MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK ENERJİ SANTRALLERİNDE PANELLERE AİT VERİLERİN UZAKTAN ERİŞİM İLE İZLENMESİ VE KAYIT ALTINA ALINMASI

MUHAMMET ŞAMİL KALAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Beyhan KILIÇ

İSTANBUL, 2023

FOTOVOLTAİK ENERJİ SANTRALLERİNDE PANELLERE AİT VERİLERİN UZAKTAN ERİŞİM İLE İZLENMESİ VE KAYIT ALTINA ALINMASI

MUHAMMET ŞAMİL KALAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Beyhan KILIÇ

İSTANBUL, 2023

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sürecinde desteğini sunan, nazik yaklaşımıyla beni motive eden, bilgi ve birikimini benimle her zaman paylaşan, bakış açımı genişleten tavsiyeleriyle sürekli yanımda olan, lisans eğitimim sürecinde de beraber çalışma onuruna eriştiğim ve üzerimde çok emeği olan danışman hocam Sayın, Prof. Dr. Şafak SAĞLAM'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında sabrı, nezaketi ve geniş hoşgörüsü ile yanımda olup desteğini esirgemeyen, motive ve teşviğiyle sorunları aşmamda her daim katkısını sunan, bilgi ve birikimini benimle sınırsız paylaşarak bana vizyonumu genişletme şansını veren, her zaman şükranla anacağım Sayın, Prof. Dr. Bülent ORAL'a sonsuz teşekkür ederim.

Uygulama noktasında her desteğe ihtiyacım olduğunda beni geri çevirmeyen, arkadaşım Muhammed Fatih Ünal'a çok teşekkür ederim.

Çalışmam süresince ellerinden geldiğince destek sunan Marmara Üniversitesi akademik ve idari personeldeki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez süresince desteklerini esirgemeyip motive edici yaklaşımlarıyla hep yanımda olan annem Emine KALAY ve babam Bayram KALAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET v
ABSTRACT vii
SEMBOLLER ix
KISALTMALAR xi
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
1.1. Giriş 1
1.2. Amaç ve Önem 2
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI 5
2.1. Güneş Enerjisi 5
2.2. Güneş Radyasyonu ve Spektral Özellikleri 5
2.3. Türkiye'de Güneş Enerjisi 8
2.4. Fotovoltaik Paneller 8
2.5. Fotovoltaik Panellerin Üretim Performansı (Karakteristikleri) 10
2.6. Fotovoltaik Panellerde Ölçme ve Kayıt Sistemleri 14
2.6.1. Akım 15
2.6.2. Gerilim 19
2.6.3. Güneş radyasyonu 20
2.6.4. Sıcaklık 22
2.6.5. Diğer parametrelerin ölçülmesi 24

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....25
3.1. Materyal.....25
3.1.1. Akım sensörü.....25
3.1.2. Gerilim sensörü.....26
3.1.3. Fotodiyot.....26
3.1.4. Sıcaklık sensörü.....27
3.1.5. Mikrodenetleyici.....27
3.1.6. Haberleşme modülü.....28
3.1.7. Şarj entegresi ve pil.....29
3.1.8. Kullanılan program ve yazılımlar.....30
3.1.9. Kalibrasyon cihazları.....30
3.1.10. Diğer bileşenler.....31
3.2. Yöntem.....31
3.2.1. Ölçüm devresinin tasarlanması.....31
3.2.1.1 Akım ölçümü.....31
3.2.1.2 Gerilim ölçümü.....32
3.2.1.3 Sıcaklık ölçümü.....33
3.2.1.4 Güneş radyasyonu ölçümü.....33
3.2.1.5 PCB tasarım ve dizgisinin yapılması.....35
3.2.1.6 Ölçüm devresi yazılımının geliştirmesi.....40
3.2.1.7 Ölçüm devresinin fotovoltaik panele entegrasyonu.....41
3.2.2. Merkezi kayıt biriminin tasarlanması.....44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....49
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....55
KAYNAKLAR.....57

EKLER 79

ÖZET

FOTOVOLTAİK ENERJİ SANTRALLERİNDE PANELLERE AİT VERİLERİN UZAKTAN ERİŞİM İLE İZLENMESİ VE KAYIT ALTINA ALINMASI

Fotovoltaik enerji santrallerinde birbirlerine seri veya paralel şekilde bağlanan panellerin ürettiği enerji, dizi şeklinde yapılan bağlantılar ile ölçülerek kayıt altına alınmaktadır. Bu bağlantı şeklinde, bir dizideki tüm panellere ait akım, gerilim, yüzey sıcaklık değerleri ve fotovoltaik panel üzerine düşen güneş radyasyonu gibi değerler her bir panele ait olacak şekilde ayrı ayrı takip edilememektedir. Oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda, üretim performansı düşen fotovoltaik dizideki arızalı paneli bulmak, fazla iş gücü ve vakit gerektirmektedir.

Bu tez çalışması, fotovoltaik panellerin üretim performanslarının ölçülmesi ve uzaktan izlenebilmesini sağlayan bir sistemin tasarlanması ve geliştirilmesine dayanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelenerek, bu çalışmalardan farklı olarak fotovoltaik dizilerin değil, her bir panelin verilerinin izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, birbirine seri ve paralel şekilde bağlı fotovoltaik panellerin herhangi birinde meydana gelebilecek muhtemel kırık, çatlak, gölgelenme veya kirlenme gibi enerji üretimini olumsuz etkileyecek durumların hangi panelde meydana geldiğinin bulunması mümkün olacaktır. Problemin meydana geldiği panelin bulunma süresi kısalacak ve daha az iş gücü gerektirecektir.

Birinci bölümde tez çalışmasına giriş yapılmış, enerji ve yenilenebilir enerji konunun önemi yenilenebilir enerjinin önemine değinilerek, konunun fotovoltaik santraller açısından önemi vurgulanmıştır ve tezin amacı belirtilmiştir.

İkinci bölümde ise güneş enerjisi, güneş radyasyonu ve Türkiye'deki güneş enerjisi potansiyeli ifade edildikten sonra fotovoltaik paneller hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Fotovoltaik panellerin üretim performanslarının (karakteristiklerinin) incelendiği bu bölümde geniş bir literatür taramasına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan materyallere ait bilgilere yer verilmiştir. Tez çalışmasında uygulanan yöntem ayrıntıları ile anlatılmıştır. Çalışmanın geliştirme

aşamaları da ayrı ayrı başlıklarda açıklanarak, ilgili görseller ile sunulmuştur.

Bulguların sunulduğu ve tartışma bölümüne yer verilen dördüncü bölümde, geliştirilen ölçme sisteminin ölçüm ve test sonuçları anlatılmıştır.

Beşinci bölümünde, tez çalışmasından elde edilen kazanımlar ve çalışmanın sağlayacağı katkıya değinilmiştir. Bu bölümde ayrıca yapılacak çalışmalara yönelik önerilere de yer verilmiştir.

ABSTRACT

MONITORING AND RECORDING PANEL DATA BY REMOTE ACCESS IN PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Panels are connected in series or parallel to each other in photovoltaic power plants. The energy produced by these panels is measured and recorded with the connections made in the form of a series. In this connection type, values such as current, voltage, surface temperature values of all panels in a series and solar radiation falling on the PV panel cannot be followed separately for each panel. Finding the defective panel in the photovoltaic array, in case of any malfunction that may occur, requires a lot of labor and time.

This thesis is based on the design and development of a system that enables the measurement and remote monitoring of the production performance of photovoltaic panels. The studies in the literature are examined. Unlike these studies, the data of each panel was monitored, not the photovoltaic arrays. In this way, it will be possible to find out the situations on panel level that will adversely affect energy production. The time to find the panel where the problem occurs will be shortened and will require less labor.

In the first chapter, the thesis study is introduced, the importance of energy and renewable energy is emphasized, the importance of the subject in terms of photovoltaic power plants was emphasized and the purpose of the thesis is stated.

In the second part, after mentioning solar energy, solar radiation, and the solar energy potential in Turkey, detailed information about photovoltaic panels is given. In this section, an extensive literature review is included.

In the third section, information about the materials used in the study is given. The method applied in the thesis study is explained in detail. The development stages of the study are also explained under separate headings and presented with related visuals.

In the fourth section, where the findings are presented and the discussion section is included, the measurement and test results of the developed measurement system are explained.

In the fifth part, the gains obtained from the thesis study and the contribution of the study are mentioned. This section also includes recommendations for future work.

SEMBOLLER

K : Kelvin

EJ : Exajoule

GW : Giga Watt

W : Watt

ºC : Santigrat Derece

g : gram

V_{oc} : Açık-devre Gerilimi

I_{sc} : Kısa-devre Akımı

V_{max} : Maksimum Güç Gerilimi

I_{max} : Maksimum Güç Akımı

P_{max} : Maksimum Güç

E :Radyasyon

T : Sıcaklık

I_{ref} : Standart Test Koşulları'ndaki fotovoltaik hücre akımı

E_{ref} : Standart ışınım değeri

T_{ref} : Standart Sıcaklık Değeri

μ_1 : Kısa devre akımındaki sıcaklık katsayısı

TC :Sıcaklık katsayısı

β : Gerilim mutlak sıcaklık katsayısı

α : Akım mutlak sıcaklık katsayısı

T_{mod} : Panel Sıcaklığı

T_{amb} : Ortam sıcaklığı

k : Ross katsayısı

G_{mod} : Panel üzerine düşen radyasyon

Si : Silisyum

mV : mili Volt

kA : kilo Amper

Hz : Hertz

Nm : Nano Metre

µV : Mikro Volt

µs : Mikro saniye

s : Saniye

µF : Mikro Farad

MHz : Mega Hertz

kHz : Kilo Hertz

kΩ : kilo ohm

km : kilo metre

ppm : milyonda bir birim (parts per million)

