireç taşı tozlarıdır. İnsan vücuduna solunum yolları ile alınan bu tozlar akciğerde birikebilir ancak toksit ve fibrojenik etkileri olmayan tozlardır. Solunan bu tozlar, solunum yollarının kendi kendini temizlemesiyle vücuttan atılır [141, 142].

PV panel üzerinde toz veya diğer kirleticilerin birikmesi sonucu oluşan tozlanma, panel üzerinde ince bir tabaka oluşmasına yol açar ve bu oluşan ince tabakadan dolayı güneşten gelen, panel üzerine düşen ışınım azalır [143]. Işınımındaki azalma, cam üzerinde biriken tozun panel tarafından alınan güneş ışığını soğurup dağıtması sonucu olmaktadır [144-146]. Mekhilef ve arkadaşları PV panelde biriken tozun miktarı ile bir çalışma yapmıştır. PV panel verimliliğinde %10-20 civarında önemli bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir [147].

4.6. Toz Birikim Oranına Etki Eden Etmenler

PV panellerin yüzeyinde biriken toz, PV panel tarafından üretilen enerjinin performansını etkileyen çevresel faktörlerden biridir. Toz faktörü birçok farklı şekilde PV panel üzerinden alınan verimi farklı oranlarda etkileyebilmektedir. Bu şekilde PV panel üzerindeki toz birikim oranına etki eden etmenler; PV panellerin eğim açısı, rüzgâr hızı, nem, yağış, kaplama, temizleme, mevsimsel etki, cam karakteristiği ve karlanma gibidir.

4.6.1. PV panellerin eğim açısı

PV panelin yatay düzlem ile yapmış olduğu eğim açısının 15°'den büyük olması hâlinde yağmurun PV panel üzerinde biriken tozu temizlemede etkili olacağı tahmin edilir. Tozlanmanın PV panelde meydana getirdiği verim kaybının bu durumda %0,5'le sınırlı olacağı düşünülmektedir [148]. Eğim açısının artması panel üzerinde biriken tozun azalmasına neden olur [145, 149, 150]. Bunun nedeni, eğim açısı yüksek olduğunda tozun panel yüzeyinde tutunamaması ve üzerinden kaymasıdır [151].

4.6.2. Rüzgâr hızı

Atmosferde asılı kalan toz, panel üzerine yerleşerek yüzeyi kaplayabilir ve verimi azaltabilir [152]. Rüzgârın PV panel yüzeyinde biriken tozu temizleyici bir etkisi olduğu ilk olarak düşünülse de rüzgârın etkisi ile havada uçuşan tozun PV panel yüzeyinde birikmesine neden olur. Bu da PV panelden elde edilecek olan verimi azaltır.

4.6.3. Nem

Nemin fazla olduğu bölgelerde PV panel üzerinde biriken toz, nemin etkisiyle panel üzerine yapışacaktır. Tozun kendiliğinden panel üzerinden kalkmasını engelleyen bu durum verimi azaltacaktır. Diğer yandan nemli bölgelerde rüzgârın toz taşıma oranı az olduğundan panel üzerine rüzgâr yoluyla toz birikmesini engelleyen bir durum ortaya çıkacaktır. Ayrıca nemin PV panel üzerinde oluşturacağı terleme etkisi de gelen güneş ışınlarının kırılmasına yol açacak, PV paneldeki verimi etkileyecektir.

4.6.4. Yağış

PV panelde tozlanmanın etkileri üzerine yapılan çalışmalarda, yağışın az olduğu bölgelerde meydana gelen verim kayıplarının %15 oranlarına ulaştığı tespit edilmiştir [153]. Verim kaybının azaltılması için modüllerin belirli aralıklarla temizlenmesi gerekmektedir. Ancak yağışın az olduğu bölgelerde su sıkıntısı yaşandığından güneş enerjisi santrallerinin temizlenme işlemi maliyetlidir.

4.6.5. Kaplama

Fotovoltaik sistemlerde panel yüzeyine gelen ışınımın bir kısmı elektrik enerjisi üretiminde kullanılmakta diğer kısmı da modülden geri yansımaktadır. Yüzey kaplama camları, modül yüzeyindeki yansımayı minimuma indirmek açısından oldukça önemlidir [154]. Kaplama olayının panel üzerinde sürtünme oranına göre toz tutma miktarı değişiklik gösterir. Bu nedenle kaplama malzemelerini tercih ederken sürtünme oranını en az seviyeye indirecek tercihler yapılmalıdır.

4.6.6. Temizleme

Ticari amaçlı kullanılan çeşitli temizleyicilerle panelleri temizlemek maliyet ortaya çıkarmaktadır. Bu temizleme işlemi zaman isteyen ve paneli temizleyen kişi veya kişiler için tehlikeli bir durumdur. Ayrıca bu işlem panellerin yapısına önemli ölçüde zarar verebilir. Güneş panellerinden maksimum verim elde edilmesi için belirli aralıklarla

“ultra de iyonize saf su” ile temizlenmelidir. PV sistemlerin kullanılmasının nedeni düşük maliyetle enerji elde edilmesidir. Elde edilecek enerji miktarının artırılması, kurulum ve bakım maliyetinin en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır [154]. Örneğin, Mohamed ve arkadaşlarının Sahra’da yaptıkları çalışmada haftalık periyotlarla temizlik yaparak şubat-mayıs ayları arasında performans kaybının %2-2,5 arasında tutulduğunu belirtmişlerdir [24].

4.6.7. Mevsimsel etki

Asl-Soleimani ve arkadaşları, birkaç durumdan oluşan hava kirliliğinin, PV sistem üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, mevsimlere göre değişen hava kirliliğinin, panel performansından alınan verimin değişmesine neden olduğu sonucuna varılmıştır. Araştırmada, kış aylarında havadaki kirliliğin en yüksek seviye olduğu gözlemlenmiştir. Bu kirliliğin sonucunda verimin azaldığı değerlendirilmiştir. Sonbaharda rüzgârlı havalarda hava kirliliğinin düzenli olarak azaldığı ve PV performansının kış mevsiminden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. İlkbaharda, yağmurlu hava sayesinde kirler yıkandığı için, sistem eğim açısı arttıkça en yüksek verime ulaşılmıştır. Yaz mevsiminde 23° eğim açısında sistemin verimliliğinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hava kirliliği nedeniyle PV sisteminin verimini %60’tan fazla azaldığını gözlemlemişlerdir [14].

4.6.8. Cam karakteristiği

Walwil ve Said, tozun PV panel cam yüzeyinin geçirgenliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Genel geçirgenliğin yaklaşık %20, spektral geçirgenliğin yaklaşık %35, azaldığını tespit etmişlerdir. Biriken toz parçacıklarının genel olarak küre şeklinde olduğunu gözlemlemişlerdir [9].

4.6.9. Karlanma

Yüzeyde kar birikmesinden dolayı panel üzerinde bir tabaka oluşacaktır ve böylece modüllere ulaşan solar ışıyım miktarının azalması nedeniyle verimde kayıplara yol açacaktır. Avrupa ülkeleri için Kar Örtüsü Haritaları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu haritalar karlanmanın neden olacağı kayıpların önceden belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir [155]. Kar yağış süresinin uzun olduğu bölgelerde karlanmanın verim kayıp oranlarına etkisinin yere kurulu sistemlerde %1, çatı sistemlerinde ise %2 olduğu varsayılabilir [147].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Batman ili ve çevresinde görülen toz türleri olan kireçli, killi ve şehirselle tozun PV panel yüzeyindeki birikiminin panel verimine etkisi deneysel çalışmalarla ortaya konmaya çalışılmıştır. Batman Üniversitesi Merkez Kampüsünde kurulan deney düzeneği ile deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

5.1. Materyal

5.1.1. Deney setinin tanıtılması

Bu çalışma, kurak ve tozlanma faktörü yüksek olan karasal iklime sahip Batman ilinde, 37°54'12'' Kuzey ve 41°07'47'' Doğu koordinatlarında bulunan Batman Üniversitesi Merkez Kampüsünde, yakın veya uzak herhangi bir gölgelenme unsurundan etkilenecek biçimde konumlandırılan deney seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney setinde kullanılan PV panellerin kurulumu Şekil 5.1(a)'da görülen toplam 35 kg ağırlığındaki 4 adet paneli taşıyacak özellikte statik dayanıma sahip düzenek üzerine yapılmıştır. Eğim açısı (β) ayarlanabilen taşıyıcı düzeneğin eğimi Batman ili için yıllık optimum değer olan 32° şeklinde tespit edilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan PV paneller Şekil 5.1(b)'de görüldüğü gibi yan yana gelecek şekilde bağlantı elemanları ile taşıyıcı düzenek üzerine monte edilmiştir.



(a) Taşıyıcı sistem

(b) Kullanılan PV paneller

Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan taşıyıcı sistem ve PV paneller

Deneysel çalışmada, 90 Wp gücünde 4 adet mono-kristal silikon panel kullanılmıştır. Panellerin sabit açılı çalışma senaryosu ile işletileceği varsayıldığından tamamen güney yönüyle 32° eğim açısıyla konumlandırılmıştır. PV panellerin en önemli karakteristik özellikleri, panelin üreteceği maksimum güç (P_{max}), kısa devre akımı (I_{sc}),

açık devre gerilimi (V_{oc}), optimum yük değeri altında üretilecek gerilim (V_{mp}) ve akım (I_{mp}) değerleridir. Bu değerler, STC’de (STC: Standard Test Conditions) elde edilen değerler olup PV panellerin etiket değerleri olarak laboratuvar şartlarında üretilerek katalog bilgisi şeklinde üretici firmalar tarafından sunulmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan PV panellere ait karakteristik özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. PV panellerin karakteristik özellikler (AM=1.5 E=1000 W/m² To=25 C°)

Özellikler	Değer
Maksimum güç (P_{max})	90 W
Optimum işletme akımı (I_{mp})	5.233 A
Optimum işletme gerilimi (V_{mp})	17.2 V
Kısa devre akımı (I_{sc})	5.848 A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	22 V
Ağırlık	8.5 kg
Ebat	910*670*35 mm

Karakteristik özellikleri verilen PV paneller, STC’de yukarıda sunulan değerleri üretmekle beraber, STC dışındaki ortam şartlarında genellikle daha düşük güçler üretecekleri bilinmektedir. Panellerin üretecekleri güç miktarı, temelde STC değerleri olarak belirtilen AM (Air Mass: Hava kütlesi), E (Işınım miktarı) ve To (İşletme sıcaklığı) değişkenlerine bağlı olmaktadır. Ancak üretilen güç miktarı, direkt veya endirekt olarak ortamın bağıl nem miktarı ve rüzgâr hızına bağlı olarak da değişebilmektedir. Bu nedenle, PV sistemlerle ilgili yapılan deneysel çalışmalarda, panellerden alınan güç değerleri ile beraber bu değerlerin elde edildiği meteorolojik büyüklüklerin de eş zamanlı olarak ölçülmesi hedeflenir. Bu deneysel çalışmada, hem bu çalışma kapsamında hem de elde edilecek verilerden üretilecek başka çalışmalara hazırlık olması açısından PV panellerin ürettikleri güç değerini ölçmek üzere kullanılan data logger, eş zamanlı olarak ortamın global radyasyon değerini, hava sıcaklığını, bağıl nem oranını, rüzgâr hızını ve yönünü ölçmek üzere programlanmıştır. Data loggerın programlanmasına ait komutlar Ek 1, bağlantı şemasına ait görüntü Ek 2’de verilmiştir. Kullanılan meteoroloji istasyonu ekipmanları ve data logger Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Meteoroloji istasyonu ve data logger

Deneyisel çalışmada sensör bilgilerini ölçmek üzere Cambell Scientific firmasının CR1000 model data-loggerı kullanılmıştır. CR1000, yeterli dijital ve analog girişe sahip (16 analog ve 8 dijital) bir ürün olduğundan meteoroloji istasyonlarında ve PV araştırmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. CR1000 ile ilgili ayrıntılı teknik özellikler Ek 3'te sunulmuştur. Data-logger ve ölçüm yapan tüm sensörlerin ihtiyaç duyduğu enerji, çalışmanın hassasiyeti nedeniyle deney panellerinden değil, 16 W'lık harici bir panel aracılığıyla şarj edilen 12 V'luk bir akü ile sağlanmıştır. En kritik büyüklüklerden biri olan global radyasyon değerinin ölçülmesinde Kipp&Zonen firmasına ait CMP6 piranometresi kullanılmıştır. CMP6 piranometresinin hassasiyeti $5\text{-}20 \mu\text{V/W/m}^2$ gibi oldukça tatmin edici bir değerdir. CMP6 gibi birinci sınıf (ISO 9060:1990 sınıflandırma) piranometrelerin doğruluk sınırları içinde ölçüm yapabilmesi için termo-pil sensörünün silika jel ile nemden sürekli olarak arındırılması gerektiğinden veriler alınmadan önce silika jel haznesi yenilenmiştir. CMP6 ile ilgili ayrıntılı teknik özellikler Ek 4'te sunulmuştur. Hava sıcaklığı ve bağıl nem oranının ölçülmesi için Cambell Scientific firması tarafından üretilen HC2S3 probu kullanılmıştır. Ürünün ısı sensörü -40 ile $+60$ °C, nem algılayıcısı ise 0 ile 100 RH aralığında ölçüm yapabilmektedir. HC2S3 ile ilgili ayrıntılı teknik özellikler Ek 5'te sunulmuştur. Rüzgâr yönü ve rüzgâr hızını ölçmek üzere 3 kupa tasarımına sahip NRG Systems tarafından üretilen 40C hız sensörü ve 200P yön sensörü kullanılmış olup bu hız sensörü 96 m/s 'ye kadar ölçüm yapabilmektedir. 40C hız sensörü ve 200p yön sensörü ile ilgili ayrıntılı teknik özellikler sırasıyla Ek 6 ve Ek 7'de sunulmuştur. Bütün sensörlere ait ölçme aralıkları, hassasiyet ve doğruluk oranları kabul

edilebilir sınırlar içindedir. Şekil 5.3'te meteoroloji istasyonunda kullanılan sensörlere ait görsel verilmiştir.



Şekil 5.3. Deneyisel çalışmada kullanılan sensörler

PV enerji dönüşümü ile ilgili yapılan deneyisel çalışmalarda, PV panellerin ürettikleri enerjilerin ölçülmesi için farklı yaklaşımlar söz konusudur. Bunlardan en gerçekçi yaklaşım, PV panellerin maksimum güç noktası izleyici (MPPT) devreler içeren inverter sistemleriyle beraber kullanılarak AC şebekesine basılan enerjinin güç analizörleri aracılığıyla ölçülmesi ve izlenmesi şeklindedir. Ancak bu tür deneylerin yapılabilmesi orta veya büyük ölçekli PV dizilerinin kurulmasını gerektirmektedir. İkinci bir yöntem, özellikle aynı işletme şartları altında çalışan PV panellerin enerji dönüştürme oranları arasında bir mukayese yapılmasına yönelik çalışmalarda, PV panellerin açık devre gerilimleri ve kısa devre akımlarının ölçülmesi esas alınmaktadır. Bu yöntemin iki önemli dezavantajı vardır: Birincisi, yarı iletken teknolojisine dayalı çalışan PV hücrelerin açık devre gerilimi ve kısa devre akımlarının anlık olarak PV panel gücünü temsil etmedeki başarımıdır. Sağlıklı sonuçların elde edilebilmesi için deneylerde kullanılan PV panelin üretiminde kullanılan hücrelerin karakteristik özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bir diğer dezavantaj ise, kısa devre akım değerinin ölçülmesinin ve kaydedilmesinin data loggerlarla yapılmak istenmesi halinde hassasiyetleri çok iyi olmayan akım sensörlerinin kullanılması gerekliliğidir. PV panellerin ürettikleri enerjiyi ölçme konusunda en sık kullanılan yöntemlerden biri de panellerin rezistif karakterde bir yükü beslemesi şeklindedir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı, panellerin beslediği sabit omaj değerine sahip yüklerin panellerden alınabilecek anlık maksimum güce göre uygun bir değerde olmayabileceğidir. Ancak aynı işletme şartları altında çalışan PV

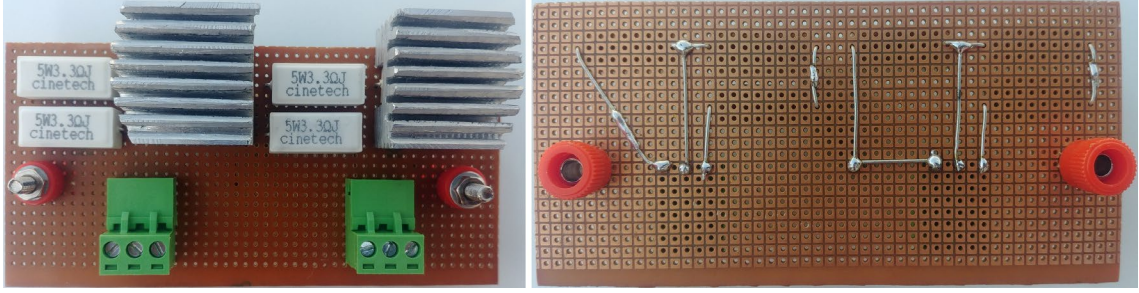
panellerle ilgili, tozlanma, soğutma gibi faktörlerin verime olan etkilerinin araştırılmasında bu yöntemi kullanmada bir sakınca yoktur.

PV paneller, sabit değerde rezistif yükleri beslemek üzere kurgulanmıştır. Şartların deneyde kullanılan 4 adet PV panel için eşit olabilmesi için tasarlanan dirençler birbirlerine olabildiğince yakın olmalıdır. Kullanılan paneller standart koşullarda 90 W güç üretmektedirler. Bu nedenle optimum işletme gerilimde 90 W güç tüketecek şekilde bir yük tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu yükler 17,2 V gerilim altında 5,233 A akım çekebilecek şekilde yaklaşık 3,25 Ω değerinde tasarlanmıştır. Tasarlanan rezistif yükte krom nikel CN80 (%80 Ni, %20 Cr) malzemesi kullanılmıştır. Bu alaşım, ısıl direnç katsayısı $\alpha=0,00014$ ($1/^\circ\text{C}$) değeriyle en düşük alaşımlardan olup direnç değeri sıcaklıktan çok az etkilenmektedir. Tasarlanan yüklere ait ayrıntılı görüntüler ve montaj görüntüsü Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Rezistif yükler

Data loggerlar genellikle küçük ölçekteki gerilim değerlerini ölçebilecek şekilde üretilmektedirler. Deneysel çalışmada kullanılan CR1000 model data logger 0-5 V aralığındaki sinyalleri ölçebilecek özelliktedir. Kullanılan PV paneller karakteristik özelliklerinden kaynaklı olarak farklı ışınlımlarda 0 ila 17,2 V aralığında gerilim üretmektedirler. Bu nedenle ölçülen panel geriliminin data loggerın ölçme sınırları içine indirgenmesi gerekmektedir. Bunun için Şekil 5.5'teki gerilim bölücü devre tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5. Gerilim bölücü devre (ön ve arka yüz)

Tasarlanan gerilim bölücü devrede yüksek güce sahip seramik yapıli dirençler kullanılmıştır ancak kullanılan dirençlerin yüksek güce sahip olmasına rağmen bazı dirençlerin akım etkisinden kaynaklı aşırı ısındığı tespit edilmiştir. Dirençlerin sağlıklı çalışması ve aşırı ısınmadan zarar görmemesi için Şekil 5.5'te görülen alüminyum malzeme ile tasarlanan pasif soğutucular kullanılmıştır. Soğutucular ile dirençler arasında dirençlerin ısısını azaltmak için gerçekleştirilecek ısı transferinin iyileştirilmesi amacıyla termal macun kullanılmıştır. Gerilim bölücü devre, deney düzeneğinde kullanılan PV panellerin beslediği yüklere paralel bağlı olup yaklaşık 0 ile 2500 mV arasında değişen düşük gerilim uçları data loggera bağlanmıştır. PV panellerin ürettiği gerçek gerilim değerleri, gerilim bölücü devrede kullanılan seramik yapıli dirençlerin değeriyle belirlenen dönüştürme katsayısı kullanılarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. Hassas terazi (RADWAG PS 1000.R2)

Deney düzeneğinde kullanılan PV panellerde biriken toz miktarının ölçümü için Şekil 5.6'daki RADWAG marka PS 1000.R2 model 0,001 gr hassasiyetindeki terazi kullanılmıştır. Deney verileri alınmaya başlanmadan önce PV panellerin bir kısmı şehirsel tozlanmaya maruz bırakılmış ve biriken toz miktarları hassas terazi ile ölçülmüştür. Hassas terazi ile ölçülen miktarlar baz alınarak deneyde çeşitli gün sayıları

için kullanılacak killi, kireçli ve şehrsel toz miktarları hesaplanmıştır. Bu tür PV çalışmalarında PV paneller yapay tozlanmaya maruz bırakıldığından deneysel çalışmada kullanılacak toz miktarlarının belirlenmesinde doğru sonuçlar elde edebilmek için kullanılan yüksek hassasiyetli ölçüm aletinin çevre şartlarından etkilenmeyecek mahfazaya sahip olması ve yere paralel olması için teraziye alınma özelliğinin olması son derece önemlidir. Kullanılan PS 1000.R2 model terazi bu gerekleri karşılamaktadır.