D : Dağınık Radyasyon

G : Küresel Güneş Radyasyonu

B : Doğrudan Normal Radyasyon

$\mathbf{I_{ph}}$: Fotodiyot Akımı

$\mathbf{I_t}$: Fotovoltaik Hücre Çıkış Akımı

$\mathbf{I_o}$: Doyma Akımı

$\mathbf{R_{ser}}$: Seri Direnç

$\mathbf{V_t}$: Fotovoltaik Hücrenin Çıkış Gerilimi

$\mathbf{m^2}$: metrekare

m : Diyot idealite faktörü

KISALTMALAR

IEA : Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
FV : Fotovoltaik
MJ : Çok eklemli (Multi Junction)
IEC :Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
AC :Alternatif akım
DC : Doğru akım
WMO : Dünya Meteoroloji Örgütü
WRR : Dünya Radyometrik Referansı
XPS : Termal yalıtım malzemesi
MPN : Üretici Parça Numarası
BoM : Malzeme Listesi (Bill of Materials)
GND : Referans noktası
PCB : Baskı devre kartı
IoT : Nesnelerin İnterneti
BMS : Batarya Yönetim Sistemi
Li-Po : Lityum Polimer
Li-Ion : Lityum İyon
SPI : Seri Çevre Birimi Arayüzü
MKB : Merkezi Kayıt Birimi
SD : Dijital güvenlik (Secure Digital)
HEAS : Hall etkili akım sensörü
AM : Hava Kütlesi (Air Mass)
tep : Ton Petrol Eşdeğeri
EVA : Etilen Vinil Asetat
STC : Standart Test Koşulları
ADC : Analog Dijital Çevirici (Analog Digital Converter)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1 Ortalama Elektrik Üretim Maliyetlerinde Yıldan Yıla Artış (Seçilen Ülke ve Bölgeye Göre, 2022) 1
Şekil 2. 1 Güneş Radyasyonu Bileşenlerinin Gösterimi 6
Şekil 2. 2 Spektral Işınım Grafiği (a) ve Spektral Işınım Şematiği (b) 7
Şekil 2. 3 Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası 8
Şekil 2. 4 Güneş Hücresinin Çalışma Prensibi 9
Şekil 2. 5 Fotovoltaik Panelin Genel Yapısı 10
Şekil 2. 6 Kyocera KC175GHT-2 Model Fotovoltaik Panelin Sabit Güneş Radyasyonu ve T=25 °C'de I-V ve P-V Eğrileri 10
Şekil 2. 7 Bir Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyot Eşdeğer Devresi 11
Şekil 2. 8 İdeal Güneş Pilinin 0 İle 75 ºC Arasında P-V Karakteristik Eğrisi 13
Şekil 2. 9 IEC 61724-1'e Göre Ölçülecek Parametreler 15
Şekil 2. 10 Şönt Direnç, Alçak Geçiren Filtre ve INA210 ile Akım Ölçümü (a) ve Şönt Direncin Yandan Görünümü (b). 16
Şekil 2. 11 Akım Trafosunun Basit Devre Şeması. 18
Şekil 2. 12 Gerilim Bölücü Direnç Devresi. 19
Şekil 2. 13 Termofil Piranometre (a), Silikon Piranometre (b) 21
Şekil 2. 14 Fotodiyot Güneş Radyasyonu Ölçüm Devresi 22
Şekil 2. 15 DS Sensörü (DS18B20), Yanal Yalıtım Kalınlığı 3 mm (a) ve 10 mm (b) Olan Bir XPS Bloğu ile Kaplıdır. 23
Şekil 3. 1 Kullanılan Akım Sensörü Entegresi. 26
Şekil 3. 2 Güneş Radyasyonu Ölçümü İçin Kullanılan BPW34 Model Fotodiyot 27
Şekil 3. 3 DS18B20 Dış Ortam Sıcaklık Sensörü 27
Şekil 3. 4 ESP32-WROOM-32E Model Mikrodenetleyici 28
Şekil 3. 5 LoRa SX 1278 Kablosuz Haberleşme Modülü (a) ve 433 MHz Anten (b) 29
Şekil 3. 6 Lityum Polimer 3,7 V Pil. 29
Şekil 3. 7 Ölçümleri Kalibre Etmek İçin Kullanılan UNI-T UT804 Model Multimetre (a) ve KIMO CR -100 Model Piranometre (b) 30
Şekil 3. 8 Akım Sensörü Devre Bağlantı Şematiği 32
Şekil 3. 9 Gerilim Bölücü Devre Şematiği 33
Şekil 3. 10 BPW34 Fotodiyotu ile Güneş Radyasyonu Ölçülen Devrenin Şematiği 34
Şekil 3. 11 Ölçüm Devresi Blok Diyagramı 35
Şekil 3. 12 Ölçme Devresi Mikrodenetleyicisinin Şematik Tasarımı 36
Şekil 3. 13 PCB Tasarımın Altium Üzerindeki Ön Yüzü (a) ve Arka Yüzünün (b) Görüntüsü. 37

Şekil 3. 14 PCB Tasarımınn Üç Boyutlu Üst Yüzü (a) ve Alt Yüzü (b) Görüntüsü.....38
Şekil 3. 15 Baskı Sonrası PCB'lerin Ön Yüzü (a) ve Arka Yüzü (b).....38
Şekil 3. 16 Bağlantı Noktaları Üzerine Lehimin Eritilmesi (a) ve Komponentlerin Yerleştirilmesi (b) 39
Şekil 3. 17 Dizgi İşlemi Tamamlanan Ölçüm Kartı. 40
Şekil 3. 18 Panel Uçlarına Bağlanmak Üzere Tasarlanan Alüminyum Dirençlerden Oluşan Yük. 42
Şekil 3. 19 Geliştirilen Ölçüm Sisteminin KY-395M-72F-GB Model Panel Üzerine Kurulumuş Hali.....42
Şekil 3. 20 Sıcaklık Sensörünün Panelin Arka Tarafına Yapıştırılması. 43
Şekil 3. 21 Fotodiyotun Panel Üzerindeki Yerleşimi 43
Şekil 3. 22 MKB'de Excel Dokümanına Kaydedilen Ölçüm Verilerinin Görüntüsü 44
Şekil 3. 23 Thingspeak Platformu Üzerinden İzlenebilen Panel Akımı, Panel Gerilimi, Panel Sıcaklığı ve Güneş Radyasyonu Grafikleri. 45
Şekil 3. 24 ThingView Mobil Uygulamasında Panel Verilerine Ait Grafiklerin Genel Görünümü (a) ve Panel Gerilim Grafiğine Ait Görünüm 46
Şekil 3. 25 ThinView Uygulamasında Belli Bir Ölçüm Verisine Ait Detaylara Bakıldığı Ekran Görüntüsü ...47
Şekil 3. 26 TeamViewer Üzerinden, MKB'ye Uzaktan Erişim İle Yazılım Güncellemesi Ve Dosya Transferi Yapıldığı Ekran Görüntüsü.....48
Şekil 4. 1 31.12.2022 ve 01.01.2023 Tarihlerinde Ölçülen Akım ve Gerilim Değerlerinin Zamana Bağlı Grafikleri 49
Şekil 4. 2 31.12.2022 ve 01.01.2023 Tarihlerinde Fotodiyot İle Ölçülen Güneş Radyasyonu Grafiği.....50
Şekil 4. 3 31.12.2022 ve 01.01.2023 Tarihlerinde Panelin Arka Yüzünden Yapılan Sıcaklık Ölçümleri. 51
Şekil 4. 4 Li-Po Batarya Gerilimi Ve Şarj Durumunu Gösteren Grafik.....52

TABLO LİSTESİ

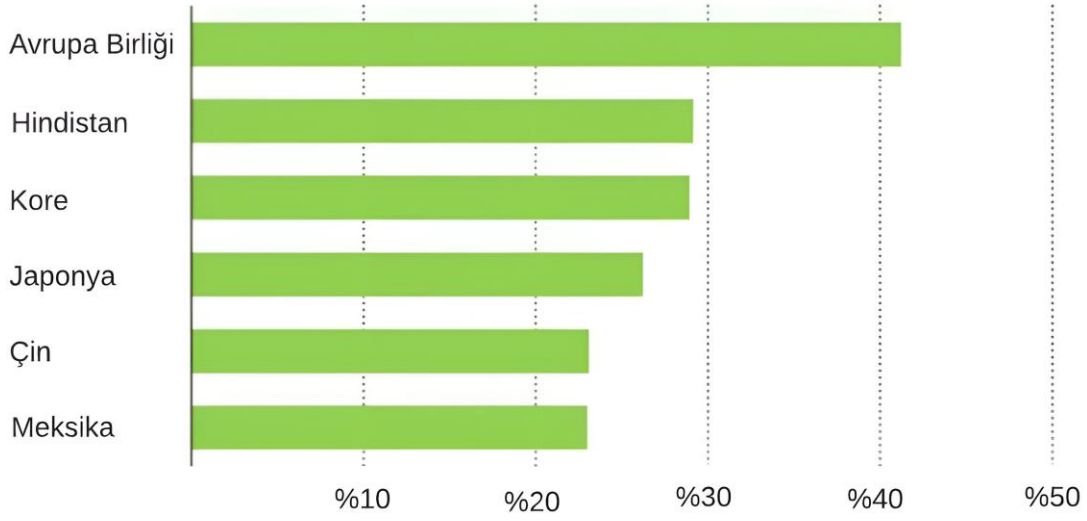
Tablo 2. 1 Üreticiler Tarafından Sağlanan FV Panel Parametreleri. 12
Tablo 2. 2 Ortalama Sıcaklık Katsayıları 13
Tablo 2. 3 Akım Sensörlerinin Performans Karşılaştırması 19
Tablo 2. 4 Termofil ve Silikon Piranometrelerin Özel Performans Göstergeleri. 21
Tablo 3. 1 TMCS1107A2U-Q1 Model Akım Sensörünün Özel Performans Göstergeleri 26
Tablo 4. 1 Ölçüm Devresi Güç Tüketim Tablosu 52
Tablo 4. 2 Ölçüm Devresi Maliyet Tablosu 53

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

Enerji, herhangi bir ülkenin sosyal ve ekonomik kalkınması için temel faktördür. Endüstriyel faaliyetlerin yaygınlaşmasıyla birlikte enerji ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır.

Yüksek yakıt maliyetleri, enflasyonist baskılar ve tedarik zinciri darboğazları, enerji sektörünün net sıfıra dönüşümünü hızlandırma amacı ve Rusya'nın Ukrayna'yı işgali, enerji yatırımcıları için güçlü bir teşvik oluşturmaktadır [1]. Ortalama elektrik üretim maliyetlerinde ortaya çıkan 2022 yılına ait artış Şekil 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1. 1 Ortalama elektrik üretim maliyetlerinde yıldan yıla artış (seçilen ülke ve bölgeye göre, 2022) [2]

Küresel enerji talebi neredeyse her gün artmakta ve bu da bir enerji krizi ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Fosil yakıtlardan elde edilen enerji, kaynakların sınırlı olması ve çevresel etkileri nedeniyle sürdürülemez durumdadır. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının neden olduğu kirletici emisyonlar nedeniyle küresel ortam sıcaklığının 2050 yılına kadar yaklaşık 2 °C artması beklenmektedir [3]. Küresel ölçekte etkili olan bu gibi geri dönüşümsüz zararlar nedeni ile çevre dostu ve sürdürülebilir alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyaç artmıştır [4]. Yenilenebilir enerji sistemleri, artan enerji talebini karşılamak ve küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevre sorunlarını önlemek için fosil yakıta dayalı enerji üretim sistemlerine bir alternatiftir.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Temmuz 2022 raporunda, yeni kurulumlar sayesinde

küresel yenilenebilir enerji üretiminin 2022'de %10'dan fazla büyüyeceğini ve yenilenebilir kaynakların talep artışından daha hızlı artarak fosil yakıtların yerini alacağı öngörülmektedir[5]. Dünya çapında 2021 yılında toplam 257 GW yenilenebilir enerji kurulumu yapılmıştır. Küresel fotovoltaik (FV) güç kapasitesi ise 133 GW'dan fazla artarak 843 GW'a yükselmiş ve yeni kurulan yenilenebilir enerji tesislerinin yarısından fazlasını oluşturmuştur [6]. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim maliyeti geleneksel enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında daha düşüktür [7].

1.2. Amaç ve Önem

Dünya çapında kurulumu yapılan güneş enerjisi santrallerinin kapasitesinin son on yılda ikiye katlanması, FV enerji santrallerini çok önemli hale getirmiştir. Enerji verimliliği ve ekonomik kazanç da göz önünde bulundurulduğunda FV santrallerde bakım ve işletme faaliyetleri de büyük önem arz etmektedir. Herhangi bir paneldeki arıza, elektrik enerjisi üretimini azaltabilir veya tüm tesisin enerji üretimini kesintiye uğratabilir. Bu da hem verimlilikte hem de gelirde önemli kayıplara neden olur. Çok sayıda FV panelin bulunduğu FV santrallerde bir arızaya mümkün olan en kısa sürede müdahale etmek kritik öneme sahiptir. FV tesis operatörünün potansiyel arızalara tepki verme yeteneği, arızalı panellerin hızlı tespiti ile doğrudan ilişkilidir.

FV enerji santrallerinde birbirlerine seri veya paralel şekilde bağlanan panellerin ürettiği enerji, dizi şeklinde yapılan bağlantılar ile ölçülerek kayıt altına alınmaktadır. Bu bağlantı şeklinde, bir dizideki tüm panellere ait akım, gerilim, yüzey sıcaklık değerleri ve FV panel üzerine düşen güneş radyasyonu gibi değerler her bir panele ait olacak şekilde ayrı ayrı takip edilememektedir. Dolayısıyla FV panellerin herhangi birinde meydana gelebilecek muhtemel kırık, çatlak, gölgelenme veya kirlenme etkisi ile kısmi olarak enerji üretimlerinin azalması durumunda bunun hangi FV panelde meydana geldiğinin bulunması mümkün olmamaktadır. Problemin meydana geldiği FV panelin bulunması çok uzun zaman alan ve fazla işgücü gerektiren bir hal almaktadır.

Bu tez çalışması ile amaçlanan, her bir FV panelin arka tarafındaki bağlantı kutusunun yanına yerleştirilebilecek bir ölçü aleti tasarlamaktır. Bu tasarlanan ölçü aleti ile FV panelin ürettiği akım, gerilim, panelin yüzey sıcaklığı ve yüzeyine gelen güneş radyasyon değeri ölçülecektir. Bu ölçüm verileri bir verici aracılığı ile kablosuz olarak merkezi bir kayıt birimine gönderilecektir. Her bir kayıt cihazına, o cihaza özel bir dijital kimlik

verilerek her bir FV panelden gelen ölçüm sonuçlarının birbirine karışmadan kayıt altına alınması sağlanacaktır. Tasarlanan ölçü aleti, çalışması için ihtiyaç duyduğu enerjiyi üzerindeki şarj edilebilir pilden sağlayacaktır. Şarj edilebilir pil, kendisini FV panelden basit bir şarj devresi ile şarj edecektir. Ölçü aleti tasarlanırken minimum enerji tüketimini sağlayacak şekilde devre tasarımı yapılacak, böylece FV panelin ürettiği elektrik enerjisinde minimum kaybın meydana gelmesi sağlanacaktır. Merkezi kayıt birimi, kendisine ulaşan bilgilerin hem kendi üzerinde kayıt altına alınmasını sağlayacak hem de ağ üzerinden, oluşturulacak yazılım aracılığıyla bilgisayar ile uzaktan izlenmesini sağlayacaktır. Oluşturulacak sistem ile her bir FV panele ait bahsedilen verilerin uzaktan izlenimi sağlanacak, bu sayede her bir FV panelin anlık çalışma durumu görüntülenebilecektir. Herhangi bir arıza meydana gelmesi durumunda ise zaman kaybı ve dolayısıyla daha fazla üretim kaybı olmaksızın direkt olarak arızanın meydana geldiği FV panele müdahale edilebilecektir. Ölçme cihazının enerjisinin şarjlı pil ve FV panellerden sağlanması ile ölçme cihazı için ek bakım gereksinimlerinin minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulacak sistem ile FV enerji santrallerindeki üretim veriminin arttırılması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, tez konusu ile alakalı terimler açıklanmış ve çeşitli bilgilere yer verilmiştir. Güneş enerjisi, güneş radyasyonu ve spektral özelliklerinin yanı sıra Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelinden ve güneş enerjisi yatırımlarından bahsedilmiştir. FV panellerin yapısı ve performans kriterlerinin de üzerinde durulmuştur.

Kapsamlı bir literatür araştırması sonucu, gerçekleştirilen benzer FV veri toplama ve izleme sistemleri detaylarıyla anlatılmıştır. Bu bölümde, FV panellerde izleme ile alakalı uluslararası standartlardan da bahsedilmiştir. Literatür çalışmaları anlatılırken, geliştirilen sistemde ölçülen veriler ve ölçüm yöntemleri üzerinde durulmuştur.

2.1. Güneş Enerjisi

Dünya için büyük ve teorik olarak tükenmez enerji kaynağı olan güneş, bir saniyede insanların, zamanın başlangıcından beri kullandığından daha fazla enerji yayar [8]. Dünya'ya yılda yaklaşık 4 milyon exajoule (1 EJ = 10^{18}J) güneş enerjisi ulaşmaktadır, bunun yaklaşık 5 × 10^4 EJ'sinin kolayca dönüştürülebilir olduğu belirtilmektedir [9]. Güneş'in yüzey sıcaklığının yaklaşık 6000 K olduğu hesaplanmıştır [10].

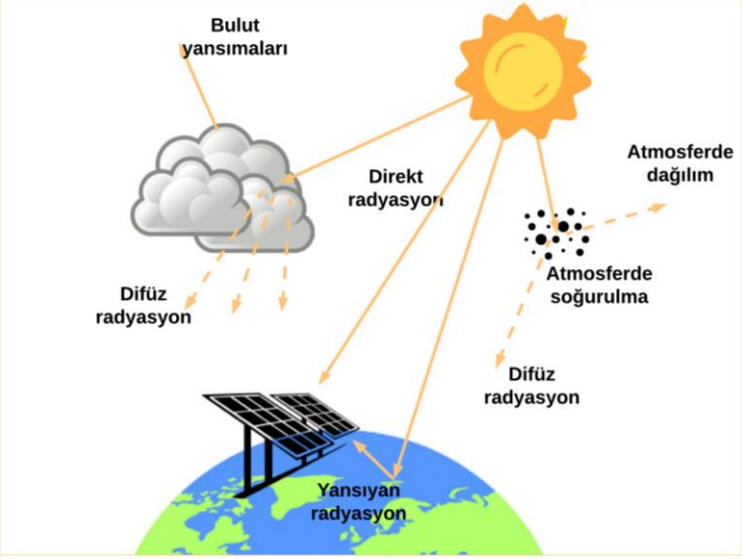
Güneş enerjisi endüstrisi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla kullanılabilirlik, maliyet, erişilebilirlik, kapasite, verimlilik ve sessiz çalışma açısından üstün olduğu için gelecekteki enerji talebini karşılamak için en iyi seçeneklerden birisi olacaktır [11]. Bugüne kadar güneş enerjisinin endüstriyel amaçlarla kullanılması için güneş kolektörleri, güneş takip cihazları ve dev aynalar vasıtasıyla elde edilmesi için birçok yöntem kullanılmıştır. Endüstrideki güneş enerjisi uygulamaları iki ana kategoriye ayrılır: güneş termal ve fotovoltaik. En yaygın uygulamalardan bazıları sıcak su, buhar, kurutma ve dehidrasyon işlemleri, ön ısıtma, konsantrasyon, pastörizasyon, sterilizasyon, yıkama, temizleme, kimyasal reaksiyonlar, endüstriyel alan ısıtma, gıda, plastik, bina ve tekstil endüstrisidir [12].

2.2. Güneş Radyasyonu ve Spektral Özellikleri

Güneş tarafından yayılan elektromanyetik radyasyona güneş radyasyonu denir ve birimi W/m^2 ile gösterilir [13]. Güneş radyasyonu, Dünya üzerinde en yaygın olarak bulunan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisinin yılda yaklaşık 130.000 Gtep (tep = ton petrol eşdeğeri) olduğu tahmin edilmektedir [14]. Güneş

radyasyonu, FV, termal güneş sistemleri ve pasif güneş sistemleri için en önemli girdi parametresidir [15]. Dünya atmosferi dışındaki radyasyonun, Güneş ile Dünya arasındaki mesafeye bağlı olarak ±%3-4'lük bir değişimle 1366,1 W/m^2 olduğu bilinmektedir [16]. Bu radyasyonun sadece %70'i yeryüzüne ulaşabilmektedir [17]. Dağılım ve emilim sonucu, açık güneşli bir günde, öğle saatlerinde ve deniz seviyesinde, güneş radyasyonu değeri yaklaşık 996-1000 W/m^2'lik bir yoğunluğa sahiptir [18]. Yer seviyesindeki güneş radyasyonu üç farklı bileşenden oluşur: doğrudan (ışın), dağınık ve yansıyan (albedo) güneş radyasyonu [19,20]. Şekil 2.1 güneş radyasyonunun bileşenlerini göstermektedir [21]. Dünya yüzeyine doğrudan ulaşan radyasyona direkt radyasyon, atmosferin güneş ışınlarının saçılma nedeniyle yolunu değiştirmesinden sonra yüzeyde toplanan radyasyona ise difüz radyasyon denir [19,21,22]. Havadaki moleküllerin, kirleticilerin veya bulutların sayısı, yayılan radyasyon miktarını etkiler [16]. Yansıyan radyasyon, Dünya yüzeyinden yansıyan güneş radyasyonunun bileşenidir. Yüzeyin yapısı ve durumu, yansıyan radyasyonu önemli ölçüde etkiler [19]. Doğrudan, yayılan ve yansıyan güneş radyasyonunun toplamı, toplam güneş radyasyonu değerini verir [21,23]. Literatürdeki bazı çalışmalarda [22], yansıyan radyasyon diffüz radyasyon kapsamında değerlendirilmiştir. Gün doğumundan gün batımına kadar olan küresel güneş radyasyonu (G), Denklem 2.1'deki gibi hesaplanabilir, burada B doğrudan normal radyasyondur, D dağınık radyasyondur ve α güneş zenit açısıdır [24–26].