5.1.2. Deneyde kullanılan toz çeşitleri

Deneysel çalışmada, özellikle Batman şehrinin arazi ve toprak yapısından ileri gelen toz çeşitleri olan kireçli toprak ve killi toprak numunelerinden elde edilen tozlar kullanılmıştır. Batman'ın tarım merkezlerine yakın yerlerinde kurulacak PV sistemleri daha çok killi toprak tozuna maruz kalacakken, dağlık kesimlerinde (örneğin Raman Dağı civarlarında) kurulacak PV santrallerinin kireçli toprak tozuna maruz kalacağı öngörülmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan numuneler bu yerlerden elde edilen topraktan elde edilmiştir. Bununla beraber şehir içinde inşa edilmesi planlanan özellikle çatı GES'lerin toz ile olan ilişkisinin ortaya konması da çalışma kapsamında olduğundan şehir içinde rüzgâr ile taşınan toz öbeklerinden de toz numunesi elde edilmiştir. Çalışma kapsamında toplam 3 çeşit toz kullanılmıştır. Kullanılan toz numunelerine ait görsel Şekil 5.7'de sunulmuştur.



Şekil 5.7. Kullanılan toz türleri

Elde edilecek toz numuneleri için kullanılan killi, kireçli ve şehrsel toprağın içinde rüzgâr ile taşınamayacak irilikte parçacıkların olduğu bilinmektedir. Buna karşın panellerin tozlanmasına sebep olan etmenin rüzgâr olduğu bilindiğinden, kullanılan toprak numuneleri deneysel çalışmadan önce bir dizi işleme tabi tutularak rüzgârın taşıyabileceği boyutlarda tozların elde edilmesi sağlanmıştır. Toz parçacıklarının geometrik yapısı sonuçlar üzerinde etkili olacağından bu işlemin yapılması önemlidir.

Tozların elde edilmesi için kullanılan toprak numuneleri önce büyük ölçüde bir su kütlesi ile karıştırıldıktan sonra, su yüzeyinde kalan bitkisel parçacıklar toplanmıştır. Daha sonra karışım kısa bir süre bekletilerek öz kütlesi görece büyük olan toprak taneciklerinin karışımın dibine çökmesi sağlanmıştır. Bu işlemten hemen sonra üstte kalan karışım, ayrı bir kaba alınmış ve güneş altında suyun buharlaşması sağlanmıştır. Elde edilen toz numunelerinin elektronik mikroskop ile elde edilmiş yakın bir görseli Şekil 5.8’de sunulmuştur.



Şekil 5.8. Toz türlerinin yakın görüntüsü

Elde edilen toz numunelerinin tümünün, hava akımları ile taşınabilecek boyutlarda olduğu ve deneysel çalışma kapsamında kullanılmaya elverişli olduğu görülmüştür.

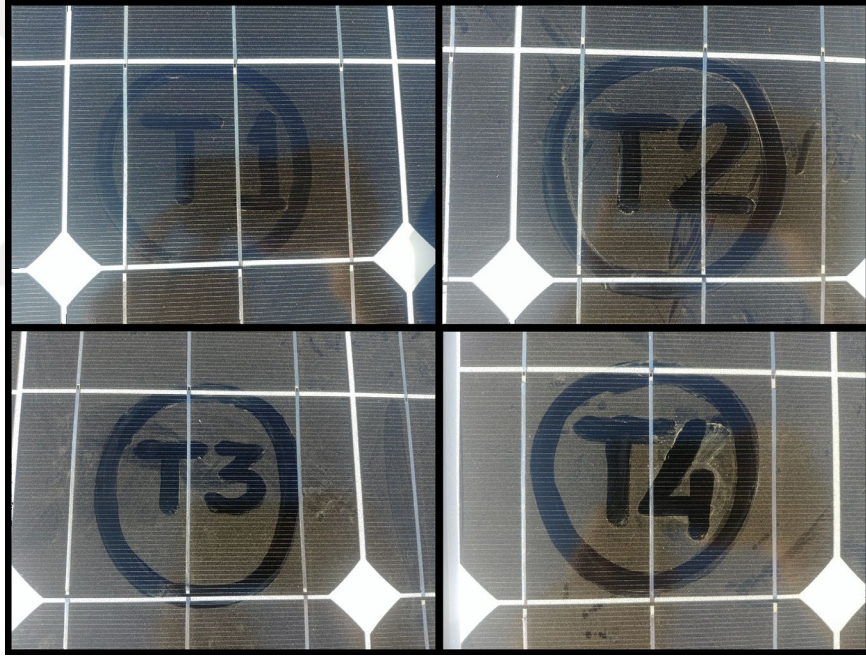
5.2. Yöntem

5.2.1. Doğal tozlanma miktarının belirlenmesi

PV enerji sistemlerinde toz faktörünün verime etkisinin hesaplanması ile ilgili karşılaşılan önemli zorluklardan biri, birim alanı birim zamanda kaplayan toz miktarının tespit edilmesidir. Bunun nedeni herhangi bir bölgede tozlanma eğilimi; ölçüm yapılacak lokasyonun yakınındaki arazilerin toprak yapısı, hava sıcaklığı, rüzgârın esme yönü ve hızı, toprağın ve havanın nem miktarı, yağış rejimi gibi birçok meteorolojik değişkene bağlıdır. Bu nedenle belirli bir lokasyonda birim alana düşen toz miktarının tespit edilmesi, etkili bir yöntemin kullanılmasını gerektirir. Ayrıca bir dizi hassas ölçme işlemi yapılmasını gerektirir. Kısa vadede elde edilecek toz birikim oranlarının tespitinin genele yayılacak hassasiyette olamayacağı bilinmelidir. 1 hafta boyunca birim alana gelen toz miktarı, bir sonraki veya bir önceki hafta boyunca gelen toz miktarından farklı olabilir. Bu durumun önüne geçmek amacı ile PV panellerin çok uzun süre testlere tabi tutulmaları gerekmektedir. Uzun süre testlere tabi tutma ise yağmur gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak

gerçekleştirilememektedir. Guo ve arkadaşlarının Doha’da uzun süre testlere tabi tutma yöntemi ile yaptıkları çalışmada [37], yağın yağmurun PV panel yüzeylerini temizlemesi, hedeflenen çalışma sürelerinin gerçekleştirilememesine neden olmuştur. Bundan dolayı bu çalışmada her ne kadar Batman ilinde birim alana birim zamanda düşen toz miktarı günlük olarak ölçülmüşse de, elde edilen verilerin gün bazında değil, daha iyi bir yaklaşım olarak panel yüzeyini kaplayan değişik toz miktarlarının panel verimi üzerindeki etkileri olarak değerlendirilmesi daha doğru olacaktır.

Doğal tozlanma sürecinde PV paneli kaplayan toz miktarının öğrenilebilmesi için kullanılan PV paneller, tozlanma eğiliminin yüksek olduğu yaz ayında, gündüz ve gece dâhil olmak üzere toplam 24, 48, 72, 96 ve 120 saat olmak üzere doğal tozlanmaya maruz bırakılmıştır. Şekil 5.9’da 1, 2, 3 ve 4 günlük toz biriktirme testlerine ait görseller verilmiştir.



Şekil 5.9. Farklı zaman dilimlerine ait toz birikme görüntüleri

Tozlanmaya maruz bırakılan PV panellerdeki toz toplanarak kütlesinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu aşamada kauçuk bir silecek kullanılmıştır. Bu işlem yapılırken, biriken tozların bir kısmının panel yüzeyini uçarak terk ettiği, bir kısmının panel yüzeyinden tamamen ayrılmadığı ve bir kısmının da sileceğe yapışık kaldığı görülmüştür. Zaten çok az olan toz miktarının ölçülmesinde bu kayıplar büyük hatalara sebep olacağından, tozların farklı bir yöntemle toplanması yoluna gidilmiştir: Öncelikle panel yüzeyine su püskürtülerek biriken tozun uçması engellenmiştir. Su ve tozdan oluşan bu karışım

kauçuk silecek yardımıyla yukarıdan aşağı doğru süpürülerek bir ağırlığı daha önce hassas terazi ile ölçülmüş bir kabın içine boşaltılmıştır. Silecek yüzeyinde kalan tozlar da yıkanarak aynı kabın içine boşaltılarak kayıp toz miktarının asgariye düşürülmesi sağlanmıştır. Kabın içindeki su buharlaştırılarak ağırlığı yine hassas terazi ile ölçülmüş ve darası çıkarılarak net toz kütlesi elde edilmiştir. Bu işlem bütün test günleri için aynı şekilde tekrarlanmıştır.

Tablo 5.2. Farklı test günlerine ait ölçülen toz miktarları

Gün sayısı	Panel boyutları (cm)	Panel alanı (cm ²)	Hücre boyutları (cm)	Hücre alanı (cm ²)	Panel düşen toz miktarı (gr)	Hücreye düşen toz miktarı (gr)
1 Günlük	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	0,124	0,0047
2 Günlük	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	0,233	0,0088
3 Günlük	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	0,326	0,0123
4 Günlük	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	0,412	0,0156
5 Günlük	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	0,487	0,0184

Tablo 5.2 incelendiğinde, test günlerine göre panelin tozlanma eğiliminin lineer olarak değişmediği görülmektedir. Birim zamandaki tozlanma miktarının gün sayısı arttıkça küçük değerlerde de olsa azaldığı görülmektedir. Bunun, zaten tozlanmış yüzeye gelen yeni tozların tutunmada zorluk yaşamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kısa vadede bu etki göz ardı edilebilse bile, orta ve uzun vadede bu değişimin PV panel verimi üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir.

5.2.2. Uzun vade tozlanma miktarlarının hesaplanması

Doğal tozlanma miktarlarının 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük zaman dilimleri için elde edilmesi için yukarıda ayrıntılarıyla anlatılan süreç takip edilmiştir. Bu çalışma kapsamında tozun orta ve uzun vadedeki etkilerinin de ortaya konması hedeflenmiştir. Orta ve uzun vadede tozlanmanın PV panel verimi üzerindeki etkilerinin ortaya konması için 1, 3 ve 6 aylık zaman dilimleri seçilmiştir. Doğal tozlanma miktarlarının ölçülmesi, kısa vadede bile zorlukla gerçekleştirilmişken uzun zaman dilimleri için bunu yapmanın hem çok zorlu olacağı, hem de yağmur ve şiddetli rüzgârların elde edilen verilerin çelişkili çıkmasına neden olabileceği düşünülmüştür. Bundan ötürü, orta ve uzun vade tozlanma miktarları hesap yoluyla bulunmaya çalışılmıştır.

Bu toz miktarlarının hesaplanması için 5 zaman dilimine ait tozlanma verileri üzerinde Polinomal Regresyon, Lineer Regresyon ve Yapay Sinir Ağları (YSA) olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır. Yöntemlerin tahminlemedeki başarımları

performansının ölçülebilmesi için gerçek değer ile yöntemlerin tahmin ettiği değerler arasındaki temel istatistikî parametreler olan MAE (MAE: Mean absolute error), MSE (MSE: Mean squared error), RMSE (RMSE: Root mean square error), MAPE (MAPE: Mean absolute percentage error), RSE (RSE: Relative squared error) ve R (R: Correlation coefficient) hesaplanmıştır. Bu parametreler aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmıştır:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - A_i)^2 \quad (5.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - A_i)^2} \quad (5.2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - A_i| \quad (5.3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{|A_i|} \quad (5.4)$$

$$RSE = \sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{(A_i - \bar{A})^2} \quad (5.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde: N örneklem sayısını, P_i tahmin edilen değeri, A_i gerçek (ölçülen) değeri, e hata değerini ve $\bar{A}$ gerçek değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.

Tablo 5.3'te Polinomal Regresyon, Lineer Regresyon ve geliştirilen YSA modelinin ürettiği tahmini değerlere göre hesaplanmış performans parametreleri sunulmuştur.

Tablo 5.3. Uygulanan yöntemlerin başarımlar istatistikleri

Yöntem	Toz miktarı (Ort., gr)		MAE	MSE	RMSE	MAPE	RSE	R	R ²
	Ölçülen	Tahmin				(%)	(%)	(%)	(%)
Polinomal Reg.	0,01196	0,01410	0,00214	7,48.10 ⁻⁶	0,0027	14,67	29,38	99,75	99,52
Lineer Reg.	0,01196	0,01190	0,00034	1,18.10 ⁻⁷	0,0003	3,745	1,405	99,75	99,52
YSA	0,01196	0,01193	0,00019	4,29.10 ⁻⁸	0,0002	1,849	0,519	99,91	99,82

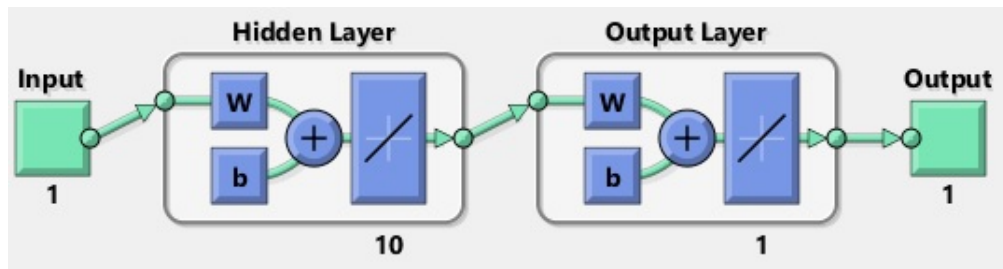
Tablo 5.3 incelendiğinde, bütün yöntemlerin korelasyon katsayısı R'yi son derece iyi bulduğu görülmektedir. Bu değer iyi olması, gerçek değer ile yöntemlerin tahmin ettiği değerler arasında sıkı bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Yöntemler arasında en iyi korelasyonun %99,91 değeriyle YSA modelinde olduğunu görülmektedir. Tahminleme yeteneğinin en iyi ölçütlerinden biri olan “ortalama mutlak yüzde hata” MAPE değerinin Polinomal Regresyon yönteminde %14,67 değeriyle görece kötü,

Lineer Regresyon yönteminde %3,745 değeriyle kabul edilebilir bir düzeyde olduğu görülmektedir. Ancak YSA modelinin %1,849 değeriyle en iyi MAPE değerine sahip olduğu görülmektedir. YSA modelinin eğitim sürecinde performans kriteri olarak da kullanılan MSE'nin 3 yöntem arasında $4,29.10^{-8}$ değeriyle en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Diğer tüm istatistikî ölçütlere göre de en iyi tahminleme işlevini, geliştirilen YSA modelinin sunduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre çalışmada YSA modelinin ürettiği değerler en doğru kabul edilmiş ve uzun vade testlerinde bu değerler kullanılmıştır.

5.2.3. Geliştirilen yapay sinir ağı modeli

Deneysel çalışmada elde edilen veri seti sınırlı olduğundan geliştirilmek istenen YSA'yı test etme sürecinde birçok mimari yapı incelenmiş ve analizler MSE performans ölçütlerine göre detaylı bir şekilde yapılmıştır.

Literatürde PV hücre ve modüllerin modellenmesinde, PV panellerin ürettikleri gücün tahmininde, I-V karakteristiklerinin saptanması ve MPPT tekniklerinin uygulanmasında sağladığı başarı nedeniyle kullanılan YSA yönteminde bu çalışma kapsamında en iyi tahminlemenin ağ tipi olarak İleri Beslemeli Geriye Yayımlı algoritma (FFBNN: Feed Forward Back Propagation Neural Network) ve öğrenme sürecinde hataya dayalı performans fonksiyonu Levenberg Marquardt (LM) algoritması kullanılması durumunda gerçekleştiği görülmüştür. Geliştirilen YSA modeline ait mimari yapı Şekil 5.10'da sunulmuştur.



Şekil 5.10. Geliştirilen YSA modelinin mimari yapısı

Yapılan testlere göre en iyi model; bağımsız değişken olarak gün sayısının yer aldığı girdi katmanı, 10 nörondan oluşan ve lineer transfer fonksiyonunun yer aldığı 1 gizli katman ve yine lineer transfer fonksiyonu içeren bir çıktı katmanı şeklinde elde edilmiştir. Eğitilen ağın ağırlık katsayıları ve sapma değerlerine göre 180 farklı gün için toz birikme miktarları tahmin edilmiştir. Bu değerler arasında 30 gün, 90 gün ve 180 güne ait tahmin edilmiş değerler ayıklanmıştır.

Ölçülen 5 günlük toz miktarı ile ve gün bazında ölçülen verilerin geliştirilen YSA modeli ile işlenmesi sonucunda tahmin edilen 1 aylık, 3 aylık ve 6 aylık toz birikim miktarlarına ilişkin değerler Tablo 5.4'te verilmiştir.

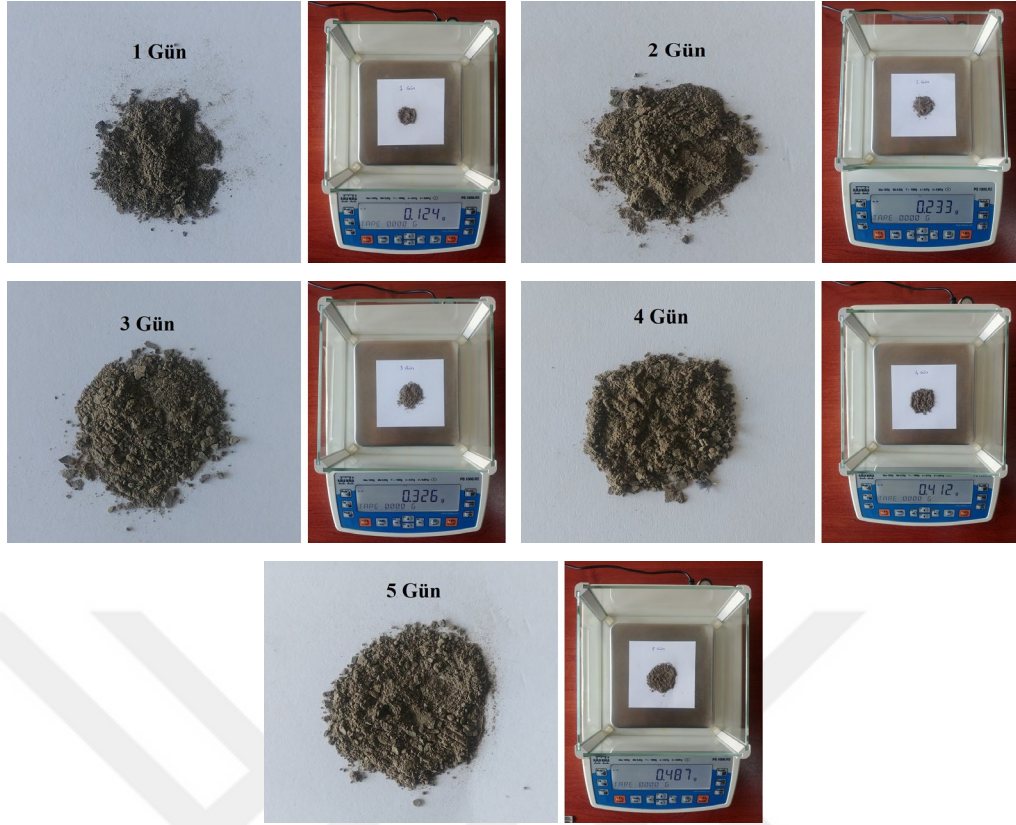
Tablo 5.4. Orta ve uzun vade için YSA modelinin tahmin ettiği tozlanma miktarları

Zaman	Panel boyutları (cm)	Panel alanı (cm ²)	Hücre boyutları (cm)	Hücre alanı (cm ²)	Panele düşen toz miktarı (gr)	Hücreye düşen toz miktarı (gr)
1 aylık	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	2,668	0,1007
3 aylık	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	7,867	0,2970
6 aylık	65x89	5785	19,5x11,2	218,4	15,707	0,5930

Tablo 5.4'teki değerlere göre YSA modeli 6 aylık süre sonunda, panel yüzeyinde birikecek toz miktarını 15,707 gram olarak tahmin etmiştir. Uzun vade için birikecek toz miktarının hesaplanmasında 1 günlük veri ile hareket edilmesi hâlinde $180 \times 0,124 = 22,32$ gram değeriyle YSA modeline göre %42, 2 günlük veri değeriyle hareket edilmesi hâlinde $90 \times 0,233 = 20,97$ gram değeriyle YSA modeline göre yaklaşık %34, 3 günlük veri değeriyle hareket edilmesi hâlinde $60 \times 0,326 = 19,56$ gram değeriyle YSA modeline göre yaklaşık %25, 4 günlük veri değeriyle hareket edilmesi hâlinde $45 \times 0,412 = 18,54$ gram değeriyle YSA modeline göre %18 ve 5 günlük veri değeriyle hareket edilmesi durumunda $36 \times 0,487 = 17,53$ gram değeriyle YSA modeline göre yaklaşık %12'lik bir hata yapılması söz konusu olacaktı. Bu değerlere bakıldığında gün sayısı arttıkça hata miktarının azaldığı anlaşılmaktadır.

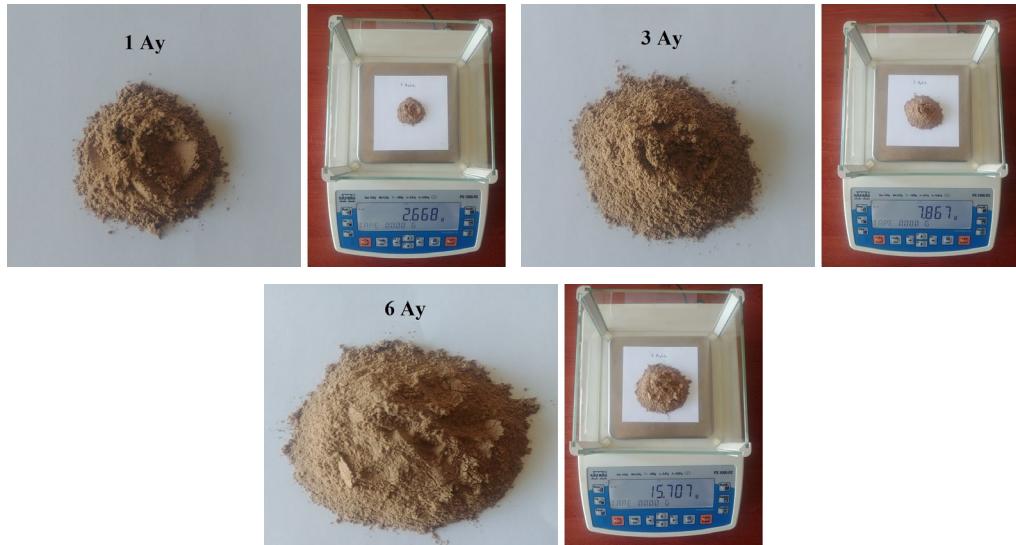
5.2.4. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi

Deneysel çalışmadan elde edilen değerlere göre, yapay tozlandırma işleminin gerçekleştirilmesi için, panel yüzeyine gelen 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük toz miktarları ve geliştirilen YSA modeli aracılığıyla hesaplanan 1, 3 ve 6 aylık toz miktarları 0,001 gr hassasiyetine sahip terazi yardımıyla tartılmıştır. Deneysel çalışma ile elde edilen, panel yüzeyinin tümüne düşen toz miktarlarına ait tartım işlemine ait görsel Şekil 5.11'de sunulmuştur. Bu görseldeki toz numunesi şehirselle toz olarak tercih edilmiştir. Ancak aynı tartım işlemi killi ve kireçli toprak tozu için de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.11. 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük testler için toz tartım işlemi

Deneysel çalışmalardan elde edilen toz miktarlarına ilişkin hesaplamalar sonucunda geliştirilen YSA modelinin ürettiği 1, 3 ve 6 aylık toz miktarlarına ait tartım işlemi Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Bu görseldeki toz numunesi killi toz olarak tercih edilmiştir. Ancak aynı tartım işlemi kireçli ve şehirselleştirilmiş toprak tozu için de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.12. 1, 3 ve 6 aylık testler için toz tartım işlemi

Bu çalışmada PV panellerin yüzeylerinin yapay tozlandırılması işleminde tozun PV panel yüzeyinin tamamına homojen olarak dağıtılmasının büyük zorluklar doğurduğu gözlemlenmiştir. Doğal tozlanmada toz genellikle panel yüzeyine homojen olarak dağılmaktadır. Yapay tozlandırmada bu homojen dağılımın sağlanması, elde edilecek verilerin sağlığı açısından önemlidir. Bundan dolayı, killi, kireçli ve şehirselle toz numunelerinin bir hücrenin kapladığı alana düşecek kadar kütleleri tekrar tartılmıştır. Elde edilen numuneler her test gün ve ay sayısı kadar tartıldıktan sonra tıpası bulunan küçük cam şişeler içine konulmuş ve etiketlenerek tasnif edilmiştir. Her panelin bir hücresine homojen olarak dağıtılacak toz numunelerine ait görsel Şekil 5.13'te sunulmuştur.



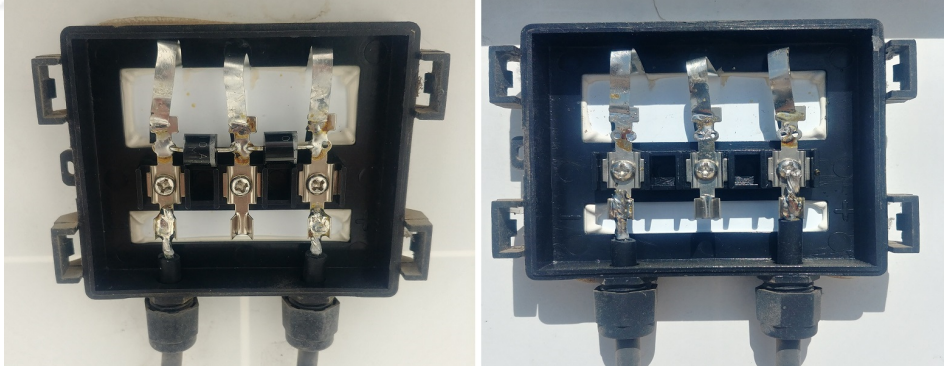
Şekil 5.13. 1 günlük yapay tozlandırma için toz numuneleri

Tablo 5.2 incelendiğinde 1 günlük tozlanma miktarının 0,0047 gr olduğu görülmektedir. Buna karşın Şekil 5.13'teki test numunelerinin kütlesinin yaklaşık 5 mg olması, kullanılan terazinin hassasiyeti 1 mg olduğundan, bu işlemi yapmada ölçme sınırlarının dışında kalmasından ileri gelmektedir. Bundan dolayı 1 günlük numune hazırlanırken yaklaşık 5 mg olarak tartılmış, ayrıca diğer gün ve ay numunelerine ait ölçümlerinde de aynı yöntem izlenmiştir.

PV panellerin gölgelenmeye maruz kaldığı durumlarda gölgeyi oluşturan nesnenin uzaklığı ve panel yüzeyinde oluşan geometrinin şekline ve boyutuna bağlı olarak hiç enerji üretememe ya da üretilmesi gereken enerji miktarından çok daha az enerji üretimi gerçekleştirdiği görülür. Benzer şekilde panelin kısmî gölgelemeye maruz kaldığı durumlarda ise, PV panel içerisindeki hücrelerden yalnız bir tanesinin kısmen veya tamamen gölgelenmiş olması da, panelden elde edilecek toplam verimini ciddi oranda etkileyebilmektedir. Bunun sebebi, P ve N olarak katkılandırılmış silisyum

tabakalarının PV hücrelerin tipik bir diyot karakteristiği göstermeleridir. Seri bağlı bir diyot grubunda herhangi bir diyotun kesime uğraması tüm seriyi kesime uğratacağı gibi, hücrelerin birbirine seri bağlanarak oluşturulan PV panellerde de bir hücrenin enerji üretmemesi, bütün bir panelin enerji üretmemesine neden olmaktadır. Bu şekilde bir PV panelden elde edilecek toplam verim, paneli meydana getiren hücrelerden verimi en düşük olanın verimine eşit olduğu söylenebilir. Bu durumun önüne geçmek için by-pass diyotları kullanılır. Kullanılan by-pass diyotlarının sayısı, PV paneli oluşturan hücrelerde oluşturulan grup sayısına bağlıdır. Kullanılacak by-pas diyotlarının sayısını belirlemede en ideal metot PV paneldeki her hücre için bir by-pass diyotu kullanmaktır. Bu kullanımın uygulamada zorluklar doğuracağından, genellikle bir PV panel için 2 veya 3 adet by-pass diyotu kullanılmaktadır. By-pass diyotlarının kullanılması ile PV panel yüzeyinin kısmi gölgelenmesinde, yalnız gölge etkisi görünen hücrenin bağlı bulunduğu hücre grubunun ürettiği enerji değeri etkilenmektedir.

Bu nedenle, yukarıda sunulan bilgiler ışığında yalnızca bir hücreyi kapsayacak şekilde tozlandırma yapılmıştır. Tozlandırılan hücrenin panelin tüm verimini etkileyebilmesi için PV panellerde bulunan by-pass diyotları sökülüştür. Şekil 5.14'te by-pass diyotlarının sökülmeden önceki ve söküldükten sonraki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.14. By-pass diyotları

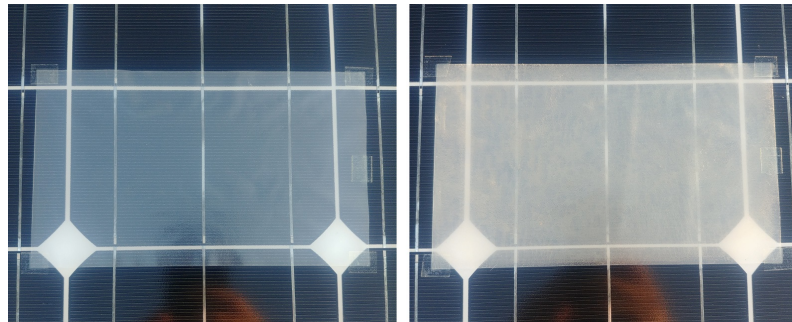
Kullanılan PV panellerin yüzey alanı 5785 cm^2 'dir. Bu panellerde yatayda 4 ve dikeyde 9 olmak üzere toplam 36 adet hücre bulunmaktadır. Tozlandırılacak yüzey alanına, cam tabaka arasından meydana gelebilecek ışık sızmalarının engellenebilmesi için bir hücre boyutundan daha büyük bir alan belirlenmiştir. Bu alan $218,4 \text{ cm}^2$ olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.15'te doğal tozlanmaya maruz kalan ve temizlenmiş bir panel ile birlikte yapay olarak tozlandırılmış bir hücre gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Temiz ve tozlu panel – Tozlandırılmış hücre

Data logger, PV panellerin gerilim değerlerini ve meteoroloji istasyonundan eş zamanlı olarak elde edilen verileri, 5 dakikalık periyotlarla 5 saniyede bir alınan verilerin ortalaması olarak kaydedecek şekilde programlanmıştır. Ancak bulgular bölümündeki grafiklerin daha anlaşılır olması için elde edilen bu veriler 15'er dakikalık periyotlarla oluşturulmuştur.

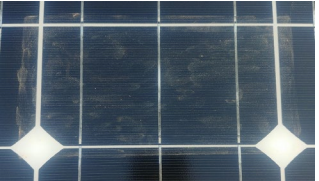
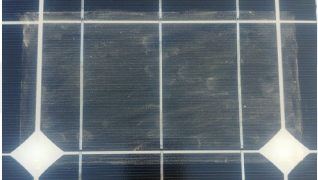
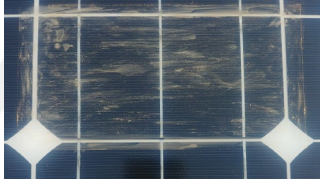
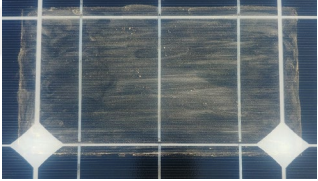
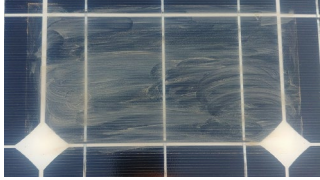
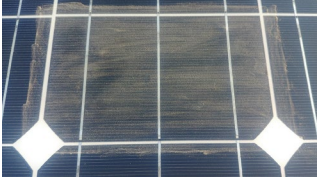
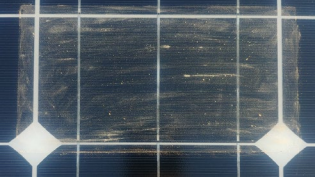
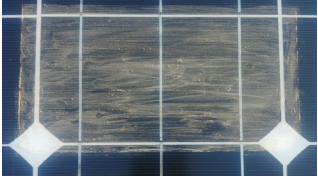
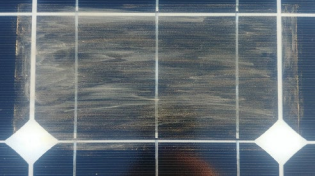
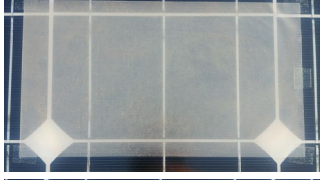
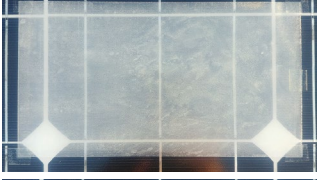
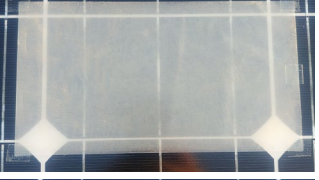
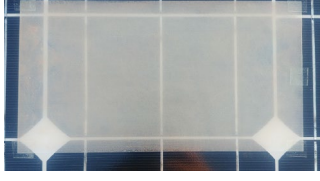
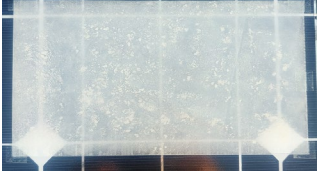
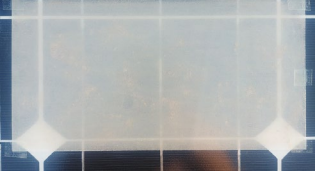
Toz miktarının görece fazla olduğu 1 aylık, 3 aylık ve 6 aylık testlerin gerçekleştirilmesinde, dağıtılan tozun hücre yüzeyinden rüzgâr nedeniyle savrulabildiği gözlemlenmiştir. Bu durum elde edilen verilerin yanlış olması riskini doğurmuştur. Bunun önüne geçilebilmesi amacıyla 1 aylık, 3 aylık ve 6 aylık testler gerçekleştirilirken ilgili toz miktarları iki katlı şeffaf yapı içine homojen dağıtılarak, hücre yüzeyi bu yapı ile kaplanmıştır. Ancak bu işlem yapılmadan önce bu şeffaf yapının da tek başına panel verimi üzerindeki etkisi olacağı bilindiğinden, 1 gün boyunca bu etkinin değerini tespit etmek üzere testler yapılmıştır. Şeffaf dosyanın tek başına panel verimini %8 civarında düşürdüğü görülmüştür. 1 aylık, 3 aylık ve 6 aylık toz testleri yapılırken, temiz panelde de iki katlı ancak içinde toz bulunmayan naylon yapı kullanılmıştır. Temiz panel ile killi, kireçli ve şehrsel toz numunelerinin uygulandığı diğer test panellerinin ürettiği güç değerlerine şeffaf naylon yapının etkisi yansıtılarak hesaplamalar yapılmıştır. Kullanılan şeffaf yapının temiz ve 1 ay için şehrsel toz ile yapay tozlandırılmış hücre üzerindeki görüntüsü Şekil 5.16'da verilmiştir.

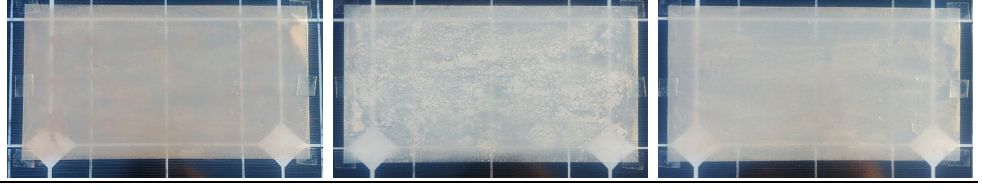


Şekil 5.16. Şeffaf yapıların hücre üzerindeki görüntüsü

Hassas terazi aracılığıyla tartılan ve killi, kireçli ve şehirsel olarak organize edilen toz numuneleri, radyasyon değerinin ve bulutluluğun mevsim normallerinde olduğu günlerde bir hücre için belirlenen alanı kaplayacak şekilde olabildiğince homojen olarak kendilerine ait paneller üzerine dağıtılmıştır. Her test gününde, tozların hücreler üzerine dağılımı fotoğraflanmıştır. Tablo 5.5'te 1, 2, 3, 4 ve 5 gün ile 1, 3 ve 6 aylık periyotlar için toz numunelerinin hücreler üzerindeki dağılımı sunulmuştur.