$$G = B\,cos\alpha + D \tag{2.1}$$

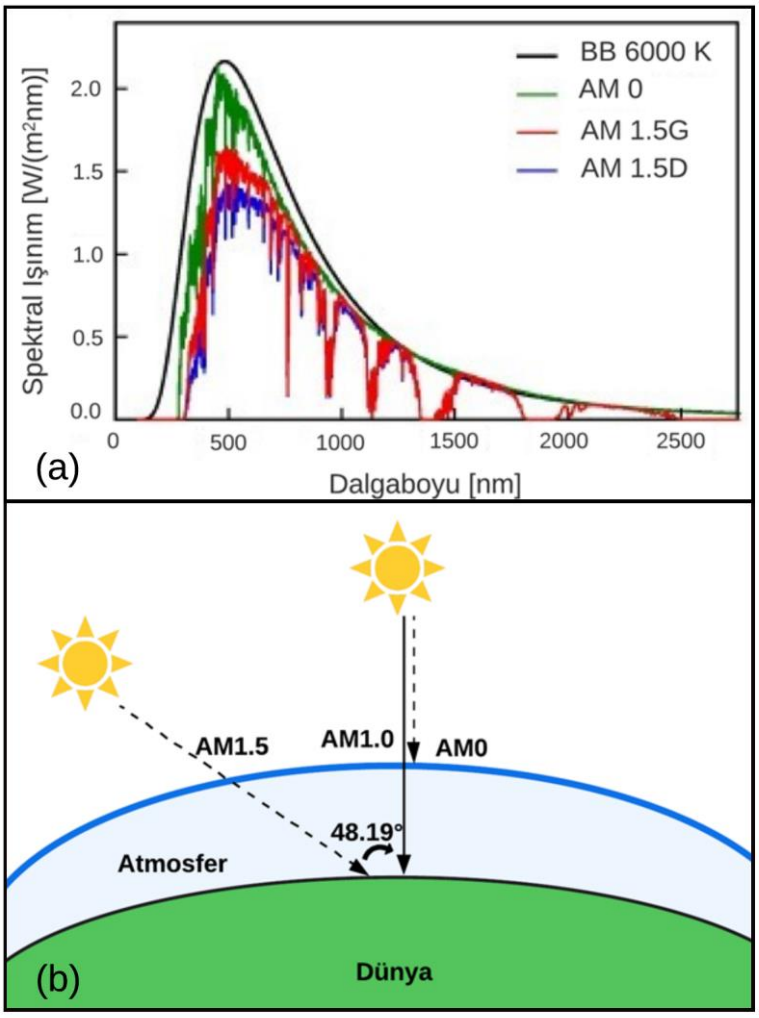


Şekil 2. 1 Güneş radyasyonu bileşenlerinin gösterimi [21]

Dünyadaki güneş spektrumu, ASTM G173-03 standardında iki karasal spektral radyasyon dağılımını tanımlayan Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM Uluslararası Standardı) tarafından tanımlanmaktadır.

AM 1.5D spektrumu, yalnızca direkt güneş radyasyonundan oluştuğu için, aynalar veya lensler ile ışık konsantrasyonuna dayalı güneş dönüşüm sistemleri için daha uygundur. AM 1.5G spektrumu ise atmosferden saçılan ışığı da içerir ve ışık konsantrasyonu olmayan FV sistemleri için uygundur [27]. Her iki karasal güneş spektral radyasyon dağılımı, dünya atmosferinin hemen dışında dünya dışı radyasyon dağılımı AM 0 ile birlikte Şekil 2.2'de gösterilmektedir; burada AM, (Air Mass) hava kütlesinin kısaltmasıdır ve Denklem 2.2 ile belirlenmektedir.

$$\mathbf{AM} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Cos\theta}} \tag{2.2}$$

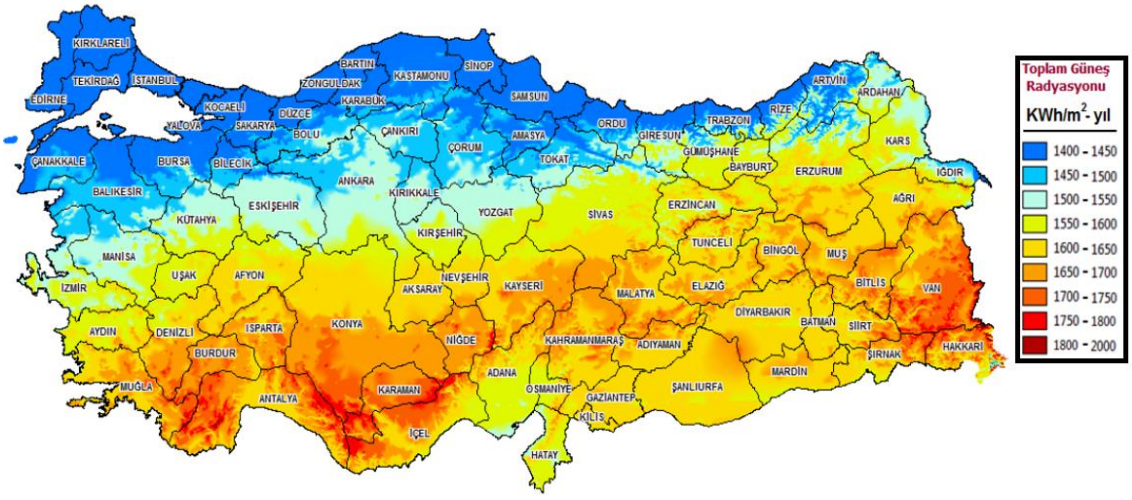


Şekil 2. 2 Spektral ışınım grafiği (a) ve spektral ışınım şematiği (b) [28]

2.3. Türkiye'de Güneş Enerjisi

Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye'nin, enerji talebinde çok hızlı artış görülmektedir. Enerji ihtiyacını karşılamak için ithal fosil yakıtlara bağımlı olan Türkiye'de, mevcut enerji politikası bu bağımlılığı azaltmak üzerine kuruludur. Güneş ve rüzgar enerjisi enerji bağımlılığını azaltma konusunda önemlidir [29].

Türkiye coğrafi olarak, 36°- 42° Kuzey paralelleri, 26°- 45° Doğu meridyenleri arasında yer almaktadır. Türkiye'nin coğrafi konumu, güneş enerjisi potansiyeli açısından oldukça avantajlıdır. Türkiye'nin yıllık 2737 saat güneş radyasyonu süresi (günde ortalama 7,5 saat) sahip olması ve yıllık 1527 kWh/m^2 (günlük ortalama 4,2 kWh/m^2) güneş enerjisi aldığı bilinmektedir [29,30]. Şekil 2.3'te Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli haritası verilmiştir.



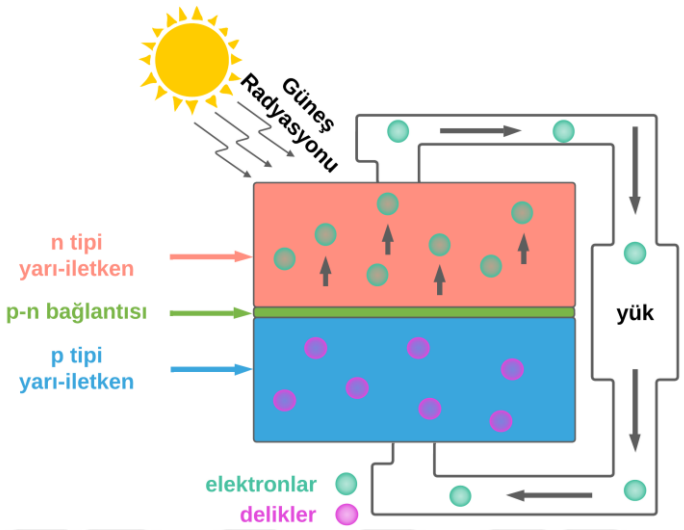
Şekil 2. 3 Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası [31]

Türkiye'de 2022 yılı Kasım ayı itibariyle mevcut güneş enerjisi kurulu gücü 9.319 MW'tır [32]. Halihazırda kurulu gücün arttırılmasına yönelik projeler yürütülmektedir. Konya'nın Karapınar ilçesinde yapımı devam eden ve tamamlandığında Türkiye'nin en büyük güneş enerjisi santrali olması planlanan tesiste iki yıl içerisinde 1.000 MW'lık kurulu güce ulaşılması hedeflenmektedir [33].

2.4. Fotovoltaik Paneller

Fotovoltaik teknolojisi, güneş radyasyonunu elektrik enerjisine dönüştüren teknolojidir [34,35]. Güneşten gelen fotonlar güneş pilinin katkılı yarı iletken malzemesine çarptığında, p-tipi taraftan kopan elektronlar hareket eder ve n-tipi tarafa geçer. Bu akış,

fotonlar güneşten geldiği sürece devam eder ve daha fazla elektron güneş pilinin n-tipi tarafına hareket ederek negatif bir yük oluşturur [36,37]. Potansiyel farkı olan iki yarı iletken parça bir iletken ile birleştirildiğinde bir elektrik akımı elde edilecektir. Bir güneş pilinin çalışma prensibi Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



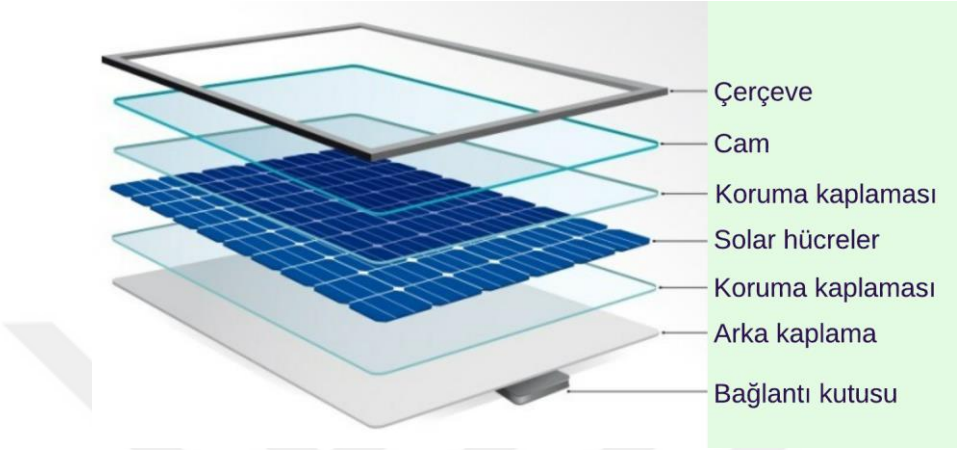
Şekil 2. 4 Güneş hücresinin çalışma prensibi

Bu teknoloji 1980'lerden beri uygulanmaktadır ve ilk kayda değer FV güç 1990'ların başlarına dayanmaktadır. Si-kristal (monokristal veya polikristal) paneller, en yaygın FV teknolojisini temsil eder ve son on yılda FV pazarına hakim olmuştur. Panel üretim maliyetlerini azaltmak için başlıcaları Siamorphous, CdTe ve CIGS ince film, organik ve hibrit hücreler olmak üzere alternatif FV teknolojiler geliştirilmiştir [38].