Tablo 5.5. Farklı test günü sayıları için hücre üzerinde tozların dağılımı

Periyot	Killi toprak tozu	Kireçli toprak tozu	Şehirsel toprak tozu
1 Gün			
2 Gün			
3 Gün			
4 Gün			
5 Gün			
1 Ay			
3 Ay			

6 Ay

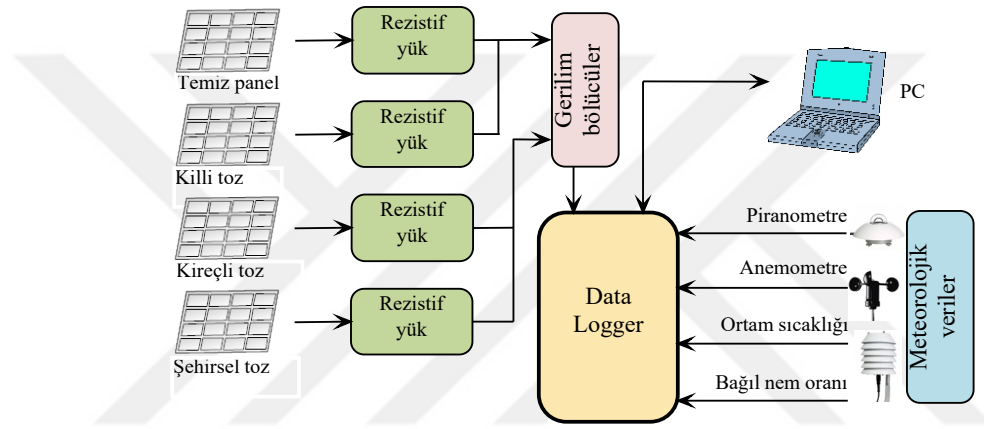
PV hücreler üzerinde tozlandırma işlemi yapılırken, 1, 2 ve 3 günlük miktarlar için tozlandırma esnasında herhangi bir zorlukla karşılaşılmamıştır. Ancak 4 ve 5 günlük toz miktarlarının homojen dağılımının sağlanmasında çıkan zorluk, tozun az miktarda su ile karıştırılarak yüzeye dağıtılması ile aşılabilmektedir. 1, 3 ve 6 aylık toz testlerinde kullanılan şeffaf naylon yapılar sayesinde toz dağılımı bir sorun çıkarmamıştır.



6. BULGULAR

6.1. Meteorolojik Veriler

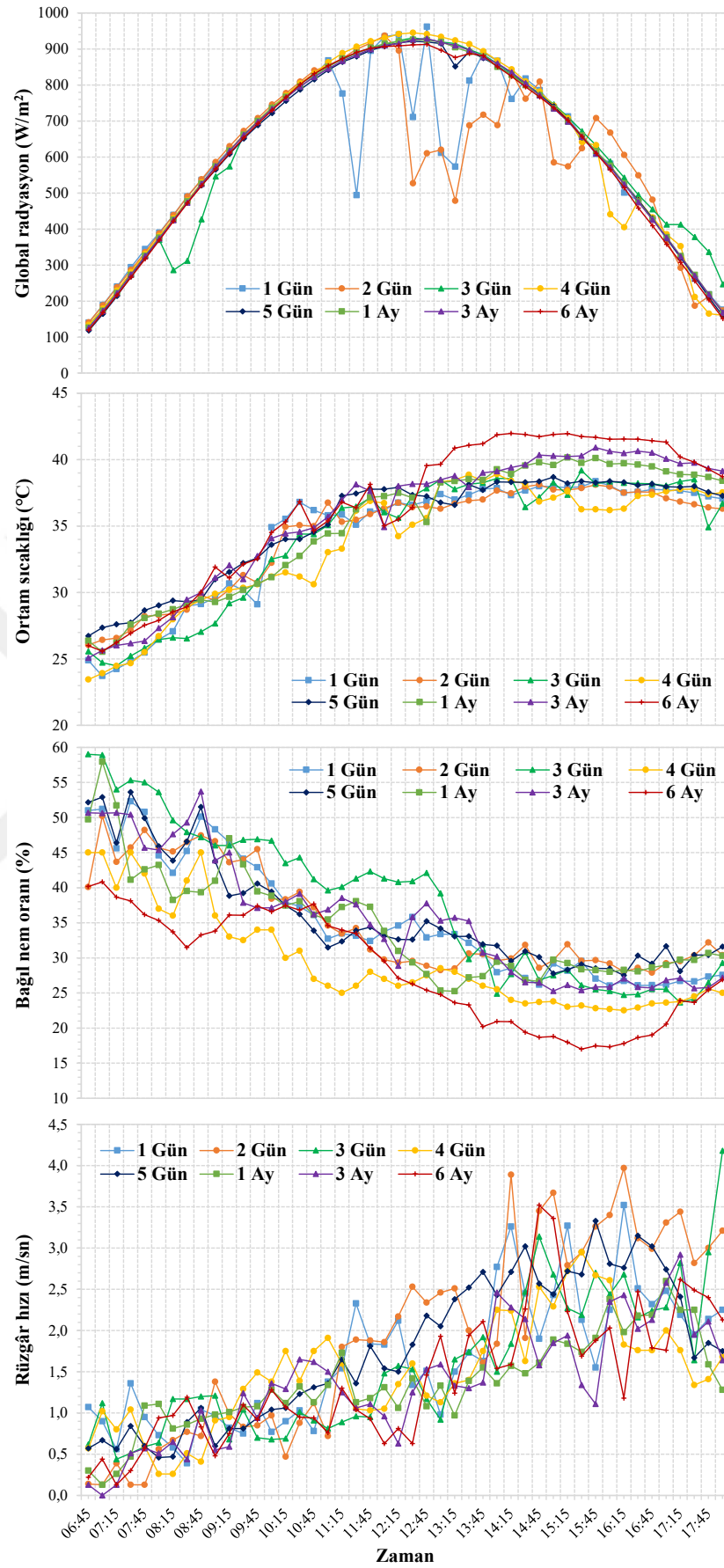
Bu tez çalışmasında, çeşitli toz kaynaklarının PV modüller üzerindeki etkileri araştırılırken, PV sistemlerin verimini etkilediği bilinen rüzgâr hızı, işletme sıcaklığı ve bağıl nem oranı gibi meteorolojik değerler de eş zamanlı olarak data logger cihazıyla kayıt altına alınarak, araştırmacıların bilgilerine sunulmak istenmiştir. Kullanılan 4 adet mono-kristalin PV modül ile piranometre, anemometre, termometre ve higrometre sensörlerinden gelen verilerin kaydedilmesine ait genel blok diyagramı Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Veri setinin elde edilmesine ait genel blok diyagramı

Veri kaybının önüne geçmek üzere, her test günü için CR1000 data loggerının kaydettiği veriler, RS 232 seri iletişim bağlantı protokolü ile kişisel bir bilgisayara aktarılmıştır. Bu aktarım sırasında data loggerın üreticisi tarafından geliştirilen LoggerNet 4.2.1 yazılımının sunduğu ara yüzler kullanılmıştır.

Elde edilen meteorolojik veriler ve PV panel güçleri 10.08.2021 – 18.08.2021 tarihleri arasındaki 8 günü kapsamaktadır. 15.08.2021 tarihinde herhangi bir test yapılmamıştır. Gece saatlerinde herhangi bir enerji üretilmediğinden, ışığın olmadığı saatlere ait tüm veriler, veri setinden ayıklanmıştır. Genel olarak veri seti, global radyasyon değerinin 100 W/m^2 ’den büyük olduğu değerlere ait veri satırlarından oluşturulmuştur. Sabah saat 06:30’dan akşam 18:00’a kadar her test günü için toplam 138, 8 deney günü boyunca toplam 1104 adet veri satırı elde edilmiştir. Bulgular bölümündeki tüm grafikler, okunaklı olabilmesi için 15’er dakikalık periyotlarla çizilmiştir. Bütün test günlerine ait meteorolojik veriler Şekil 6.2’de sunulmuştur.



Şekil 6.2. Test günlerine ait meteorolojik veriler

Şekil 6.2'deki grafikler incelendiğinde; bütün test günlerinde global radyasyon değerinin maksimum 900 ila 1000 W/m² dolaylarına erişebildiği görülmektedir. 1, 2, 3 ve 4 günlük toz birikimi için deney yapılan günlerde, bulutlanmanın etkisiyle, global radyasyon değerinin bazı saatlerde ani değişimler yaptığı gözlenmektedir. Bu değişimlerin PV modüllerin ürettiği enerji değerlerine yansması beklenmektedir. Diğer test günlerinde global radyasyon değerinin değişiminden hava şartlarının tamamen açık olduğu anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışma, yaz aylarında genel olarak sıcak hava rejimine sahip Batman ilinde gerçekleştirildiğinden, sabah saatlerinde 25 °C olan hava sıcaklığı, ikindi saatlerine 40 °C dolaylarındaki azami değerlere ulaşmakta ve günün sonuna doğru küçük düşüşler gerçekleşerek test günü tamamlanmaktadır.

Bağıl nem oranı her test günü için, sabahın ilk saatlerinde sıcaklıkla ters bir ilişki içinde %40 ila %60 RH değerleri arasında başlayıp ikindi saatlerinde %15 ila %30 dolaylarındaki asgari değerlerini kaydederek, sıcaklığın etkisini yitirmeye başladığı saatlerde yine artış trendine girdiği görülmektedir.

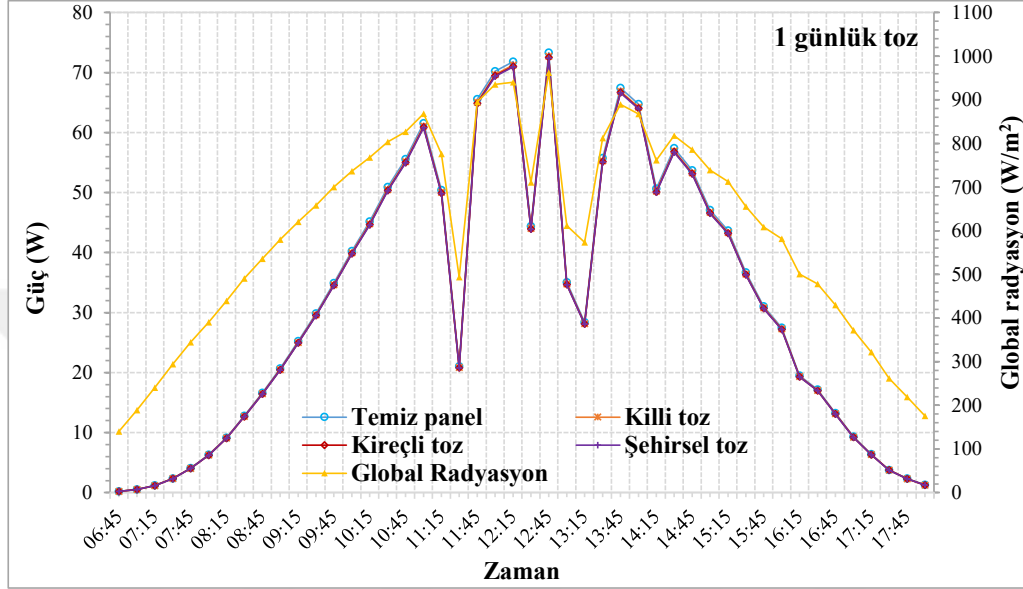
Rüzgâr hızının genel olarak sabahın erken saatlerinde düşük değerlerde seyrettiği, test günlerinin ilerleyen saatlerinde ise görece yüksek değerlere ulaşabildiği görülmektedir. Data loggerler genel olarak rüzgâr hızını, belirlenmiş bir andaki “örnek veri” olarak kaydettiği göz ardı edilmemelidir.

6.1. Testlere Ait Veriler

Çalışma kapsamında, PV modüllerden elde edilen güç değerlerine ilişkin veriler 8 ayrı güne ait yapay tozlandırma işlemi sonucunda elde edilmiştir. Yapay tozlandırma aşamasında kullanılacak toz miktarları; gerçekleştirilen 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük doğal tozlanma ile yapılan ön testler neticesinde elde edilirken, orta ve uzun vade olarak tayin edilen 1, 3 ve 6 aylık yapay tozlandırma işleminde kullanılan toz miktarlarının saptanmasında ise ön test işleminde elde edilen veriler üzerinde Lineer Regresyon, Polinomal Regresyon ve YSA gibi çeşitli kestirim yöntemleri kullanılmıştır. Çeşitli başarımlar ölçütlerine göre değerlendirilen bu yöntemler arasında en başarılı yöntemin geliştirilen model aracılığıyla YSA olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde sırasıyla tüm deney test günlerinde, temiz panel ile killi, kireçli ve şehirsiz toz ile yapay olarak tozlandırılmış PV panellerin ürettiği güç değerleri grafik olarak sunulmuş ve gerekli açıklamalar yapılmıştır. Yapılan bütün deneylerde, panellerin test günü boyunca bir günlük doğal tozlanmaya da maruz kaldığı bilinmelidir.

6.1.1. 1 günlük test verileri

Temiz ve çeşitli toz numuneleriyle tozlandırılmış PV panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülmüştür. Ölçümlerden alınan sonuçlara göre, temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışıınım değeri ile beraber Şekil 6.3'te grafik olarak sunulmuştur.

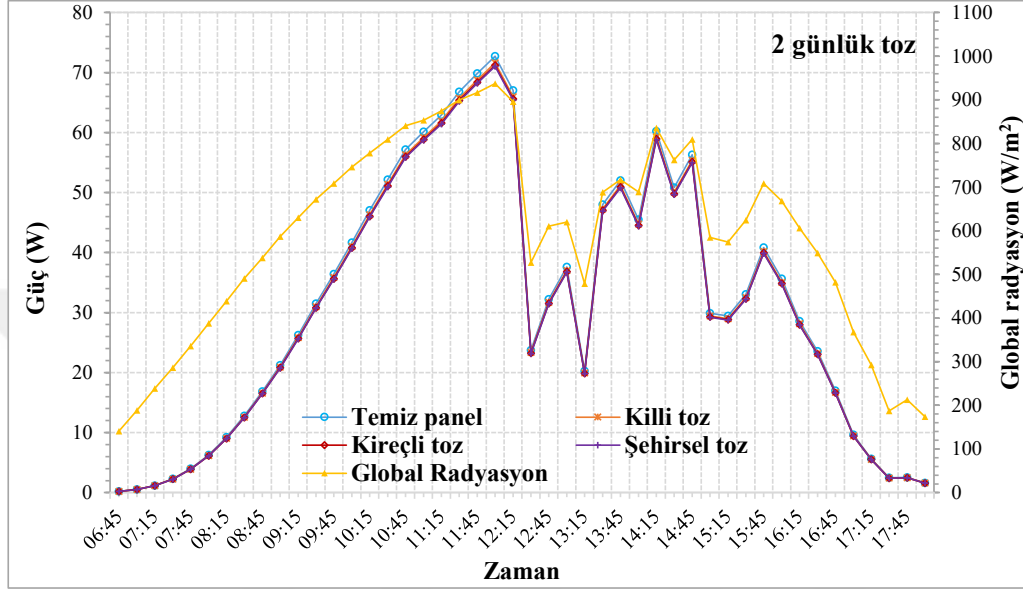


Şekil 6.3. 1 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

1 günlük toz birikimine ait deneysel veriler 10.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. Yapılan ön testlere göre, 1 günde panel yüzeyi üzerinde 0,124 gr toz birikmiştir. Yöntem kısmında açıklanan bilgilere göre, tek hücrenin üzerine düşen toz miktarı 0,0047 gr olarak hesaplanmıştır. Daha önce 0,001 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılarak deney için hazır hâle getirilmiş killi, kireçli ve şehirselsel toz numuneleri tozlandırılacak hücreye homojen olarak dağıtılmıştır. Bu test gününde havanın 11:00 ila 14:30 arasında parçalı bulutlu olduğu görülmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç 73,31 W değeriyle saat 12:45'te ölçülmüştür. 1 gün için killi, kireçli ve şehirselsel toza maruz bırakılmış paneller için de en yüksek güç değerleri saat 12:45'te ölçülmüş olup, sırasıyla 72,735 W, 72,544 W ve 72,415 W değerlerindedir. Tüm paneller için en yüksek güç değerlerinin görüldüğü saat 12:45'te; global radyasyon değeri 962 W/m², hava sıcaklığı 36,86 °C, bağıl nem miktarı %32,9 ve rüzgâr hızı 1,51 m/sn olarak kaydedilmiştir. Paneller düşük tozlanma miktarı nedeniyle gün boyunca birbirlerine oldukça yakın değerlerde güç üretmiş olsalar bile, en yüksek güç üretimini başta temiz panel olmak üzere, sırasıyla killi, kireçli ve şehirselsel tozlu panellerin sağladığı görülmektedir.

6.1.2. 2 günlük test verileri

Temiz panel ve 2 günlük toz miktarına maruz bırakılan diğer panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülmüştür. Ölçümlerden alınan sonuçlara göre, temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışıınım değeri ile beraber Şekil 6.4'te grafik olarak verilmiştir.



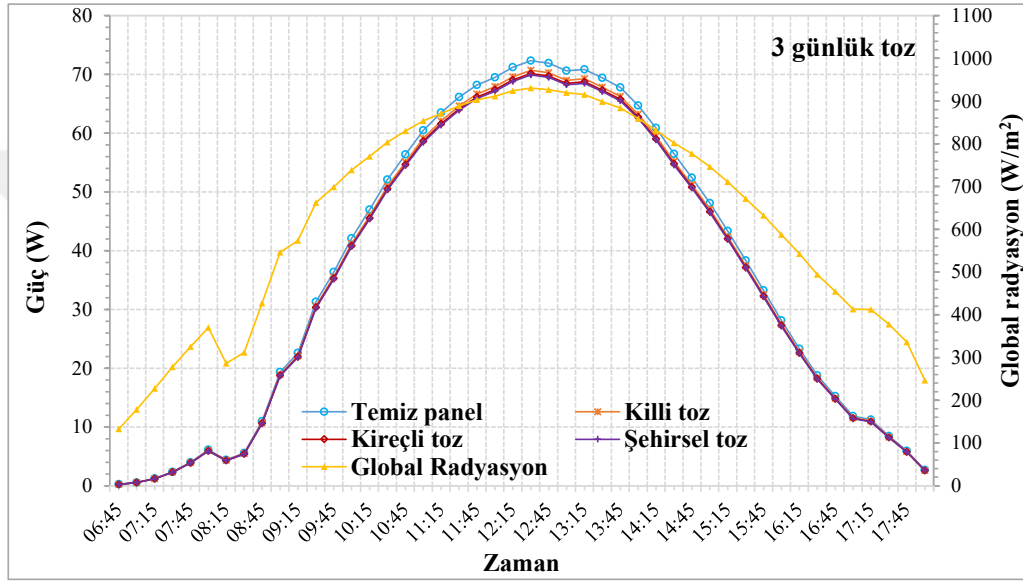
Şekil 6.4. 2 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

2 günlük toz birikimine ait deneysel veriler 11.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. Yapılan ön testlere göre, 2 günde panel yüzeyi üzerinde 0,233 gr toz birikmiştir. Takip edilecek yöntem gereğince tek hücrenin üzerine düşen toz miktarı 0,0088 gr olarak hesaplanmıştır. 0,001 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılarak deney için hazır hâle getirilmiş killi, kireçli ve şehirsel toz numuneleri tozlandırılacak hücrelere homojen olarak dağıtılmıştır. Bu test gününde havanın öğlene kadar ve ikindi saatinden sonra genel olarak tamamen güneşli olduğu, 12:00 ila 15:45 arasında ise parçalı bulutlu olduğu görülmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç değeri saat 12:00'da 72,734 W olarak ölçülmüştür. 2 gün için killi, kireçli ve şehirsel toza maruz bırakılmış paneller için de en yüksek güç değerleri saat 12.00'da ölçülmüş olup, sırasıyla 71,604 W, 71,221 W ve 71,021 W değerlerindedir. Tüm paneller için en yüksek güç değerlerinin görüldüğü saat 12:00'da; global radyasyon değeri 937 W/m², hava sıcaklığı 36,32 °C, bağıl nem miktarı %29,75 ve rüzgâr hızı 1,86 m/sn olarak kaydedilmiştir. 1 günlük toz deneyine benzer olarak düşük tozlanma miktarı nedeniyle gün boyunca birbirlerine oldukça yakın

değerlerde güç üretmiş olsalar bile, panellerin güç üretim sıralamasının değişmediği görülmektedir.

6.1.3. 3 günlük test verileri

Temiz panel ve 3 günlük toz miktarına maruz bırakılan diğer panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülerek, alınan sonuçlara göre temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışıınım değeri ile beraber Şekil 6.5'te grafik olarak verilmiştir.



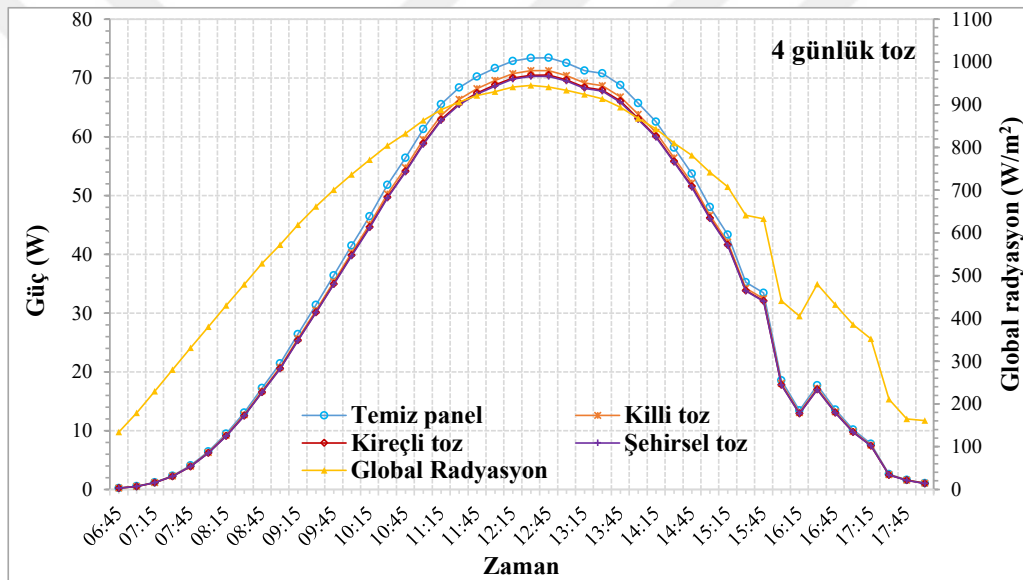
Şekil 6.5. 3 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

3 günlük toz birikimine ait deneysel veriler 12.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. Yapılan ön testlere göre, 3 günde panel yüzeyi üzerinde 0,326 gr toz biriktiği görülmüştür. Yöntem kısmında açıklanan bilgilere ışığında sadece 1 hücre tozlandırılacağı için, 1 hücrenin üzerine düşen toz miktarı 0,0123 gr olarak hesaplanmıştır. Daha önce 0,001 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılarak deney için hazır hâle getirilmiş killi, kireçli ve şehirselsel toz numuneleri tozlandırılacak hücreye homojen olarak dağıtılmıştır. Bu test gününde havanın genellikle tamamen güneşli olduğu görülmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç değeri 72,337 W olarak saat 12:30'da kaydedilmiştir. 3 gün için killi, kireçli ve şehirselsel toza maruz bırakılmış paneller için de en yüksek güç değerleri beklenen şekilde saat 12:30'da ölçülmüş olup, sırasıyla 70,691 W, 70,163 W ve 69,892 W değerlerindedir. Tüm paneller için en yüksek güç değerlerinin görüldüğü saat 12:30'da global radyasyon değeri 931 W/m², hava sıcaklığı 37,26 °C, bağıl nem miktarı %40,9 ve rüzgâr hızı 1,53 m/sn olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm gününde, tozlandırılmış panellerin

ürettiği güç değerleri birbirlerine yakın olmasına rağmen, temiz panelin ürettiği güç değerleriyle özellikle ışınımın yüksek olduğu öğlen saatlerinde, belirgin bir farkın olduğu söylenebilir. Önceki testlere benzer olarak en yüksek güç üretimini başta temiz panel olmak üzere, sırasıyla killi, kireçli ve şehirsel tozlu panellerin sağladığı görülmektedir.

6.1.4. 4 günlük test verileri

Temiz panel ve 4 günlük toz miktarına maruz bırakılan diğer panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülerek, alınan sonuçlara göre temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışınım değeri ile beraber Şekil 6.6'da sunulmuştur.



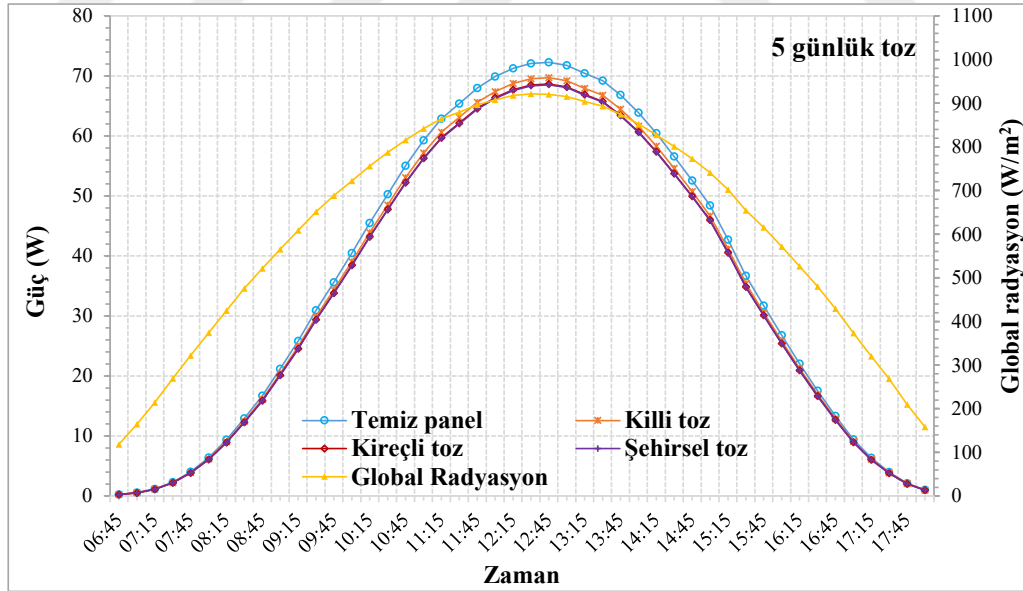
Şekil 6.6. 4 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

4 günlük toz birikimine ait deneysel veriler 13.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. Yapılan ön testlere göre, 4 günde panel yüzeyi üzerinde 0,412 gr toz biriktiği görülmüştür. Sadece 1 hücre tozlandırılacağı için, 1 hücrenin üzerine düşen toz miktarı 0,0156 gr olarak hesaplanmıştır. 0,001 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılarak deney için hazır hâle getirilmiş killi, kireçli ve şehirsel toz numuneleri tozlandırılacak hücreye homojen olarak dağıtılmıştır. Bu test gününde havanın genellikle tamamen güneşli olduğu görülse de, saat 15:45'ten akşama kadar parçalı bulutlu bir havanın varlığı gözlenmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç değeri 73,432 W olarak saat 12:45'te kaydedilmiştir. 4 gün için killi, kireçli ve şehirsel toza maruz bırakılmış paneller için de en yüksek güç değerleri beklenen şekilde saat 12:45'te ölçülmüş olup, sırasıyla 71,271 W, 70,511 W ve

70,298 W değerlerindedir. Bu test gününde en yüksek global radyasyon değeri saat 12:30'da 945 W/m^2 olarak kaydedilmiştir. En yüksek panel güçlerinin, en yüksek global radyasyonun ölçüldüğü saatte gerçekleşmediği görülmektedir. Bu sonucun, sıcaklık, nem ve rüzgâr hızı bileşenlerinin panellerin güç üretimini küçük de olsa olumsuz etkilemiş olabileceğinden ileri geldiği düşünülmektedir. En yüksek güç değerlerinin üretildiği saat 12:45'te, hava sıcaklığı $35,6 \text{ }^\circ\text{C}$, bağıl nem miktarı %27,5 ve rüzgâr hızı $1,21 \text{ m/sn}$ olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm gününde, kireçli ve şehrsel toz ile tozlandırılmış panellerin ürettiği güç değerlerinin birbirine yakın olduğu ve killi tozlu panelden daha düşük güç ürettiği görülmektedir. Temiz panelin ve tozlandırılmış panellerin ürettiği güç değerleri arasındaki farkın özellikle ışıının yüksek olduğu öğlen saatlerinde, önceki test günlerine göre daha da belirginleştiği görülmektedir.

6.1.5. 5 günlük test verileri

Temiz panel ve 5 günlük toz miktarına maruz bırakılan diğer panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülerek, alınan sonuçlara göre temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışıının değeri ile beraber Şekil 6.7'de sunulmuştur.



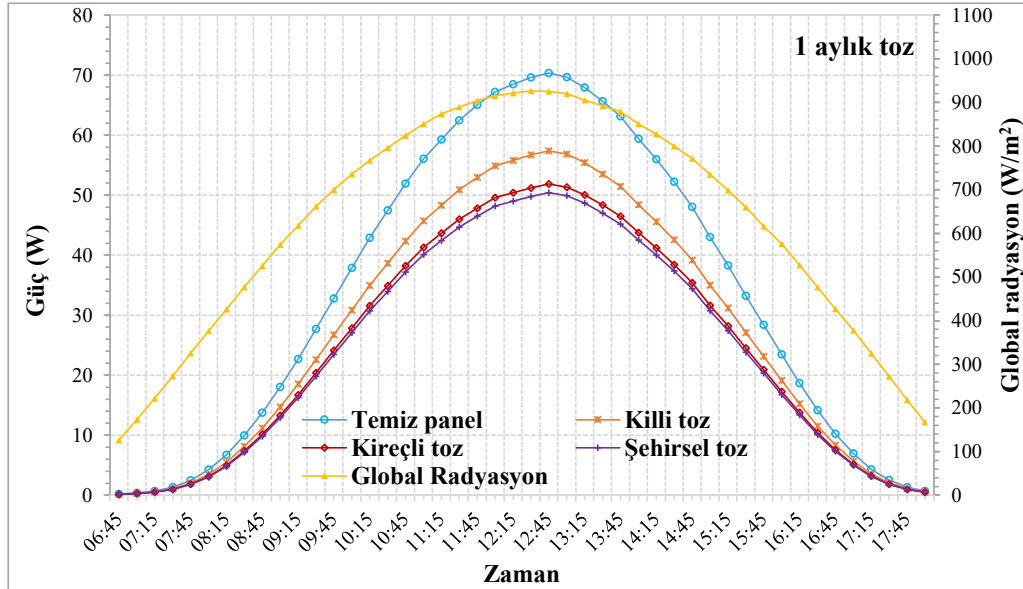
Şekil 6.7. 5 günlük toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

5 günlük toz birikimine ait deneysel veriler 14.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. Yapılan ön testlere göre, 5 günde panel yüzeyi üzerinde $0,487 \text{ gr}$ iken kullanılan yöntem gereğince 1 hücre üzerine düşen toz miktarı $0,0184 \text{ gr}$ olarak hesaplanmıştır. $0,001 \text{ gr}$ hassasiyetindeki terazi ile tartılarak deney için hazır hâle getirilmiş killi, kireçli ve

şehirsel toz numuneleri tozlandırılacak hücreye homojen olarak dağıtılmıştır. Bu test gününde havanın genellikle tamamen güneşli olduğu görülmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç değeri 72,249 W olarak saat 12:45'te kaydedilmiştir. 5 gün için killi, kireçli ve şehirsel toza maruz bırakılmış paneller için de en yüksek güç değerleri yine saat 12:45'te ölçülmüş olup, sırasıyla 69,701 W, 68,64 W ve 68,514 W değerlerindedir. Tüm paneller için en yüksek güç değerlerinin görüldüğü saat 12:45'te global radyasyon değeri 920 W/m^2 , hava sıcaklığı $37,24 \text{ }^\circ\text{C}$, bağıl nem miktarı %35,21 ve rüzgâr hızı $2,18 \text{ m/sn}$ olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm gününde, kireçli ve şehirsel toz ile tozlandırılmış panellerin ürettiği güç değerlerinin birbirine yakın olduğu ve killi tozlu panelden daha düşük güç ürettiği görülmektedir. Temiz panelin ve tozlandırılmış panellerin ürettiği güç değerleri arasındaki farkın özellikle ışıının yüksek olduğu öğlen saatlerinde, önceki test günlerine göre daha da belirginleştiği görülmektedir.

6.1.6. 1 aylık test verileri

Temiz ve çeşitli toz numuneleriyle tozlandırılmış PV panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülmüştür. Ölçümlerden alınan sonuçlara göre, temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışıının değeri ile beraber Şekil 6.8'de grafik olarak sunulmuştur.



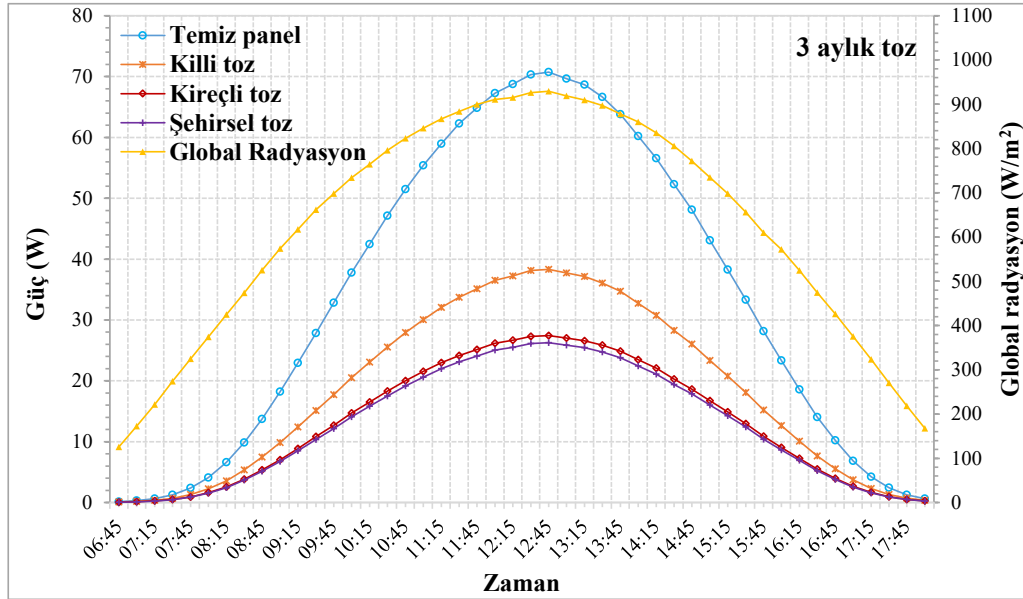
Şekil 6.8. 1 aylık toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

1 aylık toz birikimine ait deneysel veriler 16.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. YSA modelinin tahminine göre, 1 ayda panel yüzeyinde birikecek toz miktarı 2,268 gr olarak tespit edilmiştir. Kullanılan yöntem gereğince, tek hücrenin üzerine düşen toz

miktarı 0,1007 gr olarak hesaplanmıştır. Hassas terazi ile tartılarak deney için hazır hâle getirilmiş killi, kireçli ve şehirsel toz numuneleri tozlandırılacak hücreye homojen olarak dağıtılmıştır. Bu test gününde havanın tamamen güneşli olduğu görülmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç 70,346 W değeriyle saat 12:45'te ölçülmüştür. 1 ay için killi, kireçli ve şehirsel toza maruz bırakılmış paneller için en yüksek güç değerleri yine saat 12:45'te ölçülmüş olup, sırasıyla 57,413 W, 51,86 W ve 50,409 W değerlerindedir. Tüm paneller için en yüksek güç değerlerinin ölçüldüğü saat 12:45'te; global radyasyon değeri 925 W/m^2 , hava sıcaklığı $35,3 \text{ }^\circ\text{C}$, bağıl nem miktarı %27,66 ve rüzgâr hızı $1,08 \text{ m/sn}$ olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm gününde, görece yüksek toz miktarı nedeniyle, temiz panel ile tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri arasında dikkate değer farklar olduğu görülmektedir. En düşük güç üretiminin, birbirine yakın değerlerle kireçli ve şehirsel toz ile tozlandırılmış paneller tarafından sağlandığı bu test gününde, killi tozlu panel ile temiz panelin güç üretimi arasında da görece büyük farklar mevcuttur.

6.1.7. 3 aylık test verileri

Temiz ve çeşitli toz numuneleriyle tozlandırılmış PV panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülmüştür. Ölçümlerden alınan sonuçlara göre, temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışıınım değeri ile beraber Şekil 6.9'da grafik olarak sunulmuştur.