FV teknolojileri, kullanılan malzeme, boyut, ağırlık ve performans açısından farklılık gösteren ve değişik gelişmişlik aşamalarındaki panel türlerine dayanmaktadır. Birinci nesil olarak tanımlanan piyasadaki ana FV teknolojileri, c-Si'ye dayanır ve FV pazarının %90'ını (%40 mono-, %48 multi - ve %2 ribon Si) temsil eder. İkinci nesil ince film teknolojileri, pazar payının kalan %9'una sahiptir (%5 CdTe, %2 a-Si ve %2 bakır indiyum galyum diselenid [CIGS]). Düşük verimlilik oranları nedeniyle son zamanlarda a-Si ürünleri üretimine son verilmiş olup, günümüzde pazar payı düşük düzeydedir. Esas olarak boyaya duyarlı ve organik FV hücreleri gibi teknolojilere dayanan üçüncü nesil paneller, halen sanayi öncesi aşamadadır [39].

FV paneller içerisinde organik ve inorganik komponentler bulunur. Şekil 2.5'te FV panellerin yapıları ayrıntılı olarak gösterilmiştir. En alt kısımdan başlayarak, Tedlar (polivinil florür) ve polietilen tereftalattan oluşan plastik arka kaplama görülebilir. Üst

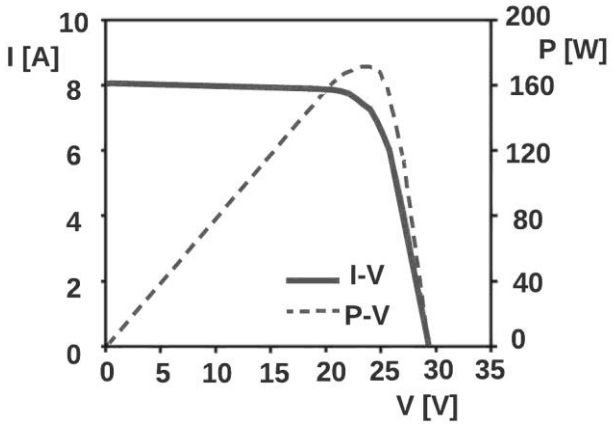
katmanlarda panel tipine bağlı olarak değişiklik gösterebilen iki kat etilen vinil asetat (EVA) bulunur. Son olarak bir cam tabaka görülmektedir. Tüm katmanlar bağlantı kutusunun da bağlı olduğu alüminyum çerçeve içerisinde sıkıştırılmıştır [38].



Şekil 2. 5 Fotovoltaik panelin genel yapısı [38]

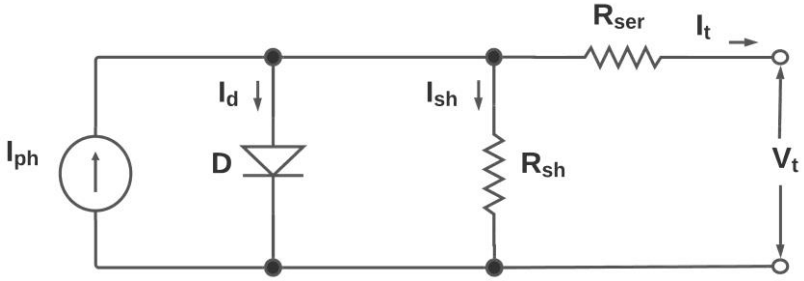
2.5. Fotovoltaik Panellerin Üretim Performansı (Karakteristikleri)

Güneş pilinin akım-gerilim (I-V) eğrisi doğrusal olmadığından FV hücrelerin parametre tahmini doğrusal değildir [40]. Şekil 2.6'da, sabit güneş radyasyonu (1000 W/m^2) ve 25 °C'de bir güneş panelinin I-V ve P-V (güç - gerilim) eğrileri verilmiştir [41]. Hücre sıcaklığının 1 °C arttırılması, FV gerilimi (0,085-0,123) V aralığında azaltırken, akımı (0,0026-0,0032) A arttıracaktır. Dolayısıyla hücre sıcaklığındaki 1 °C artış, gücü % 0,5 - 0,6 aralığında azaltır [42].



Şekil 2. 6 Kyocera KC175GHT-2 model fotovoltaik panelin sabit güneş radyasyonu ve T=25 °C'de I-V ve P-V eğrileri [41]

Farklı değişken çevresel koşullar altında FV hücrelerinin davranışını belirlemek için elektriksel olarak eşdeğer devre modelleri kullanılmaktadır. FV hücre eşdeğer devre modelleri, sıcaklık ve radyasyon gibi harici değişkenlerle ilgili akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristiklerini vererek FV panelinin elektrik performansını analiz etmeyi mümkün kılar [43,44].



Şekil 2. 7 Bir fotovoltaik hücrenin tek diyot eşdeğer devresi [45]

FV hücresi için elektriksel olarak eşdeğer üç farklı model (tek diyotlu, iki diyotlu ve üç diyotlu modeller) vardır [46,47]. En yaygın model tek diyotlu modeldir [48,49]. Tek diyot modeli Şekil 2.7'de görülebilir. Denklem 2.3 [45], tek diyot modelinin basitleştirilmiş versiyonunda çıkış akımını ifade eden denklemi verir.

$$I_t = I_{ph} - I_o\left(e^{\frac{(V+IR_{ser})}{V_t m}} - 1\right) - \frac{V+IR_{ser}}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'te I_t FV hücrenin çıkış akımı, I_{ph}, üretilen foto-akımdır. I_o, doyma akımı, R_{ser}, seri direnci gösterir. Diyot idealite faktörü m ile gösterilirken V_t, FV hücrenin çıkış gerilimidir.

FV paneller seri bağlı güneş pillerinden oluşur [50]. Jeneratörlerin nominal gücünü artırmak ve yeterli gerilim seviyesini sağlamak için FV paneller seri veya paralel bağlanır [50,51].

FV panellerin nominal tepe güç değerleri, üreticiler ve müşteriler için önemli bir parametredir. FV paneller, Standart Test Koşulları (STC) [52] olarak ifade edilen 25 ºC, 1,5 g hava kütlesi ve 1000 W/m^2 güneş radyasyonu altında derecelendirilmektedir. Tablo 2.1, üreticiler tarafından FV panellerin çalışmasına ilişkin genel olarak sağlanan bilgileri göstermektedir.

Tablo 2. 1 Üreticiler tarafından sağlanan FV panel parametreleri [52,53].

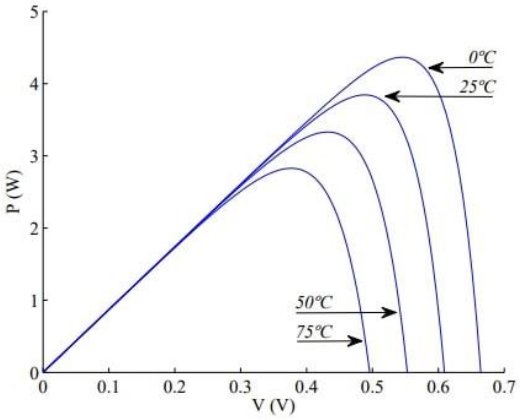
FV panel parametresi	Parametrenin sembolü
Açık-devre gerilimi	V_{oc}
Kısa-devre akımı	I_{sc}
Maksimum güç gerilimi	V_{max}
Maksimum güç akımı	I_{max}
Maksimum güç	P_{max}

Üreticiler tarafından verilen FV panellerin temel elektriksel özellikleri genellikle STC altında belirtilir, ancak FV paneller, gerçek çalışma koşullarında değişen ışık yoğunlukları ve büyük sıcaklık sapmaları nedeniyle ürün özelliklerinde olduğu gibi performans göstermez [54]. FV panellerdeki sıcaklık değişimi, panel verimliliğini ve güç çıkışını ciddi şekilde etkiler. FV paneller, aşırı güneş radyasyonu ve yüksek ortam sıcaklıkları nedeniyle çok fazla ısınabilir. Çevresel etkilerin yanı sıra, FV etkisi nedeniyle panelin kendisinin ürettiği ısı da FV panellerin ısınmasında etkilidir [55]. Şekil 2.8, Rodrigues vd. tarafından oluşturulan 0 ile 75 °C arasındaki sıcaklık değişimlerinde ideal bir FV hücresinin P-V özelliğini göstermektedir [56]. Çevresel sıcaklık koşulları hızla değişse de, FV panelin termal kütlesi nedeniyle sıcaklığa tepki süresinin çok hızlı olmadığı da belirtilmelidir [55].

Radyasyon ve sıcaklık değerlerinin bir fonksiyonu olarak fotoakım (I_{ph}) Denklem 2.4'ten bulunabilir.

$$I_{ph} = \frac{E}{E_{ref}}\left[I_{ph,ref} + \mu_1\left(T - T_{ref}\right)\right] \quad (2.4)$$

I_{ref}, STC referans koşulları (üretici tarafından sağlanan) altında çalışan bir FV hücresi tarafından üretilen akımdır. E ve T sırasıyla radyasyonu ve sıcaklığı temsil eder. E_{ref} ve T_{ref}, standart bir ışınım değerini (1000 W/m^2) ve standart bir sıcaklık değerini (298,15 K) temsil eder. μ_1 kısa devre akımındaki sıcaklık katsayısıdır [54,57,58].



Şekil 2. 8 İdeal güneş pilinin 0 ile 75 ºC arasında P-V karakteristik eğrisi [56].

Krauter, mono ve polikristal FV panellerde kısa devre akımının sıcaklıkla yavaşça arttığını belirtmiştir [59]. Açık devre gerilimi hızla düşerek elektrik güç çıkış aralığını %0,4/°C ile %0,5/°C arasında düşürdü. Laboratuvar koşullarında güneş simülatörü altında gerçekleştirilen başka bir çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 2.2'de listelenmiştir. Burada gerilim ve akım mutlak sıcaklık katsayıları (TC) sırasıyla β ve α'dır.

Tablo 2. 2 Ortalama sıcaklık katsayıları [60].

Teknoloji	**TC (V/K)**	**TC (A/K)**
c-Si (mono)	-0,00364512	0,00046915
c-Si (multi)	-0,0037199	0,00047709
a-Si	-0,00327806	0,00074003

Mattei vd. 'ne göre FV panel verimliliği için en yaygın Denklem 2.5'te verilmiştir [61].

$$\eta = \eta_r\left[1 - \beta(T_c - T_r) + \gamma Log(E_{ref})\right] \quad (2.5)$$

Burada T_r ve E_{ref} sırasıyla referans hücre sıcaklığını (25 °C) ve referans güneş radyasyonu değerini (1000 W/m^2) temsil eder. η_r, referans panel verimliliğidir. γ ve β sırasıyla FV panelin güneş radyasyonu ve sıcaklık katsayılarıdır. T_c, FV hücre sıcaklığıdır.

Panel sıcaklığı ile hava durumu değişkenleri arasındaki ilişkiyi açıklamak için kullanılan en yaygın model Ye ve diğerleri tarafından verilmektedir [62]. Denklem 2.6 ile ifade edilir.

$$T_{mod} = T_{amb} + kG_{mod}, \quad (2.6)$$

T_{mod} ve T_{amb}, sırasıyla panel ve ortam sıcaklığını temsil eder. Sabit *k*, artan radyasyon ile ortamdaki sıcaklık artışını temsil eden Ross katsayısı (°C/(W/m^2)) olarak ifade edilir.

G_{mod}, FV panel üzerine düşen radyasyondur.

Verimlilik, FV panellerin bir diğer önemli parametresidir. Mono-Si güneş pilleri, silikon teknolojisindeki güneş pilleri arasında en verimli olanıdır [63]. Laboratuvar koşullarında, tek kristal silikon hücrelerin maksimum fotoelektrik dönüşüm verimliliği %25'e ulaşabilir [63–65]. Ticari amaçlar için verimlilik değeri %15-22'dir [65]. Çok eklemli (MJ) güneş pilleri için 25 °C'de, maksimum verim 3 ve 4 MJ hücreler için sırasıyla %44,4 ve %46'dır [66]. Fransa'da Soitec ve CEA-Leti ve Almanya'da Fraunhofer ISE, %46 verimliliğe sahip dört bağlantılı bir güneş pili geliştirdiler [67–69]. FV enerji sisteminin genel verimliliği %10-16'dır. Bu verim, diğer enerji dönüşüm sistemlerine kıyasla düşük bir dönüşüm yüzdesidir. Laboratuvar koşullarında en yüksek güneş pili verimliliğinde bile enerji dönüşüm oranı %50'nin altındadır [70].

2.6. Fotovoltaik Panellerde Ölçme ve Kayıt Sistemleri

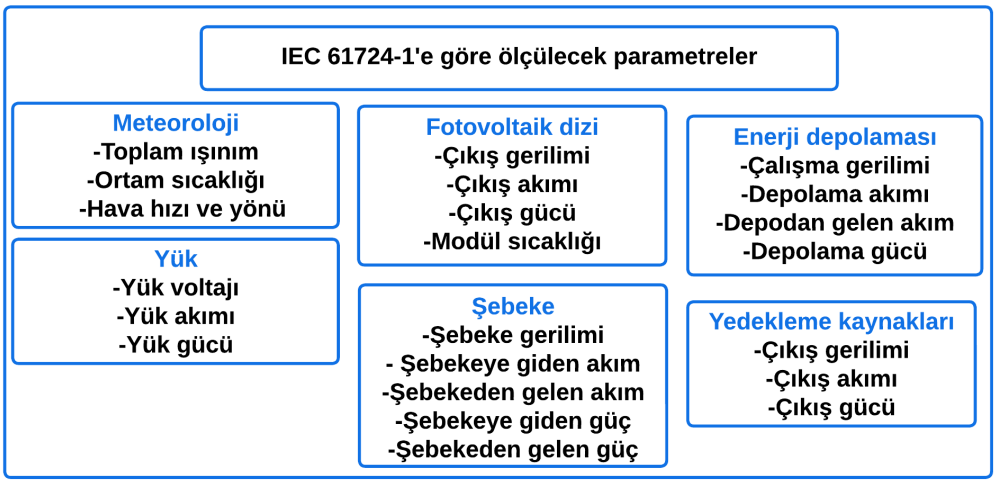
Büyük ölçekli FV sistemlerinde, verilerin izlenmesi ve ölçülmesi, elektrik üretim verimliliğinin optimize edilmesi ve arızaların tespit edilmesi açısından önemli bir konudur [71]. Mevcut FV izleme sistemlerinin maliyeti ve karmaşıklığı, büyük ölçekli FV tesislerinde kullanımı kısıtlamaktadır [72]. Yüksek maliyet, küçük boyutlu FV sistemleri için uygulamayı imkansız kılmaktadır [71,73]. Son zamanlarda teknolojik gelişmelerle birlikte daha düşük maliyetli izleme sistemleri üretilmektedir [71–76]. Yeni gelişmelerle veri toplama ve izleme teknolojisinin tüm FV sistemlerinde uygulanması daha kolay hale gelmektedir.

FV sistemlerinde çeşitli veri toplama ve izleme uygulamaları vardır [77]. Veri toplama, birçok uygulamada FV panel seviyesinde uygulanırken [78–87], birbirine bağlı FV dizisi çıkışlarının ölçülmesi ve görüntülenmesiyle de uygulanır [88–96]. Ölçülen veri türleri de çalışmalar arasında farklılık göstermektedir. Bir diğer önemli ayrım ise kablolu veya kablosuz olarak veri aktarım yöntemidir. Literatürde FV panellerde ölçme ve kayıt sistemlerinin çeşitli yönlerden incelendiği çalışmalar bulunmaktadır [97].

FV panellerin elektriksel özellikleri, akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrileri ile ifade edilir [98–100]. FV panelin güç üretimini izlemek için akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesi önemlidir. Enerji üretimi güneş radyasyonu miktarına, sıcaklığa ve diğer çevresel faktörlere bağlıdır [71,72,101]. FV sistemlerin üretim performansları iklim koşullarından doğrudan etkilenir. Her FV izleme sisteminde ölçülen parametreler farklılık

gösterebilir. Akım, gerilim, sıcaklık ve radyasyon en sık ölçülen veriler olsa da bazı sistemler farklı parametreleri ölçer. FV sistemlerini izlemek için üç tip veri kullanılır: elektriksel veriler, çevresel veriler ve gerçek zamanlı cihaz çalışma verileri.

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından geliştirilen 61724 kılavuzu [102], FV tesisleri için veri toplama ve değerlendirme standartlarını ortaya koyar. Şekil 2.9, IEC 61724 standartlarına göre ölçülecek parametreleri göstermektedir. Meteorolojik parametreler olarak ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu ölçümleri gereklidir, ancak rüzgar hızı, yağış ve nem ölçümleri isteğe bağlıdır.



Şekil 2. 9 IEC 61724-1'e göre ölçülecek parametreler [102]

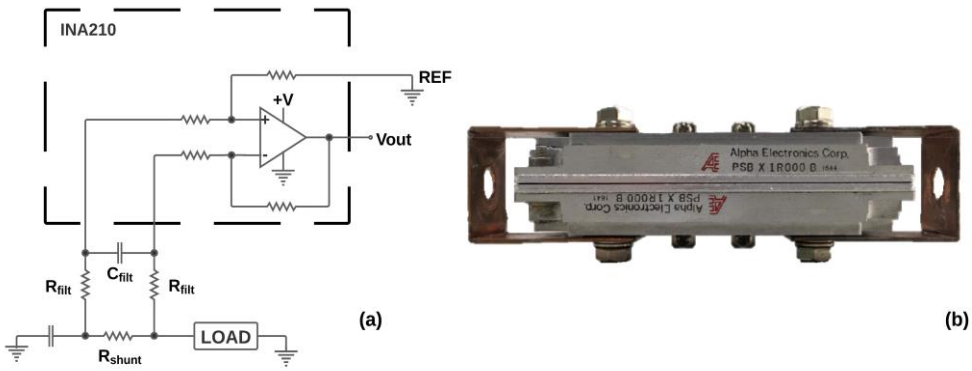
IEC 61724 birden çok bölümden oluşur. IEC 61724-1'in ilk bölümü, FV sistem performansının izlenmesi için kullanılan yöntemler, kullanılan ekipman ve terminoloji ile ilişkilidir. IEC TS 61724-2 ve IEC TS 61724-3, izleme verilerine dayalı performans analizine odaklanır. Standartlarda farklı doğruluk seviyeleri ve uygulamaları açısından üç izleme sistemi sınıfı tanımlar. Doğruluk seviyeleri sırasıyla yüksek doğruluk, orta doğruluk ve temel doğruluk olarak Sınıf A, Sınıf B ve Sınıf C olarak kategorize edilir. Her sınıf için gerekli ölçümler, sensör doğrulukları ve sensör sayıları da belirtilir. Küçük sistemler için Class B ve Class C'nin daha uygun olduğu belirtilmektedir. Maksimum örnekleme aralığı Class B ve Class C için 1 dk, maksimum kayıt aralığı Class B için 15 dk ve Class C için 60 dk olmalıdır.

2.6.1. Akım

Akım hem AC hem de DC tarafında ölçülebilir. Mevcut ölçüm yöntemleri, hassasiyet ihtiyacına ve sistemin ekipman boyutuna göre belirlenir [103]. Fluxgate ilkesi, Faraday-

Lenz yasası, Faraday döndürme etkisi, Hall etkisi, manyetodirenç etkisi ve Ohm yasası akım ölçümünde kullanılan bazı teknik ve ilkelerdir [104]. Akım sensörleri, evirici çıkışındaki hat akımı, şebekenin hat akımı ve FV panel seviyelerinde akım değeri gibi çeşitli bağımsız değerleri ölçebilir. Ölçüm doğruluğunu arttırmak için, akım sensörü çıkışının yükseltilmesi gerekebilir [105]. Duyarlılık amplifikatörün kazancına bağlı olarak değişecektir.

Hem AC hem de DC akımlarını algılamak için bir şönt direnç kullanmak yaygın bir yöntemdir. Şönt dirençler, geniş bir frekans aralığında ve farklı akım büyüklüklerinde ölçüm yapabilir. Şönt dirençlerin kullanımı, akım dalga formu doğru akımda (DC) olduğu gibi tek yönlü bir bileşen içerdiğinde daha uygundur [104]. Şönt direnç üzerindeki düşük gerilim düşümü, cihazın kompaktlığını olumsuz yönde etkileyecek ve maliyeti artıracak olan amplifikasyona ihtiyaç duyar [106]. Büyük akımları ölçmek için gereken şöntler ağırdır ve şöntlerdeki gerilim düşümü nedeniyle ısınma sorunlarına neden olur. Şönt dirençler mevcut yüke seri olarak bağlanır. Bu bağlantı yöntemi, yükleme direnci etkisine neden olur; bu nedenle şönt direnç kullanarak akım ölçümü pratik değildir, hatta bazı durumlarda imkansızdır [107]., Adhya vd. veri toplama sistemindeki FV akımı bir şönt direnci ile ölçmüşlerdir [108]. Direnç üzerine düşen gerilimi ölçerken ayrıca bir diferansiyel amplifikatör kullanmışlardır. FV akımını ölçen Fuentes vd. de bir şönt direnç ve bir diferansiyel yükseltici kullanmıştır [95]. Şekil 2.10, şönt direnç ve alçak geçiren filtre kullanan akım ölçüm devresinin şemasını göstermektedir. Ölçülen değerler çok yüksek olmadığından, şönt direnç üzerindeki gerilim düşümünü yükseltmek için kullanılan INA210, Şekil 2.10 (a)'da gösterilmektedir.