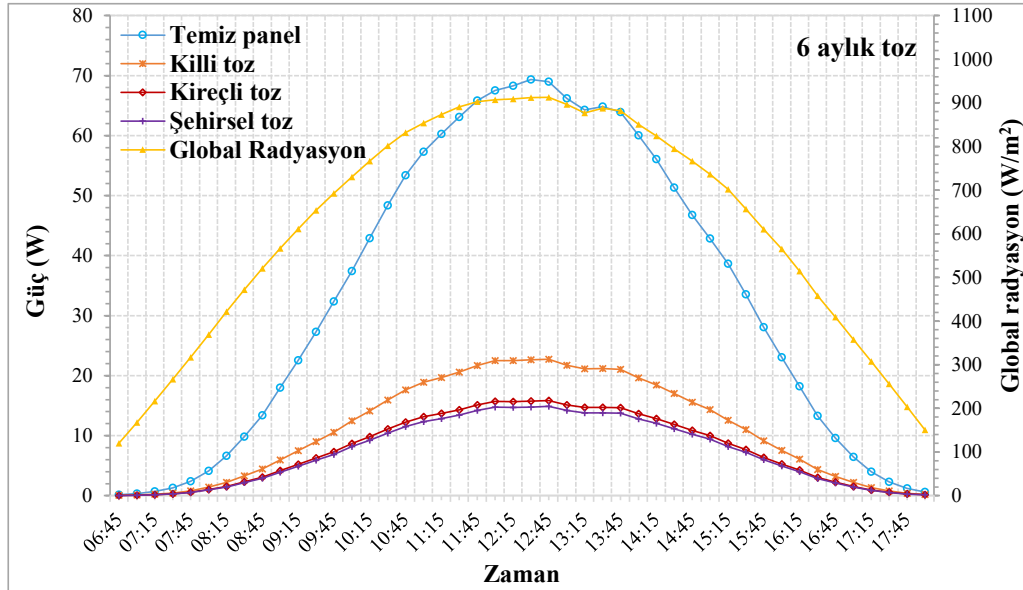


Şekil 6.9. 3 aylık toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

3 aylık toz birikimine ait deneysel veriler 17.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. YSA modelinin tahminine göre, 3 ayda panel yüzeyinde birikecek toz miktarı 7,867 gr olarak tespit edilmiştir. Tek hücrenin üzerine düşen toz miktarı ise 0,2970 gr olarak hesaplanmıştır. Bu test gününde havanın tamamen güneşli olduğu görülmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç 70,719 W değeriyle saat 12:45'te ölçülmüştür. 3 ay için killi, kireçli ve şehirsel toza maruz bırakılmış paneller için en yüksek güç değerleri yine saat 12:45'te ölçülmüş olup, sırasıyla 38,306 W, 27,438 W ve 26,255 W değerlerindedir. Tüm paneller için en yüksek güç değerlerinin ölçüldüğü saat 12:45'te; global radyasyon değeri 929 W/m^2 , hava sıcaklığı $38,16 \text{ }^\circ\text{C}$, bağıl nem miktarı %37,77 ve rüzgâr hızı $1,53 \text{ m/sn}$ olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm gününde, yüksek toz miktarı nedeniyle, temiz panel ile tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Kireçli ve şehirsel tozlu panellerin güç üretimlerinin birbirine yakın olduğu ve bu panellerin killi tozlu panelden önemli düzeyde düşük güçler ürettikleri anlaşılmaktadır.

6.1.8. 6 aylık test verileri

Temiz ve çeşitli toz numuneleriyle tozlandırılmış PV panellerin ürettikleri güç değerleri 1 gün boyunca ölçülmüştür. Ölçümlerden alınan sonuçlara göre, temiz ve yapay olarak tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri, ilgili güne ait ışıınım değeri ile beraber Şekil 6.10'da grafik olarak sunulmuştur.

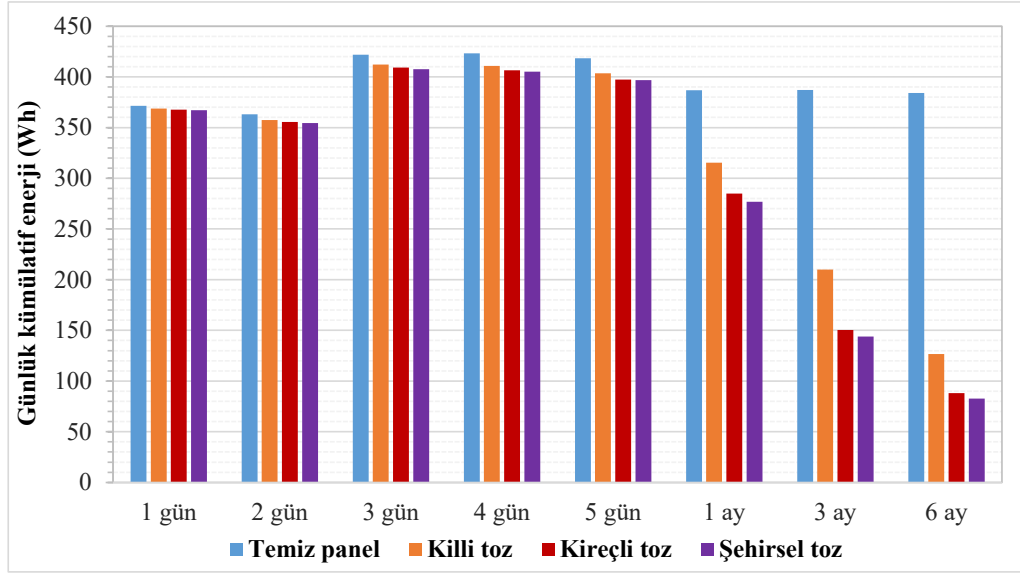


Şekil 6.10. 6 aylık toz için temiz ve tozlu panellere ait güç üretimi

6 aylık toz birikimine ait deneysel veriler 18.08.2021 tarihinde elde edilmiştir. Geliştirilen YSA modeli, 6 ayda panel yüzeyinde birikecek toz miktarını 15,707 gr olarak tahmin etmiştir. Takip edilen yöntem gereğince, sadece bir hücre tozlandırılacağından 1 hücrenin üzerine düşen toz miktarı 0,5930 gr olarak hesaplanmıştır. Hassas terazi ile tartılarak deney için daha önce hazır hâle getirilmiş killi, kireçli ve şehirsel toz numuneleri tozlandırılacak hücreye test gününde homojen olarak dağıtılmıştır. Bu test gününde havanın genel olarak tamamen güneşli olduğu görülmektedir. Temiz panelden elde edilen en yüksek güç 68,959 W değeriyle saat 12:45'te ölçülmüştür. 6 ay için killi, kireçli ve şehirsel toza maruz bırakılmış paneller için en yüksek güç değerleri benzer olarak saat 12:45'te ölçülmüş olup, sırasıyla 22,485 W, 15,655 W ve 14,689 W değerlerini almıştır. Tüm paneller için en yüksek güç değerlerinin ölçüldüğü saat 12:45'te; global radyasyon değeri 913 W/m^2 , hava sıcaklığı $39,54 \text{ }^\circ\text{C}$, bağıl nem miktarı %25,38 ve rüzgâr hızı $1,46 \text{ m/sn}$ olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm gününde, çalışma kapsamında kullanılan en yüksek toz miktarı nedeniyle, temiz panel ile tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri arasında en büyük güç değeri farkları ölçülmüştür. Tüm test günlerinde olduğu gibi, 6 aylık tozlandırma test gününde de kireçli ve şehirsel tozla tozlandırılmış panellerin yakın değerlerde güç ürettikleri tespit edilmiştir. Kireçli ve şehirsel tozlu panellerin ürettiği güç değerleri ile killi tozlu panelin ürettiği güç değerleri arasında kayda değer farklar görülmektedir.

6.1.9. Test günlerine ait kümülatif enerji üretimleri

Yukarıdaki bölümde, temiz panel ile killi, kireçli ve şehirsel toz numuneleriyle tozlandırılmış panellerin ürettikleri güç değerleri bakımından 8 farklı test günü için grafik olarak sunulmuş ve en yüksek güç değerleri ve bu güçlerin üretildiği zaman dilimindeki önemli meteorolojik parametreler verilmiştir. Bu grafikler genel olarak enerji üretimi hakkında temel bir öngörü sunuyor olsa da, tozlanma dolayısıyla meydana gelen kaybın ölçüsü hakkında tam bilgi verememektedir. Çünkü anlık güç değerleri veya kısa süreli enerji üretim değerleri arasındaki fark veya bu değerler arasındaki oran bilgisi, tozlanmanın enerji üretimi üzerindeki etkisi hakkında genel bir kanı oluşması için yetersizdir. Tam bir kanıya varabilmek için, güç-zaman grafiklerinden enerji-zaman grafiklerini elde etmek ve elde edilen sonuçlardan günlük kümülatif enerji değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Şekil 6.11'de, 8 ayrı test gününe ait temiz panel ile yapay tozlandırmaya maruz bırakılmış panellerin ürettikleri enerji Wh cinsinden kümülatif olarak grafik halinde sunulmuştur.



Şekil 6.10. Test günlerine ait temiz ve tozlu panellere ilişkin kümülatif enerjiler

Farklı test günlerinde global radyasyon, hava sıcaklığı, bağıl nem oranı ve rüzgâr hızı gibi parametreler farklı olacağından, tozlanmanın PV panel verimi üzerindeki etkisinin doğru saptanması için her test gününün kendi içinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Genel bir uyumun sağlanması için, tozlandırılmış panellerdeki verim kaybının değeri hesaplanırken, temiz panel ile mukayese edilerek oransal olarak ifade edilmiştir. Tablo 6.1’de bütün test günlerine ait kümülatif enerji değerleri ve meydana gelen kayıplar oransal olarak sunulmuştur.

Tablo 6.1. Test günlerine göre kümülatif enerjiler ve verim kayıpları

Süre	Global radyasyon (Ort., W/m ²)	Ortam sıcaklığı (Ort., °C)	Kümülatif enerji miktarları ve verim kaybı oranı (Wh, %)						
			Temiz panel Enerji	Killi toz		Kireçli toz		Şehirsel toz	
				Enerji	Kayıp	Enerji	Kayıp	Enerji	Kayıp
1 Günlük	598	34,3	371,546	368,639	%0,78	367,67	%1,04	367,011	%1,22
2 Günlük	586	34,4	363,124	357,487	%1,55	355,568	%2,08	354,57	%2,36
3 Günlük	628	34,2	421,877	412,279	%2,28	409,194	%3,01	407,622	%3,38
4 Günlük	625	33,7	423,295	410,885	%2,93	406,502	%3,97	405,274	%4,26
5 Günlük	620	35,1	418,336	403,559	%3,53	397,427	%5,00	396,681	%5,18
1 Aylık	624	35,0	386,725	315,287	%18,47	284,775	%26,36	276,807	%28,42
3 Aylık	624	35,7	387,179	210,010	%45,76	150,466	%61,14	143,989	%62,81
6 Aylık	617	36,4	384,257	126,595	%67,05	88,158	%77,06	82,723	%78,47

Tablo 6.1 incelendiğinde, tozlanma faktörünün PV panel verimi üzerinde genel olarak büyük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük tozlandırma işlemine ait test günlerinde meydana gelen verim kayıpları killi toz için %0,78 ila %3,53 aralığında, kireçli toz için %1,04 ila %5 aralığında ve şehirsel toz için %1,22 ila %2,36

aralığında gerçekleşmiştir. Bu kayıp miktarları, küçük kurulu güç sistemlerde göz ardı edilebilecekse de, sistem boyutunun büyümesiyle ciddi sonuçlar doğurabilecek seviyelerde olduğunu söylemek mümkündür. Orta ve uzun vade olarak değerlendirilen 1, 3 ve 6 aylık tozlanma periyotlarına bakıldığında, killi toz için sırasıyla yaklaşık %18, %46 ve %67 oranında, kireçli toz için sırasıyla yaklaşık %26, %61 ve %77 oranında, şehrsel toz için ise sırasıyla yaklaşık %28, %63 ve %78 oranında bir verim kaybı yaşandığı görülmektedir. Bu büyüklükteki verim kayıplarının, her ölçekteki kurulu güç değerleri için kritik boyutlarda olduğunu söylemek mümkündür. Kireçli ve şehrsel toz testlerinde elde edilen verilere bakıldığında, oluşan verim kayıplarının bütün test günlerinde birbirine son derece yakın olduğu görülse de, genel olarak şehrsel tozun kireçli toza göre daha büyük verim kaybı oluşturduğu söylenebilir. Kireçli ve şehrsel toz testlerinin birbirine yakın olmasının, iki toz örneğinin yapısal olarak benzerliğinden ileri geldiği düşünülmektedir. Killi toz numuneleri, bütün test günlerinde kireçli ve şehrsel toz numunelerine nazaran görece düşük verim kayıpları oluşturmuştur. Bu durumun, toz miktarlarının kütsel olarak tayin edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Killi toz numunelerinin öz kütlesi, kireçli ve şehrsel toza göre yüksek olduğundan hücre yüzeyinde daha ince bir tabaka oluşturduğu kanısına varılabilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Fotovoltaik uygulamaların kurulum maliyeti görece yüksek olmasına rağmen, temiz ve yenilenebilir bir enerji sunduğu için son yıllarda sıklıkla tercih edilen kaynakların başında gelmektedir. Bu sistemlerin geri dönüş sürelerinin kısaltılabilmesi için, uygulandığı bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek düzeyde olması yetersizdir. Bununla beraber, sistemin doğru kurgulanması ve işletilmesi de başat unsurlar arasındadır.

Bir PV sistemde genel olarak, gölgelenme, tozlanma, yansıma, sıcaklık uyumsuzluk, inverter, DC ve AC kablolama kayıpları söz konusudur. PV sistemler tasarlanırken veya işletilirken tozlanma dışındaki kayıpları hesaplamak veya öngörmek zor olmasa da, değişken yapısı ve miktarı nedeniyle tozlanma kayıpları hakkında öngöründe bulunmak oldukça zordur. Sistemlerin kurulduğu bölgenin toprak yapısı, bitki örtüsü, nem, sıcaklık ve rüzgâr rejimleri panellerin tozlanma eğilimi üzerinde etkili olmaktadır. Bu çalışmada, Batman ilinde tozlanmaya maruz kalan PV paneller üzerinde biriken şehrsel tozun, PV enerji dönüşümüne olan etkisi, killi, kireçli ve şehrsel toz olarak tasnif edilen farklı toz kaynakları için araştırılmıştır. Temiz ve tozlanmaya maruz kalan panellerin ürettiği enerji değerleri ölçülerek, tozlanmanın verime olan etkisi hesaplanmış ve grafiklerle ifade edilmiştir. Çalışma esnasında, üretilen enerji değerleriyle bir arada değerlendirilebilmesi için global radyasyon miktarı, ortam sıcaklığı, bağıl nem oranı ve rüzgâr hızı parametreleri de eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Bu çalışmanın, coğrafi konumu ve meteorolojik değerlerine göre özellikle yaz mevsiminde büyük miktarlarda tozlanma olayının meydana gelebildiği Batman ilinde şehir merkezi veya şehir merkezine yakın bölgelere tesis edilen veya edilmesi planlanan PV uygulamalarına katkı sunacağı düşünülmektedir. Çalışmada günlük toz miktarları kütle cinsinden de ifade edilerek, Batman ili dışındaki herhangi bir bölgede tesis edilen PV uygulamalarına da ışık tutması hedeflenmiştir.

Özellikle uzun zaman boyunca yağış almayan bölgelerde PV panellerin tozlanmasından dolayı meydana gelen kayıpların önüne geçmek için panel yüzeylerinin belirli periyotlarla temizlenmesi sistem ekonomisi bakımından önemlidir. Ancak büyük ölçekli santrallerde temizlik işlemi, kullanılan temizlik sıvıları ve işçilik giderlerinden dolayı önemli maliyetler doğurabilmektedir. Çalışmada elde edilen bulgular kullanılarak, temizlik işlemi yapılacak santralin boyutuna göre temizleme periyotları optimize edilerek

sistemlerin kârlılık düzeyi artırılabilir. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Tozlanmaya maruz kalan PV panellerin enerji üretiminde tozlanma miktarına bağlı olarak büyük miktarlarda verim kaybı yaşanabilmektedir.

Orta ve uzun vade olarak değerlendirilen 1, 3 ve 6 aylık sürelerde panel yüzeyinde oluşacak toz miktarının hesaplanmasında, lineer regresyon, polinomal regresyon ve geliştirilen YSA modelleri kullanılmıştır. MAE, MSE, RSE, MAPE ve R gibi tüm başarı ölçütlerine göre geliştirilen YSA modelinin en iyi tahminlemeyi yaptığı görülmüştür.

Panel yüzeyinde biriken toz miktarı zamana göre doğrusal artmayıp; birim alana düşen toz miktarı zamanla azalma eğilimi göstermektedir. Bunun nedeninin panel yüzeyinde belirli bir miktarda toz birikmesinden sonra panel yüzeyine gelen yeni toz partiküllerinin tutunma kabiliyetinin azalması olduğu düşünülmektedir.

Temiz PV panel ile 1 günlük tozla kaplanmış PV panellerden bir gün boyunca elde edilen toplam enerji miktarları arasındaki fark killi, kireçli ve şehirselle toz numuneleri için sırasıyla 2,907 Wh, 3,876 Wh ve 4,535 Wh'tir. Buna göre tozlanmış panellerde, temiz panele göre sırasıyla %0,78, %1,04 ve %1,22 verim kaybı oluşmuştur.

Temiz PV panel ile 5 günlük tozla kaplanmış PV panellerden bir gün boyunca elde edilen toplam enerji miktarları arasındaki fark killi, kireçli ve şehirselle toz numuneleri için sırasıyla 14,77 Wh, 20,91 Wh ve 21,65 Wh'tir. Buna göre tozlanmış panellerde, temiz panele göre sırasıyla %3,53, %4,99 ve %5,17 verim kaybı meydana gelmiştir.

Temiz PV panel ile 1 aylık tozla kaplanmış PV panellerden bir gün boyunca elde edilen toplam enerji miktarları arasındaki fark killi, kireçli ve şehirselle toz numuneleri için sırasıyla yaklaşık 71 Wh, 102 Wh ve 110 Wh'tir. Buna göre tozlanmış panellerde, temiz panele göre sırasıyla yaklaşık %18, %26 ve %28 verim kaybı oluşmuştur.

Temiz PV panel ile 3 aylık tozla kaplanmış PV panellerden bir gün boyunca elde edilen toplam enerji miktarları arasındaki fark killi, kireçli ve şehirselle toz numuneleri için sırasıyla yaklaşık 177 Wh, 237 Wh ve 243 Wh'tir. Buna göre tozlanmış panellerde, temiz panele göre sırasıyla yaklaşık %46, %61 ve %63 verim kaybı meydana gelmiştir.

Temiz PV panel ile 6 aylık tozla kaplanmış PV panellerden bir gün boyunca elde edilen toplam enerji miktarları arasındaki fark killi, kireçli ve şehirselle toz numuneleri için sırasıyla yaklaşık 258 Wh, 296 Wh ve 302 Wh'tir. Buna göre tozlanmış panellerde, temiz panele göre sırasıyla yaklaşık %67, %77 ve %78 verim kaybı oluşmuştur.

Bu büyüklükteki verim kayıplarının, her ölçekteki kurulu güç değerleri için kritik boyutlarda olduğunu söylemek mümkündür.

Kireçli ve şehirsel toz testlerinde elde edilen verilere bakıldığında, oluşan verim kayıplarının bütün test günlerinde birbirine son derece yakın olduğu görülse de, genel olarak şehirsel tozun kireçli toza göre daha büyük verim kaybı oluşturduğu söylenebilir. Kireçli ve şehirsel toz testlerinin birbirine yakın olmasının, iki toz örneğinin yapısal olarak benzerliğinden ileri geldiği düşünülmektedir.

Killi toz numuneleri, bütün test günlerinde kireçli ve şehirsel toz numunelerine nazaran görece düşük verim kayıpları oluşturmuştur. Bu durumun, toz miktarlarının kütsel olarak tayin edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Killi toz numunelerinin öz kütlesi, kireçli ve şehirsel toza göre yüksek olduğundan hücre yüzeyinde daha ince bir tabaka oluşturduğu kanısına varılabilir.

7.2. Öneriler

Gerçekleştirilen deney setinden elde edilen veriler ve bu veriler üzerinde yapılan analizlere göre yapılan çalışma ile ilgili araştırmacılara ışık tutabileceği düşünülen bazı öneriler aşağıda sunulmuştur.

Deneysel çalışmada, killi, kireçli ve şehirsel toz olarak tasnif edilen toz numuneleri kullanılmıştır. Killi toprak numunesi tarım alanından, kireçli toprak numunesi kireçli kayalardan müteşekkil Raman Dağı dolaylarından ve şehirsel toz Batman ili içindeki binalar üzerinden temin edilmiştir. Numunelerin renk ve dokuları arasında belirgin bir fark mevcuttur ancak bu toz çeşitlerinin boyutları ve kimyasal yapıları çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Daha ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirmek üzere, araştırmacılar toz numunelerinin bu özelliklerini de ele aldıkları deneysel ve/veya teorik çalışmalar yürütebilirler.

Deney süresince, PV panellerin enerji üretim miktarlarıyla beraber çeşitli meteorolojik veriler de eş zamanlı olarak ölçülmüş ve bulgular bölümünde verilmiştir. Meteorolojik büyüklüklerden global radyasyon ve sıcaklık başta olmak üzere, nem, rüzgâr hızı gibi değişkenlerin PV panel verimi üzerinde farklı önem düzeylerinde etkili olduğu bilinmektedir. Çalışma görece kurak, dolayısıyla toz miktarı yüksek Batman ilinde gerçekleştirilmiştir. Meteorolojik parametrelerin Batman iline benzer olduğu bölgelerde tozlanma eğiliminin ve tozlanmanın panel verimi üzerindeki etkisinin benzer olacağı düşünülmektedir. İklim rejiminin Batman ili ile keskin olarak ayrıştığı bölgelerde benzer çalışmalar yürütmenin literatüre zenginlik katacağı düşünülmektedir.

Uzun ve orta vadede panel yüzeyini kaplayacak toz miktarının saptanmasında birçok model kullanılmıştır. Bu modeller arasında, başarı ölçütlerine göre en iyi modelin

geliştirilen YSA tabanlı model olduğu görülmüştür. Tozlanma ile ilgili deneysel çalışmalar yürütmeyi planlayan araştırmacılara YSA'nın olumlu sonuçlar ürettiği bildirilmek istenmektedir.

Çalışmada yaygın kullanım alanına sahip mono-kristalin teknolojiye sahip PV modüller kullanılmıştır. Benzer çalışmalar, poli-kristalin veya ince-film PV teknoloji kullanan modüller üzerinde gerçekleştirilebilir. Aynı ortamda ve şartlarda işletilen farklı teknolojilere sahip modüllerin davranışlarının irdelenmesinin önemli bulguları açığa çıkaracağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Köse, E., Zengin, E., 2015. “Güneş pillerinin enerji dönüşüm kalitesini etkileyen önemli faktörlerin değerlendirilmesi”, *VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu (EVK’2015)*, 4-6 Haziran 2015, Kocaeli.
- [2] Kılıç, F.Ç., 2015. Güneş enerjisi, Türkiye’deki son durumu ve üretim teknolojileri, *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 671, 28-40.
- [3] Koç, E. ve Şenel, M. C., 2013. Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, 54(639), 32-44.
- [4] Wilson, R. and Jones, W. J., 1975. *Energy ecology and environment*, Academic Press, New York, ISBN: 0-127-57550-2.
- [5] Anonim, “Norm Enerji Sistemleri, http://www.normenerji.com.tr/menu_detay.-asp?id=10437 (5 Ocak 2021).”
- [6] Anonim, “TEİAŞ, <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (9 Şubat 2021).”
- [7] Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. 2013. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 22, 698-733.
- [8] Ndiaye A., Kébé C. M. F., Ndiaye P.A., Charki A., Kobi A., Sambou V., 2013, Impact of dust on the photovoltaic (PV) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment: The case of Senegal, *International Journal of Physical Sciences*, 8(21), 1166-1173.
- [9] Said, S. A., and Walwil, H. M., 2014, Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance, *Solar Energy*, 107, 328-337.
- [10] Qasem, H., Betts, T. R., & Gottschalg, R. (2011, June). Effect of shading caused by dust on cadmium telluride photovoltaic modules. In *2011 37th IEEE photovoltaic specialists conference* (pp. 003199-003204). IEEE
- [11] Adıgüzel, E., 2018, Farklı boyutlardaki toz partikülerinin fotovoltaiik panellerin verimliliği üzerine etkisi, yüksek lisans tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-65.
- [12] Prasad, D.K., Snow, M., 2005. *Designing With Solar Power , A Source Book for Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*, Australia, Images Publishing.
- [13] Turhan, S., 2012, Fotovoltaiik sistemlerde performans değerlendirmesi, *6. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi - Görükle Kampüsü – Bursa.
- [14] Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., Zabihi, M., 2001, The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran. *Renewable Energy*, 24 (2001), 459–468.
- [15] Elminir, H. K., Ghitas, A. E., Hamid, R. H., El-Hussainy, F., Beheary, M. M., & Abdel- Moneim, K. M. (2006). Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy conversion and management*, 47(18), 3192-3203.

- [16] Kaldellis, J. K., Kokala, A., 2010, Quantifying the decrease of the photovoltaic panels energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal. *Energy*, 35, 4862–4869.
- [17] Ju, F., & Fu, X. (2011). Research on impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance. *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 3601-3606.
- [18] Cano J., Photovoltaic Modules: Effect of tilt angle on soiling, Master Thesis, Arizona State University, 2011.
- [19] Sulaiman, S. A., Hussain, H. H., Leh, N. S. H. N., & Razali, M. S. (2011). Effects of Dust on the Performance of PV Panels. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58(2011), 588-593.
- [20] Jiang, H., Lu, L., & Sun, K. (2011). Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules. *Atmospheric Environment*, 45(25), 4299-4304.
- [21] Qasem H., Betts T.R., Gottschalg R., Effect of shading caused by dust on cadmium telluride photovoltaic modules, centre for renewable energy systems technology (CREST), Department of Electronic and Electrical Engineering, *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2011.
- [22] Touati F., Al-Hitmi M., Bouchech H., 2012, Towards understanding the effects of climatic and environmental factors on solar PV performance in arid desert regions (Qatar) for various PV Technologies. *First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET)*, 26-28 Mart 2012 Hammamet-Tunus, Xplore, IEEE, 78- 83.
- [23] Stridh, B., 2012, Evaluation of economical benefit of cleaning of soiling and snow in PV plants at three European locations, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp.1448–1451.
- [24] Mohamed, A. O., Hasan, A. (2012). Effect of dust accumulation on performance of photovoltaic solar modules in Sahara environment. *Journal of Basic and applied scientific Research*, 2(11), 11030-11036.
- [25] Kumar E. S., Sarkar B., Behera D., 2013, Soiling and dust impact on the efficiency and the maximum power point in the photovoltaic modules. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(2), 1-7.
- [26] Ndiaye A., Kébé C. M. F., Ndiaye P.A., Charki A., Kobi A., Sambou V., 2013, Impact of dust on the photovoltaic (pv) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment: The case of Senegal, *International Journal of Physical Sciences*, 8(21), 1166-1173.
- [27] Appels, R., Lefevre, B., Herteleer, B., Goverde, H., Beerten, A., Paesen, R., Medts, K.D., Driesen, J., Poortmans, J., 2013, Effect of soiling on photovoltaic modules, *Solar Energy*, 96, 283-291.
- [28] Gostein, M., Caron, J.R. & Littmann, B., 2014, Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014*, pp.885–890.
- [29] Rao A., Pillai R., Mani M., Ramamurthy P., 2014, Influence of dust deposition on photovoltaic module performance. *Energy Procedia*, 54, 690- 70.

- [30] Ghazi, S., Sayigh, A., Ip K., 2014, Dust effect on flat surfaces – A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33 (2014), 742–751.
- [31] Anto, R., & Jose, J. (2014, July). Performance analysis of a 100kW solar photovoltaic power plant. In *2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)* (pp. 1-4). IEEE.
- [32] Ghazi, S., Sayigh, A., & Ip, K. (2014). Dust effect on flat surfaces–A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 742-751.
- [33] Mazumder, M. K., Sharma, R., Biris, A. S., Zhang, J., Calle, C., & Zahn, M. (2007). Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices. *Particulate Science and Technology*, 25(1), 5-20.
- [34] Rao A., Pillai R., Mani M., Ramamurthy P., 2014, Influence of dust deposition on photovoltaic module performance. *Energy Procedia*, 54, 690- 70.
- [35] Kazem, A. A., Chaichan, M. T., Kazem, H. A., 2014, Dust effect on photovoltaic utilization in Iraq: Review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 734– 749.
- [36] Boyle, L., Flinchpaugh, H., Hannigan, M.P., 2015, Natural soiling of photovoltaic cover plates and the impact on transmission, *Renewable Energy*, 77, 166-173.
- [37] Guo, B., Javed, W., Figgis, B. W., & Mirza, T. (2015, March). Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar. In *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [38] Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M. A., Alawadhi, H., 2015, Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41 (2015), 735–744.
- [39] 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.
- [40] Zaihidee, F.M., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., Horan, B., 2016, Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1267-1278.
- [41] Micheli L., Muller M., Kurtz S., Determining the effects of environment and atmospheric parameters on PV field performance, *Photovoltaic Specialists Conference, IEEE 43rd*, 1724-1729, 2016.
- [42] Kazem, H.A., Chaichan, M.T., 2016, Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman, *Solar Energy*, 139, 68- 80.
- [43] Urrejola, E., Antonanzas, J., Ayala, P., Salgado, M., Ramirez-Sagner, G., Cortes, C., Pino, A., Escobar, R., 2016, Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile, *Energy Conversion and Management*, 114, 338-347.
- [44] Genç, G., 2018, Fotovoltaik panellerde gölge ve toz etkisinin analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 75-82.

- [45] Sancar, M.R., 2018, Fotovoltaik panelin performansına etki eden faktörlerin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 34-40.
- [46] Dişli, F. (2018). Fotovoltaik panellerin üzerindeki toz yoğunluğunun görüntü işleme ile tespiti, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 42-53.
- [47] Gürbüz, D., 2018, Kir Ve Tozlanmanın Fotovoltaik Sistem Verimi Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 30-56.
- [48] Sonsuz, O. (2020). Fotovoltaik sistemler için Hatay iklim şartlarında bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul.
- [49] Afonso T.L., Marques A. C., Fuinhas J. A., 2017, Strategies to make renewable energy sources compatible with economic growth, *Energy Strategy Reviews*, 18, 121-128.
- [50] Çıngı, A., 2019, Güneş Enerjisi elektrik santrallerinde kullanılan fotovoltaik panellerin enerji verimliliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kilis, 5-7.
- [51] Ataman, A.R., 2007, Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Ankara.
- [52] Bartık, A., 2018, Türkiye’nin enerji ihtiyacını ve bu ihtiyacın giderilmesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, *Kafkas Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Kars.
- [53] Batı, O., 2013, Türkiye’de sürdürülebilir kalkınma ve yenilenebilir enerji kaynakları, Yayımlanmamış Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İktisat Anabilim Dalı Uluslararası İktisat Bilim Dalı, İstanbul.
- [54] Erdal, L., 2012, Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırımları ve istihdam yaratma potansiyeli, *Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi*, 4(1), 171-181.
- [55] Önal, E. ve Yarbay, R.Z., 2010, Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli ve geleceği, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18, 77-96.
- [56] Akdoğan, D. A., 2018, Yenilenebilir enerjide kamu politikaları ve Türkiye, Yayımlanmamış Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul.
- [57] Akkaya, G. C. ve Uzar, C., 2012, Karbona dayalı finansal gelecek sözleşmeleri ve fiyat gelişimi üzerine bir inceleme, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 32 (1), 67-80.
- [58] Gedik, Ö. T., 2015, Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları ve çevresel etkileri, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [59] Anonim, “TSKB Enerji Görünümü 2021, <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2021.pdf> (10.05.2021).”
- [60] Anonim, “EİAŞ Yük Tevzi Bilgi Sistemi, https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (2 Şubat 2021).”

- [61] Anonim, “TEİAŞ, <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (9 Şubat 2021).”
- [62] Anonim, “TSKB Enerji Görünümü 2020, <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf> (14.01.2021)”.
- [63] Anonim, “Global, S. (2018). Shell Scenarios–Sky: Meeting the goals of the Paris Agreement. Shell Oil Co., <https://www.shell.com/promos/meeting-the-goals-of-the-parisagreement> (03.03.2018).”
- [64] Anonim, “ABD EIA Uluslararası Enerji Görünümü 2019, <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf> (03.06.2021).”
- [65] Varınca, K.B., Varank, G., 2005, Güneş kaynaklı farklı enerji üretim sistemlerinde çevresel etkilerin kıyaslanması ve çözüm önerileri, *Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi*, İçel, 24–25,
- [66] Baş, H.C., 2016, Fotovoltaik sistemlerin performans değerlendirmesi, Bitirme Tezi, Karabük Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük, 4-5,14,48.
- [67] Varınca, K.B., Gönüllü, T., 2006, Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma, UGHEK’2006: I. *Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, ESOGÜ, Eskişehir, 272-273.
- [68] Anonim, “TSKB Enerji Görünümü 2021, <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf> (11.04.2021).”
- [69] Yaman, A., 2014, Nano parçacıklarla katkılanmış mdmo-ppv ve p3ht tabanlı polimer güneş hücreleri, Doktora Tezi, *Van Yüüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, 1-3.
- [70] Anonim, “US. EIA World Energy Outlook 2019, <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf> (17.07.2021).”
- [71] Taşova, M., 2018, Türkiye’nin güneş enerjisi parametre değerleri ve güneş enerjisinden faydalanma olanakları, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7 (3), 9-12.
- [72] Tabak, A., 2018, Karabük şartlarında FV güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve biyogaz hibrit enerji üretim sisteminin potansiyel araştırması ve sistemin optimizasyonu, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 12-15.
- [73] Yavuz, N., 2012, Kadmiyum sülfür (cds) ince filmlerin fotovoltaik hücre uygulamalarında kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 29-31.
- [74] Şen, Z., 2004, Türkiye’nin temiz enerji imkânları, *Mimar ve Mühendis Dergisi*, sayı: 33, 6- 12.
- [75] Şahan, M., Tokat, Ö., & Okur, Y., 2015. Osmaniye’de Günlük Toplam Güneş Işınım Ölçümleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 10(2), 97-105.
- [76] Anonim, “T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (01.02.2021).”

- [77] Haydaroğlu, C., 2017, Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralının performans analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 11-13.
- [78] Anonim, “Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı, 2018 Yılı Bütçe Sunumu, <http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FB> (20.03.2018).”
- [79] Karataş, S., 2009, Türkiye’de yenilenebilir kaynaklar içerisinde rüzgâr ve güneş enerjilerinin yeri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 106-108.
- [80] Öncül, N., 2014, Batman İli Gültepe Mahallesi yeraltı yapısının sismik ve elektrik öz direnç yöntemleri ile incelenmesi, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 4(1), 31-33.
- [81] Durmuş, A., 2017, Batman ili enerji profilinin araştırılması, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2), 165-167.
- [82] Anonim, “T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/72.aspx> (01.02.2021).”
- [83] Özgöçmen, A., 2007, Güneş pilleri kullanarak elektrik üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Türkiye, 10.
- [84] Çelebi, G., 2002, Bina düşey kabuğunda fotovoltaiik panellerin kullanım ilkeleri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (3), 17-33.
- [85] Yaman, A., 2019, Van ili güneş ve hidroelektrik enerji potansiyelleri ve il ekonomisine katkıları, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 243-250.
- [86] Parida B., Iniyar S., Goic R., 2011, A Review of Solar Photovoltaic Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1625–1636.
- [87] Anonim, “Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2009, Dünya’da ve Türkiye’de Güneş Enerjisi Raporu, Ankara. <https://www.dunyaenerji.org-tr/enerji-raporu-2009/> (25.01.2021).”
- [88] Boztepe M., Fotovoltaiik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- [89] Anonim, “Samlex Solar, Solar cell module and array, <https://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cell-module-array.aspx> Erişim tarihi 24.01.2021
- [90] A. George, R. Anto, 2012, Analytical and experimental analysis of optimal tilt angle of solar photovoltaic systems, *In 2012 International Conference on Green Technologies (ICGT)* (pp. 234-239). IEEE.
- [91] Oparaku, O.U., 2002, Assessment of the cost-effectiveness of photovoltaic systems for telecommunications in Nigeria, *International journal of solar energy*, 22, 123-129.
- [92] Arı, M., 2017, Alternatif enerji kaynaklarından güneş enerjisinin günlük hayatta kullanılabilirliği ve güneş enerjisi ile çalışan piknik sepeti tasarımı, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Özel Sayı 1: 163-171.
- [93] Öztürk, H.H., Güneş enerjisinden fotovoltaiik yöntemle elektrik üretiminde güç dönüşüm verimi ve etkili etmenler, *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü*, 01330 Sarıçam/Adana,

- [94] Carstensen, J., Popkirov, G., Bahr, J. and Föll, H., 2003, Cello: An advanced LBIC measurement technique for solar cell local characterization, *Solar Energy Materials and Solar Cell*, 76, 599-611.
- [95] Anonim, "Ecoprogetti, Photovoltaic module structure, <https://ecoprogetti.com/the-structure-of-photovoltaic-module> (26.01.2021)."
- [96] Günday, G., 2010, Polifenilenvinilen (PPV) bazlı konjuge polimerlerle hazırlanan organik fotovoltaiik hücreler, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-7.
- [97] Navruz, T.S., 2008, Arabant yapıllı güneş pillerinde verim optimizasyonu, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 23-28.
- [98] Fraas, L., Partain, L., 2010, Solar Cells And Their Applications, Second Edition, A John Wiley & Sons, Inc. Publication, Hoboken, New Jersey, 2-4
- [99] McKelvey, J.P., 1966, Solid state and semiconductor physics, Harper&Row Ltd., London, pp.512.
- [100] Erkul, A., 2010, Monokristal, polikristal ve amorf-silisyum güneş panellerinin verimliliğinin incelenmesi ve aydınlatma sistemi uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-5.
- [101] Bayrak, F., 2017, Fotovoltaiik panellere bütünleştirilmiş farklı pasif yöntemlerin sistem verimliliğine etkisinin sayısal ve deneysel analizi, Doktora tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 4-5.
- [102] Kantaroğlu F., 2010, Fotovoltaiik sistemler, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği (TTMD)*, 8, 28-34.
- [103] Cengiz M.S., Mamiş, M.S., 2015, Price-Efficiency Relationship for Photovoltaic Systems on a Global Basis, *Int. J. Photoenergy*, Article ID 506101, 12 pages.
- [104] Cengiz, M.S., 2016, Stirling motorlu güneş takip sisteminin tasarımı ve fotovoltaiik panel sistemiyle verim yönünden karşılaştırılması, Doktora tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, 7-9.
- [105] Soyer, G., 2017, Fotovoltaiik panellerde güneş ışınlımı-sıcaklık-akım-gerilim (GISAG) efficiency tables (version 57). *Progress in photovoltaics: research and applications*, 29(1), 3-15.
- [107] Karşlı, A., 2011, Politiyofen ve fulleren içeren organik fotovoltaiik hücrelerin optimum çalışma şartlarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 15-68.
- [108] Yavuz, N., 2012, Kadmiyum sülfür (CdS) ince filmlerin fotovoltaiik hücre uygulamalarında kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 15-16.
- [109] Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L., 1954 A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power, *Journal of Applied Physics*, 25: 676-677.
- [110] Ganesamoorthy R., Sathiyar G., Sakthivel P., 2017, Review: Fullerene based acceptors for efficient bulk heterojunction organic solar cell applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161, 102-148.