Şekil 2. 10 Şönt direnç, alçak geçiren filtre ve INA210 ile akım ölçümü (a) ve şönt direncin yandan görünümü (b) [109,110]

Edwin Hall'ın 1879'da keşfettiği Hall etkisi, günümüzde kullanılan Hall etkili akım

sensörünün (HEAS) çalışma prensibini oluşturmaktadır [106,111,112]. HEAS'lerin şönt dirençler gibi diğer ölçüm yöntemlerine tercih edilmesinin: geniş ölçüm aralığı, yüksek doğruluk, çok çeşitli sensör konfigürasyonları, giriş ve çıkış arasında galvanik izolasyon ve iyi doğrusallık gibi birçok nedeni vardır [113,114]. HEAS ile AC ve DC ölçümleri yapmak mümkündür [115]. HEAS'ler açık döngü ve kapalı döngü olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [113,115,116].

Kapalı döngü Hall etkisi akımının ölçülmesinde, Hall gerilimi bir transistör devresi aracılığıyla akıma dönüştürülür ve üretilen akım ikincil bir sargıdan geçirilir [117]. Bu yöntem, hızlı yanıt ve iyi doğruluk sağlar ve karmaşık dalga biçimlerinde bile DC ve AC akımları ölçülebilir [118]. Kapalı döngü HEAS'de, ortaya çıkan manyetik alanı sıfır akıda tutmak, ofset kayması, hassasiyet kayması ve manyetik çekirdeğin doygunluğu ile ilgili hataları önler. Kapalı döngü HEAS'ler kabul edilemez bir doğrusal olmayan hata verebilir ve sıcaklığa bağlı olarak kazançlarında önemli bir kayma gösterebilir [118]. LA 55-P model sensör Kabalcı vd. tarafından uzaktan izlenen ve kontrol edilen güneş enerjisi santralleri ve sulama sistemlerinde akım ölçümü için kullanılmıştır [119]. 50 A'e kadar ölçebilen sensörün çıkışına bir amplifikatör devresi uygulamışlardır. Tina vd., bağımsız FV enerji santrali için geliştirdikleri uzaktan izleme sisteminde FV panel ve şarj regülatörü çıkış akımlarını ölçmek için LEM LA100-P kapalı devre HEAS kullanmışlardır [120].

Kapalı döngüden farklı olarak, açık döngü Hall etkisi sensörlerinde ikincil sargı yoktur [117]. Açık çevrim HEAS modeli uygun maliyetlidir ve boyut ve ağırlığın önemli olduğu pille çalışan uygulamalar için tercih edilmektedir [113]. Açık döngü HEAS'ler genellikle daha sınırlı bir doğrusallık aralığına sahiptir [121]. Lazzaretti vd., Hall etkisi prensibini kullanarak ölçüm yapabilen bir LEM model HASS-50S açık döngü HEAS kullanmıştır. 50 kHz'e kadar ölçüm yapabilen bir sensör ile hem evirici çıkışında AC hem de FV dizi çıkışında DC ölçümü gerçekleştirilmiştir [122]. Prieto vd., FV sistemde her bir FV panelden gelen verileri görüntülemek için kablosuz bir sensör ağı oluşturmuştur. Her bir FV panelin akım verisini elde etmek için 12,5 A'e kadar ölçüm yapabilen ACS711 model açık çevrim HEAS kullanmışlardır [85]. Başka bir çalışmada ACS712 (0-5 A) model açık çevrim HEAS kullanılarak akım ölçümü yapılmış ancak sensörün çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle düşük yüklerde akım değerinin doğru ölçülemediği belirtilmiştir [123]. Diğer araştırmacılar da FV akımını ölçmek için ACS712 model açık döngü HECS'yi

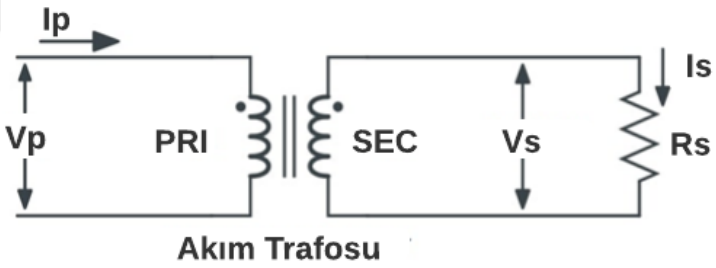
kullanmışlardır [81,124]. Bu sensör modeli, 0,66 mV/A hassasiyetle 30 A'e kadar ölçüm yapabilmektedir [81]. Başka bir çalışmada, bir Arduino Uno geliştirme kartı, bir ACS712 akım sensöründen gelen analog verileri dijital verilere dönüştürmek için kullanılmıştır. Her iki cihazın besleme gerilimi 5 V'tur. Ölçülen akım sıfır olduğunda 10 bitlik (0-1023) bir değere sahip olan Arduino Uno sensör çıkışını 512 olarak dijital veriye çevirmektedir. Arduino Uno'ya bir analog pin ile bağlandığında, kodun kalibrasyonu Denklem 2.7'deki gibi olmaktadır [125], burada *sV* sensör değeridir, *zr* sıfır okumadır ve *rv* okunan değerdir.

$$sV = \left(zr - rv(A0)\right) \times \left(\frac{5000}{1023}\right) \quad (2.7)$$

Akım ve ofset değeri Denklem 2.8'den elde edilebilir. *I* ve *ofst* sırasıyla akımı ve ofseti temsil eder [125].

$$I = (ofst - sV) \div sens \quad (2.8)$$

Rus-Casas vd., şönt direncin ısınmasının ölçümleri olumsuz etkileyebileceğinden dolayı HEAS kullanmışlardır. ACS714 sensörünün ±5, ±20 ve ±30 A gibi farklı aralıklar sunmasının akım ölçümünde önemli bir avantaj olduğunu vurgulamışlardır [91].



Şekil 2. 11 Akım trafosunun basit devre şeması

Akım trafoları (AT), güç sistemlerinde en yaygın kullanılan akım transdüserleridir [126,127]. Şekil 2.11, akım trafosunun temel devre şemasını göstermektedir. Amper ve Faraday kanunları akım trafolarının çalışma prensibidir [128]. AT'nin birincil akımı, Faraday yasasında olduğu gibi ikincil bobinde bir gerilim indükleyen değişken bir manyetik alan yaratır. Bu gerilim, akımın sekonderde bulunan ölçme direnci üzerinden geçmesine neden olur [128,129]. Bazı FV izleme sistemlerinde şebeke akımını ölçmek için de akım trafoları kullanılmaktadır [108]. Tiwari vd. tarafından evirici çıkışındaki akımı ölçmek için, evirici çıkışındaki hatta AT bağlamışlardır [130]. Güneş enerjisi santrallerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve otomatik yük kontrolü için Arduino Uno ile yük üzerindeki gerilim düşümünü ölçerek akım ölçümü gerçekleştirmişlerdir. Hall etkisi sensörlü FV dizisinin DC çıkışı ve inverter çıkışı AC, Andreoni vd. bir akım trafosu ile

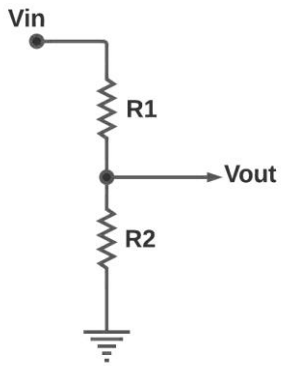
inverter çıkışını ve Hall etkili sensör ile FV dizinin DC çıkışındaki akımı ölçmüştür [88]. Akım trafosu, HEAS ve şönt direnç arasındaki karşılaştırma Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

Tablo 2. 3 Akım sensörlerinin performans karşılaştırması [131–133]

Sensörler	AT	HEAS	Şönt direnç
Hacim	Geniş	Küçük	Küçük/ Orta
Frekans aralığı	AC <100 Hz	DC~150 kHz	--
Hassasiyet	Düşük	1,3~2,5 mV/G	--
Sıcaklık katsayısı	--	-0,3 %/°C	<50 ppm/°C
Dinamik aralık	--	150 mA~35 kA	1200 A+

2.6.2. Gerilim

FV sistemlerde verimli ve güvenilir çalışma için FV panel çıkışı, evirici çıkışı, kablolar ve trafolar gibi çeşitli noktalardan ve farklı gerilim seviyelerinden ölçüm yapılır [103]. Gerilim değeri, gerilim bölücü devre ile Şekil 2.12'de görüldüğü gibi iki seri direnç kullanılarak belirlenen seviyeye düşürülür [134–139]. Çoğu uygulamada gerilimi ölçmek için bölücü devreler kullanılır ancak farklı teknikler de vardır. Kabalcı vd. 10-500 V arası ölçüm yapabilen LV-24-P model kapalı döngü hall etkili sensör kullanmışlardır [119]. Hall etkili gerilim sensörleri ile tasarlanan ölçüm kartları kullanılarak FV sistemlerde farklı noktalardan gerilim ölçümü yapılabilir. Gerilim ve akım ölçümleri sağlayan Texas Instruments'ın INA219B güç ölçeri Antonino vd. tarafından kullanılmıştır [140]. Sensör -25 °C ile 85 °C arasında ±%1 hata ile ölçüm yapabilmekte ve 26 V'a kadar DC gerilimi ölçebilmektedir. Birçok FV panelin açık devre gerilimi 26 V'tan büyük olduğu için sensör çoğu uygulama için yetersiz kalacaktır.



Şekil 2. 12 Gerilim bölücü direnç devresi

2.6.3. Güneş radyasyonu

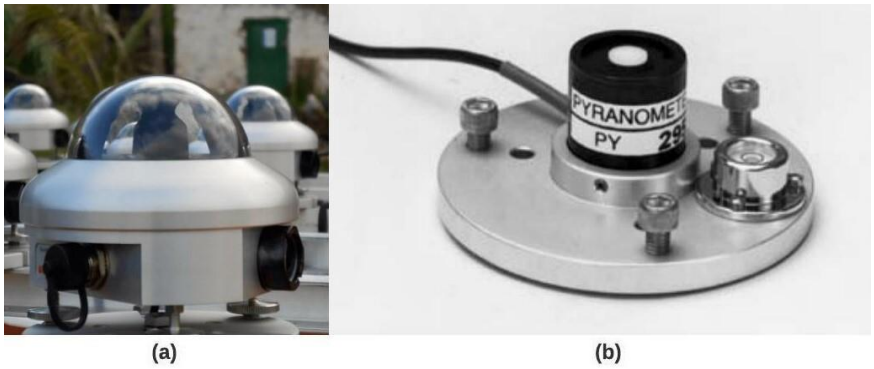
Bir FV panel veya dizisinin performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri güneş radyasyonudur. Güneş radyasyonu, FV enerji sistemlerini tasarlamak ve sistemin üretimini tahmin etmek için çok önemli bir parametredir [141]. Pirhelyometre ve piranometreler, güneş radyasyonunu ölçmek için kullanılan iki temel araçtır [14].