- [111] Ömeroğlu, İ., 2020, Işık toplayıcı gruplar ile fonksiyonlandırılmış yeni ftalosiyanınların sentezi ve güneş pili uygulamalarının araştırılması, Doktora tezi, *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 20-35.
- [112] Çolak, Ş.Ç., 2010, Fotovoltaik paneller yardımı ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin maliyet analizi ve gelecekteki projeksiyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 24-29.
- [113] The German Solar Enegy Society, 2005, Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide For Insallers, Architects and Engineers, UK and USA. s. 1-5.
- [114] Boyle, G., 2004, Renewable energy: Power for a sustainable future, 1sted., Oxford University Pres, New York.
- [115] Bilgin, M., 2013, Fotovoltaik panellerin verimine panel yüzey sıcaklığı etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [116] Krokawa K., Komoto K., Vleuten P. and Faiman D., 2003, Energy From the Desert, Earthscan UK and USA.
- [117] Ünal, O., 2006, Güneş pilleri, Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 23-25.
- [118] Reynolds, D.C., Leies, G., Antes, L. L., ve Marburgen, R. E., 1954, “Photovoltaic Effect in Cadmium Sulfide”, *Physical Review*, 96(2), 533.
- [119] Köroğlu, T., 2010, Güneş paneli sistemlerinin tasarımı, *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, Cilt 409, Sayı Temmuz, Sayfa 98-104.
- [120] Kılınç, E., 2019, Polikristal yapıli fotovoltaik panellerin laboratuvar testleri ve fizibilite çalışmaları ile saha uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 62-64.
- [121] Koç, F., 2018, Polikristal tür bir fotovoltaik panelin I-V karakteristiğinin analitik modellenmesi ve deneysel validasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bolu, 12-14.
- [122] Gemicioğlu, A.G., 2011, Türkiye’de enerji verimliliği açısından PV sistemlerin performansının değerlendirilmesinde kullanılabilecek bir yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [123] Cer, S.T, 2015, Gölgeleme bileşeni olarak kullanılan fotovoltaik panellerin enerji etkinliğinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 27-29.
- [124] Pamukçu, T., 2018, Türkiye için fotovoltaik panel performans oranının dış sıcaklık ve güneş radyasyonuna bağıli olarak belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Rize 19-21.
- [125] Sonsuz, O., 2020, Fotovoltaik sistemler için Hatay iklim şartlarında bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, 14-43.
- [126] The German Solar Enegy Society, 2008, Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide For Installers, Architects and Engineers, London; Sterling, VA: Earthscan.

- [127] Anonim, “İnvento Türkiye, İnce Film Güneş Paneli, <http://solar.inventoturkiye.com/a-si-thin-film-solar-panel-a-si-ince-film-gunes-paneli/> (30.01.2021).”
- [128] Kazmerski, L.L., 2006, Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 150, 105–135.
- [129] Bradshaw A.M., Reuter B., Hamacher T., 2013, The potential scarcity of rare elements for the Energiewende, *Green*, 3 (2), 93-111.
- [130] Oktik, Ş., 2001, Güneş-elektrik dönüşümleri fotovoltaik güneş gözeleri ve güç sistemleri, Temiz Enerji Vakfı Yayınları, Ankara.
- [131] Anonim, “GE Energy, 2012, Thin film solar panel 78W, 80W, 83W. http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/solar_power-/cdte_thin_film_solar_module78.jsp (21.03.2012).”
- [132] Kılınç, E., 2019, Polikristal yapıli fotovoltaik panellerin laboratuar testleri ve fizibilite çalışmaları ile saha uygulaması sonuçlarının karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 14-16.
- [133] Benner, J.P. and Kazmerski, L., 1999. Photovoltaics Gaining greater visibility, *IEEE Spectrum*, 36, 9, 34-42.
- [134] Deniz, E., 2013, Güneş enerjisi santrallerinde kayıplar, III. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*, İzmir, 5-6.
- [135] Mavruk, A., “Yüreğir ve Seyhan (Adana) ilçelerinde ana arterlerdeki toz ve gürültü dağılım haritalarının hazırlanması ” , Yüksek Lisans, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana , 1-128 , (2005).
- [136] World Health Organization, 1999, “Hazard prevention and control in the work environment: Airborne dust ”, 14 , (1999).
- [137] Tegen, I., Werner, M., Harrison, S.P., & Kohfeld, K.E. 2004, Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission. *Geophysical research letters*, 31(5).
- [138] Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., & Gill, T.E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of geophysics*, 40(1), 2-1.
- [139] Modanlıoğlu, C., 2013, “Granüler üretim yapan bir işletmede toz probleminin incelenmesi ve örnek bir çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Balıkesir, 3-6.
- [140] Countess, R. J. and Cowherd, C. , Fugitive dust handbook, USA: WRAP, (2006).
- [141] Anonim, “Ors Makine Endüstriyel Havalandırma, <http://mail.orsmakina.com/index.php?dil=tr> Konya, (2009).
- [142] Peker, İ., 1993, “Toz Tutma Sistemleri”, *Çevre Dergisi*, (8),45-49.
- [143] Kaldellis J.K., Kapsali M., 2011, Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements, *Energy*, 36, 5154-5161.

- [144] Qasem, H., Betts, T.R., Müllejans, H., AlBusairi, H., & Gottschalg, R. 2014, Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(2), 218-226.
- [145] Elminir, H.K., Ghitas, A.E., Hamid, R.H., El-Hussainy, F., Beheary, M.M., & Abdel-Moneim, K.M. 2006, Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy conversion and management*, 47(18-19), 3192-3203.
- [146] Appels, R., Lefevre, B., Herteleer, B., Goverde, H., Beerten, A., Paesen, R., & Poortmans, J. 2013, Effect of soiling on photovoltaic modules. *Solar energy*, 96, 283-291.
- [147] Mekhilef, S., Saidur, R., Kamlisarvestani, M., 2012, Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2920–2925
- [148] Detrick, A.; Kimber, A. & Mitchell, L. 2005, Performance Evaluation Standards for Photovoltaic Modules and Systems, *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference*, pp. 1581-1586, ISBN 0-7803-8707-4, Lake Buena Vista, USA, January 2005
- [149] Said Syed A.M., Walwil Husam M., 2014, Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance, *Solar Energy*, 107, 328–337.
- [150] Kalogirou S.A., Agathokleous R., Panayiotou G., 2013, On-site PV characterization and the effect of soiling on their performance. *Energy*, 51(0), 439-446.
- [151] Tanesab J.A., 2018, The effect of dust on the performance of solar photovoltaic module: case studies in Nusa Tenggara Timur, Indonesia and Perth, Western Australia, Doctor of Philosophy of Murdoch University.
- [152] Goossens D., Van Kerschaever E., 1999, Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance, *Solar Energy*, 66 (4):277-89.
- [153] M. Piliougine, J. Carretero, M. Sidrachde-Cardona, D. Montiel, P. Sánchez-Friera, 2008, Comparative analysis of the dust losses in photovoltaic modules with different cover glasses. *Proceedings of 23rd European Solar Energy Conference*, 2008, pp. 2698-2700.
- [154] Anonim, “Güneş Enerjisi Santrallerinde Panel Kirliliği ve Panel Temizliği, Bozkurt N., <https://www.yenienerji.com/teknik/gunes-enerjisi-santrallerinde-panel-kirliligi--ve-panel-temizligi> (13.04.2019).”
- [155] Wirth, G.,T. Weigl, J. Weizenbeck, M. Zehner, M. Schroedter-Homscheidt, and G. Becker., 2009, “Mapping of snow cover periods for yield assessment and dimensioning of PV systems” 24. *European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, Germany.

EKLER

Ek 1. Data logger program komutları

```
'CR1000
'Created by Short Cut (3.0)

'Declare Variables and Units
Public BattV
Public PTemp_C
Public Ruz_Yon
Public Ruz_Hiz
Public Hav_Sic
Public Hav_Nem
Public Glob_Rad
Public SolarkJ
Public Temiz
Public Killi
Public Kirecli
Public Sehirscl

Units BattV=Volts
Units PTemp_C=Deg C
Units Ruz_Yon=degrees
Units Ruz_Hiz=meters/second
Units Hav_Sic=Deg C
Units Hav_Nem=%
Units Glob_Rad=kW/m^2
Units SolarkJ=kJ/m^2
Units Temiz=mV
Units Killi=mV
Units Kirecli=mV
Units Sehirscl=mV

'Define Data Tables
DataTable(Table1,True,-1)
DataInterval(0,5,Min,10)
WindVector (1,Ruz_Hiz,Ruz_Yon,FP2,False,0,0,0)
FieldNames("Ruz_Hiz_S_WVT,Ruz_Yon_D1_WVT,Ruz_Yon_SD1_WVT")
Average(1,Hav_Sic,FP2,False)
Sample(1,Hav_Nem,FP2)
Average(1,Glob_Rad,FP2,False)
Totalize(1,SolarkJ,IEEE4,False)
Average(1,Temiz,FP2,False)
Average(1,Killi,FP2,False)
Average(1,Kirecli,FP2,False)
Average(1,Sehirscl,FP2,False)
Average(1,BattV,FP2,False)
Average(1,PTemp_C,FP2,False)
EndTable

DataTable(Table2,True,-1)
DataInterval(0,1440,Min,10)
Minimum(1,BattV,FP2,False,False)
```

EndTable

'Main Program

BeginProg

'Main Scan

Scan(5,Sec,1,0)

'Default Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'

Battery(BattV)

'Default Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp_C'

PanelTemp(PTemp_C,_60Hz)

'NRG #200P Wind Direction Sensor measurements 'Ruz_Yon'

BrHalf(Ruz_Yon,1,mV2500,1,1,1,2500,True,0,_60Hz,360,0)

If Ruz_Yon>=360 Or Ruz_Yon<0 Then Ruz_Yon=0

'NRG #40 Wind Speed Sensor measurements 'Ruz_Hiz'

PulseCount(Ruz_Hiz,1,1,1,1,0.752,0.38)

If Ruz_Hiz<0.36 Then Ruz_Hiz=0

'HC2S3 (constant power) Temperature & Relative Humidity Sensor measurements

'Hav_Sic' and 'Hav_Nem'

VoltSE(Hav_Sic,1,mV2500,2,0,0,_60Hz,0.1,-40)

VoltSE(Hav_Nem,1,mV2500,3,0,0,_60Hz,0.1,0)

If Hav_Nem>100 And Hav_Nem<103 Then Hav_Nem=100

'CMP3/CMP6/CMP11 Pyranometer measurements 'SolarkJ' and 'Glob_Rad'

VoltDiff(Glob_Rad,1,mV250,3,True,0,_60Hz,1,0)

If Glob_Rad<0 Then Glob_Rad=0

SolarkJ=Glob_Rad*0.295858

Glob_Rad=Glob_Rad*59.1716

'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Temiz'

VoltSE(Temiz,1,mV5000,4,True,0,_50Hz,1,0)

'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Killi'

VoltSE(Killi,1,mV5000,7,True,0,_50Hz,1,0)

'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Kirecli'

VoltSE(Kirecli,1,mV5000,8,True,0,_50Hz,1,0)

'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Sehirscl'

VoltSE(Sehirscl,1,mV5000,9,True,0,_50Hz,1,0)

'Call Data Tables and Store Data

CallTable(Table1)

CallTable(Table2)

NextScan

EndProg

Ek 2. Data logger bağlantı şeması

NRG #200P - Ruz_Yon

CR1000

Signal	1H
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Power	VX1 or EX1

NRG #40 - Ruz_Hiz

CR1000

Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Signal	P1

HC2S3 (CP) - Hav_Sic, Hav_Nem

CR1000

Brown	1L
White	2H
Green	12V
Clear	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Yellow	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Gray	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

CMP3/CMP6/CMP11 - Glob_Rad, SolarkJ

CR1000

White	3H
Black	3L
Clear	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
	3L
Jumper	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

VoltsSE (1) - Temiz

CR1000

Signal	2L
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

VoltsSE (2) - Killi

CR1000

Signal	4H
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

VoltsSE (3) - Kirecli

CR1000

Signal	4L
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

VoltsSE (4) - Sehirscl

CR1000

Signal	5H
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

Ek 3. CR1000 data logger teknik özellikleri

Özellik	CR1000
İşletme sıcaklık aralığı	-55° to +85°C
Maksimum tarama hızı	100 Hz
Hafıza	4 MB
Analog giriş sayısı	16
İletişim/Veri/Depolama portları	1 CS I/O 1 RS-232 1 paralel
Anahtarlı 12 V	1
Dijital portlar	8 I/OS veya 4 RS-232 COM
Giriş gerilimi aralığı	0 ~ ±5 Vdc
Analog gerilim hassasiyeti	± %0.06 (Okunan değer, 0° - 40°C)
Çıkış sinyali aralığı	0 V ~ Uyarım gerilimi
Analog çözünürlük	0.33 µV
A/D Bitleri	13
Güç kaynağı	9.6 to 16 Vdc
Gerçek zamanlı saat hassasiyeti	±3 min. (Her yıl)
Desteklenen protokoller	PakBus, Modbus, DNP3, FTP, HTTP, XML, POP3, SMTP, Telnet, NTCIP, NTP, SDI-12, SDM
Ebat	23.8 x 10.1 x 5.4 cm
Ağırlık	1 Kg

Ek 4. CMP6 Piranometre Teknik Özellikleri

Özellikler	CMP6
Uygulamalar	Meteoroloji istasyonları, Saha testleri
ISO 9060:1990 sınıflandırma	1. Sınıf
Hassasiyet	5 ~ 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Empedans	20 ~ 200 Ω
Çıkış gerilimi	0 to 30 mV (0 ~ 1500 W/m^2 aralığında)
Maksimum işletme ışıması	2000 W/m^2
Tepki süresi (%63)	< 6 s
Tepki süresi (%95)	< 18 s
Spektral aralık (%20)	285 ~ 3000 nm
Spektral aralık (%50)	300 ~ 2800 nm
Uzun vade kararlılığı	< %1 ($\text{W}/\text{m}^2/\text{yıl}$)
Doğrusallık	< %1,5 (100 ~ 1000 W/m^2)
Yön tepkisi (1000 W/m^2 'de 80°'ye kadar)	< 20 W/m^2
Spektral seçicilik	< %3 (350 ~ 1500 nm)
Eğim tepkisi	< %1 (0° ~ 90°, 1000 W/m^2)
Sıcaklık tepkisi	< % 5 (-10 °C ~ +40 °C)
Görüş alanı	180°
Kabarcık seviye hassasiyeti	< 0,2°
Sensör türü	Termo-pil
İşletme sıcaklık aralığı	-40 °C ~ +80 °C
İşletme bağıl nem aralığı	0 ~ %100 RH
Arızalar arasındaki süre	> 10 yıl
Giriş koruma sınıfı	67

Ek 5. HC2S3 sıcaklık ve nem sensörü teknik özellikleri

Genel bilgiler	
Filtre açıklaması	Polietilen (standart), Teflon (opsiyonel)
Akım tüketimi	< 4.3 mA (@ 5 Vdc) < 2.0 mA (@ 12 Vdc)
Gerilim kaynağı	5 ~ 24 Vdc
Başlama zamanı	1,5 s
Maksimum başlama akımı	< 50 mA
Analog çıkışlar	±3 mV
Ebat	15x85 mm (Çap, Uzunluk)
Ağırlık	10 g
Hava sıcaklığı	
Sensör tipi	PT100 RTD, IEC 751 1/3 Class B
Ölçüm aralığı	-40° ~ +60°C (varsayılan) -50° ~ +100°C (mümkün)
Çıkış sinyali aralığı	0 ~ 1 Volt
Hassasiyet	±0,1 °C (standart yapılandırma, 23°C)
Uzun vade kararlılığı	< 0.1 °C/yıl
Sensör zaman sabiti Standart PE filtre	≤ 22 s
Sensör zaman sabiti Opsiyonel teflon filtre	≤ 30 s
Bağıl nem	
Sensör tipi	Rotronic® Higrometre IN-1
Ölçüm aralığı	0 to %100 RH (yoğuşmasız)
Çıkış sinyali aralığı	0 ~ 1 Volt
Hassasiyet	±%0,8 RH (standart yapılandırma, 23°C)
Uzun vade kararlılığı	< %1 RH (her yıl için)
Sensör zaman sabiti Standart PE filtre	≤ 22 s
Sensör zaman sabiti Opsiyonel teflon filtre	≤ 30 s

Ek 6. NRG 40C anemometre teknik özellikleri

Genel bilgiler	
Sensör tipi	3 kupa sensör
Uygulamalar	Rüzgâr kaynağı tayini Meteorolojik çalışmalar Çevresel izleme
Ölçüm aralığı	1 m/s ~ 96 m/s (kaydedilmiş en yüksek değer)
Uyumluluk	Bütün NRG data-loggerlar
Çıkış sinyali	
Sinyal türü	AC sinüs dalgası (frekans hız ile doğrusal değişmektedir)
Transfer fonksiyonu	$m/s = (Hz \times 0,765) + 0,35$
Hassasiyet	0.1 m/s (5 m/s ila 25 m/s hızları arasında)
Kalibrasyon	Her anemometre ayrı ayrı kalibre edilir
Çıkış sinyali aralığı	0 Hz ila 125 Hz (kaydedilmiş en yüksek değer)
Tepki karakteristiği	
Eşik değeri	0,78 m/s
Mesafe sabiti	3.0 m
Atalet momenti	$68 \times 10^{-6} \text{ S-ft}^2$
Rotor tarama çapı	190 mm
Kurulum	
Montaj	13 mm çaplı vidalı pim
Gerekli araçlar	13 mm lokma anahtar, yağ, izolasyon bandı
Çevresel	
İşletme sıcaklık aralığı	-55 °C ~ 60 °C
İşletme nem aralığı	0 ~ %100 RH
Fiziksel	
Bağlantı	4-40 piriç altıgen somun
Ağırlık	0,14 kg
Ebat	81 mm
Materyal	
Kupalar	Tek parça enjeksiyon kalıplı siyah polikarbonat
Gövde	Siyah ABS plastik
Şaft	Sertleştirilmiş berilyum bakır
Rulman	Modifiye teflon
Mıknatıs	Indox 1, 25 mm çap, 13 mm uzunluk, 4 kutuplu
Sarım	4100 tur tek bobin

Ek 7. NRG 200P rüzgâr oku teknik özellikleri

Genel bilgiler	
Sensör tipi	Potansiyometrik sürekli dönüş
Uygulamalar	Rüzgâr kaynağı tayini Meteorolojik çalışmalar Çevresel izleme
Ölçüm aralığı	360° mekanik açı
Uyumluluk	Bütün NRG data-loggerlar
Çıkış sinyali	
Sinyal türü	Potansiyometreden sağlanan DC gerilim, 10 K Ω
Transfer fonksiyonu	Oransal gerilim
Hassasiyet	Potansiyometre doğrusallığı, %1
Ölü bölge	Maksimum 8°, tipik 4°
Çıkış sinyali aralığı	0 V ~ Uyarım gerilimi
Tepki karakteristiği	
Eşik değeri	1 m/s
Güç ihtiyacı	
Gerilim arzı	1 V to 15 V DC
Kurulum	
Montaj	13 mm çaplı vidalı pim
Gerekli araçlar	13 mm lokma anahtar, yağ, izolasyon bandı
Çevresel	
İşletme sıcaklık aralığı	-55 °C ~ 60 °C
İşletme nem aralığı	0 ~ %100 RH
İşletme ömrü	50 milyon devir (2 ~6 yıl)
Fiziksel	
Bağlantı	4-40 piriç altıgen somun
Ağırlık	0,14 kg
Ebat	21x12 cm, 27 cm tarama çapı
Materyal	
Kupalar	UV stabilize enjeksiyon plastik
Gövde	UV stabilize anti-statik plastik
Şaft	Paslanmaz çelik
Rulman	Paslanmaz çelik