Dar bir görüş alanı (5 derece) ile ve doğrudan güneşe bakacak şekilde monte edilen Pirhelyometreler, kısa dalga (~300 nm ila 2500 nm) doğrudan güneş radyasyonunu ölçerler [14,142–144].

Piranometre, yarım küre şeklindeki (180°) bir alanda, genellikle yatay düzlemde toplam güneş radyasyonunu ölçer [14,145–147]. Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO), piranometreyi "2π steradyan katı bir açıdan düzlem yüzeyine ve 300 ila 3000 nm arasında bir spektral aralıkta güneş radyasyonunu ölçmek için kullanılan alet" olarak tanımlamaktadır [148]. Termofil, silikon (fotodiyot) piranometreler ve FV referans hücreleri, radyasyonu ölçen en yaygın sensörlerdir [149].

Termofil piranometreler, iki cam filtre kubbesi altına yerleştirilmiş bir sensörden oluşur. 285 nm ile 2800 nm arasındaki bir dalga boyu bölgesindeki güneş radyasyonu cam kubbelerden geçer ve siyah renkli ısı algılayıcı sensörün üzerine düşer [142,149].

Fotometrik piranometreler, üzerlerine ışık düştüğünde elektrik akımı üreten yarı iletken sensörlerden oluşurlar [150]. Yarı iletken tip piranometrelerin maliyeti daha düşüktür ve yaklaşık 10 µs gibi kısa bir tepkiye sahiptirler [147,150–152]. Güneş ışığına karşı yüksek hassasiyeti göz önüne alındığında, silikonu yarı iletken bir piranometre sensörü olarak kullanmak mümkündür [153]. Bununla birlikte, silikon bazlı yarı iletken piranometreler, FV panellere benzer şekilde ~300-1100 nm gibi dar bir aralıktaki dalga boylarını ölçebilir [149,150,154]. Şekil 2.13, bir termofil piranometreyi (a) ve silikon piranometreyi (b) göstermektedir; bu iki piranometrenin karşılaştırması Tablo 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2. 13 Termofil piranometre (a), silikon piranometre (b) [155,156]

Tablo 2. 4 Termofil ve silikon piranometrelerin özel performans göstergeleri [154].

Performans parametresi	**Termofil piranometrenin özellikleri**	**Silikon piranometrenin özellikleri**
Spektrum aralığı	300~2800 nm	400~1100 nm
Hassasiyet	7~14 μV/Wm^{-2}	7~14 μV/Wm^{-2}
Sıcaklık	-40 ~ 50 °C	-40 ~ 65 °C
Cevap süresi	<60 s	10 μs

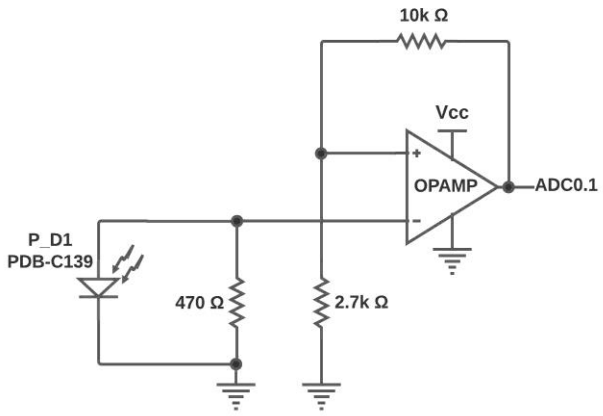
FV referans hücreleri, FV panel ile aynı yapıya sahiptir. FV etki prensibine göre, FV referans hücresine gelen fotonlar bir elektron akışı (akım) oluşturur [149,157]. Kalibrasyonlar IEC 60904 uluslararası standartlarına göre yapılır, o referans koşullarında FV verimliliğini ölçmede kullanılırlar [158].

Termofil piranometreler ve kalibre edilmiş FV referans cihazları, Dunn vd. tarafından güneş radyasyonu ölçmek için kullanılmıştır [157]. Termofil piranometreler için yaklaşık ±%5 ve FV referans hücreleri için ±%2,4'lük bir güneş radyasyonu ölçüm hatası belirlemişlerdir. Ayrıca piranometreler ve referans hücreler toz tutma açısından ele alındığında, piranometrelerin kubbemsi yapısı toz tutmaması açısından daha avantajlıdır [159].

İsviçre, Davos'ta bulunan WMO) Fiziksel Meteoroloji Gözlemevi'ndeki Dünya Radyometrik Referansı (WRR), güneş radyasyonu ölçümleri için referans sağlamaktadır [25,160].

2016 yılında, Touati vd. tarafından Doha'da SP110 Silikon Hücreli Piranometre kullanılmıştır [161]. Tina vd., bağımsız FV sistemleri için güneş radyasyonu ölçümünü bir silikon piranometre ile gerçekleştirmiştir [120]. Pereira vd., radyasyon ölçümü için Hukseflux LP02 termofil piranometre kullanmayı tercih etmiştir [135]. Piranometrenin çıkış sinyali 4-20 mA aralığında olduğu için ek bir devre ile çıkış akım sinyalini 5 V'a

çevirmişler ve LM324 model yükseltici kullanmışlardır. Toplam güneş radyasyonu, Rezk vd. tarafından uygun maliyetli bir veri toplama sistemi geliştirmek için pahalı ticari piranometreler yerine FV panel kısa devre akımı üzerinden ölçülmüştür. [19]. Kalibre edilmiş 2,2 W monokristal hücreler, Lopez-Vargas vd. tarafından Arduino Uno tabanlı uzaktan izleme sisteminin maliyetlerini azaltmak için güneş radyasyonunu ölçmek için kullanılmıştır [74]. Radyasyon ölçümü için bir fotodiyot (PDB-C139), Ranhotigamage vd. tarafından uygun maliyetli bir performans izleme sistemi için kullanılmıştır [105]. Fotodiyotun şönt direncinden küçük olduğu için fotodiyoda paralel olarak 470 Ω'luk bir direnç Şekil 2.14'te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Böylece fotodiyot, mevcut ışıma değeri ile doğrusal hareketli bir akım üretmiştir. Analogdan dijitale dönüştürücüye bağlanmadan önce fotodiyot çıkışının yükseltildiğine dikkat çekilmiştir. Ranhotigamage, ölçülebilir maksimum radyasyon değerinin 2440 W/m^2 olduğunu belirtmiştir.

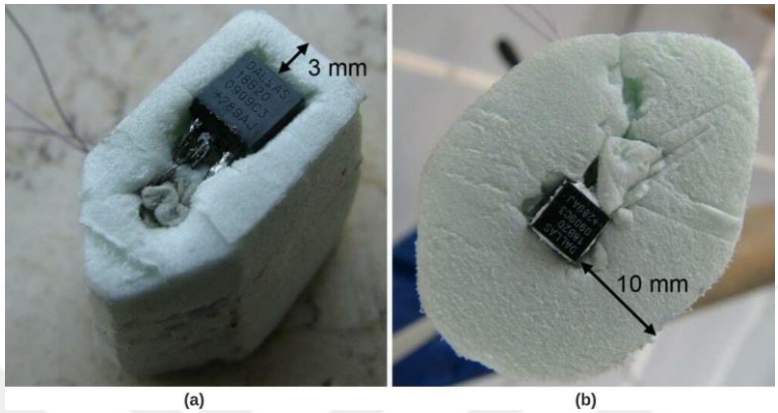


Şekil 2. 14 Fotodiyot güneş radyasyonu ölçüm devresi [105]

2.6.4. Sıcaklık

FV tesislerinde her bir panelin sıcaklıklarını ölçmek ekonomik ve teknik olarak mümkünse, bir kızılötesi kamera kullanarak her bir panelin sıcaklıklarını manuel olarak kontrol etmeye gerek kalmayacaktır [162]. FV hücrelerine sıcaklığı ölçmek için fiziksel olarak erişilemediğinden, en yaygın yöntem FV panellerin arka yüzeyindeki ortalama sıcaklığı ölçmektir [163]. Kurnik vd., dijital sıcaklık sensörünü FV panelin arkasına monte ederken, termal olarak iletken bir macun kullanmışlardır [164]. Polistiren ve silikon macun ile ortam sıcaklığının panel sıcaklık ölçümü üzerindeki etkisini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Jankovec vd., termal yalıtım malzemesi (XPS) kullanarak sıcaklık sensörlerinin bir kısmını Şekil 2.15'te görüldüğü gibi kapatmış ve bu şekilde dış

sıcaklık etkilerinin en aza indirilmesini hedeflemiştirlerdir [163]. Yalıtımsız PT sensörünün diğerleri arasında en kötü sonucu verdiğini belirten Jankovec vd., ayrıca panelin arka yüzeyine monte edilen sensörlerin, uygulanan yalıtımın etrafındaki hücre alanında küçük bir sıcaklık artışına (ortalama 1 °C'den az) neden olduğunu bildirmişlerdir.



Şekil 2. 15 DS sensörü (DS18B20), yanal yalıtım kalınlığı 3 mm (a) ve 10 mm (b) olan bir XPS bloğu ile kaplıdır [163]

Birden fazla çalışmada, panel sıcaklığı LM35 sıcaklık sensörü ile ölçmüştür [139,165–167]. Priharti vd., -55 °C ~ +150 °C aralığında ölçüm yapabilen sensörün, 0-100 °C aralığında daha doğru sonuçlar verdiği ve 60 µA düşük akım ile çalıştığını belirtmişlerdir [166]. Gupta vd., ±0,5 ºC hassasiyetle ölçüm yapabilen LM35 sensörünü, ısıl iletkenliği yüksek bir malzeme ile FV panelin sırtına monte ederek kullanılmışlardır [165]. Pereira vd. tarafından yapılan çalışmada, sensör, panelin ortasına yerleştirilmiş ve FV modül sıcaklığının öğle saatlerinde 57 °C'ye yükseldiği belirtilmiştir [135].

DS18B20, 9-12 bit çözünürlükte çalışan ve yalnızca bir iletim hattına ve ortak toprak bağlantısına ihtiyaç duyan ve yaygın olarak kullanılan dijital bir sıcaklık sensörüdür [168]. DS18B20 kullanıldığında, her cihazın kendi kodu olduğu için tek bir hatta birden fazla sensör bağlamak mümkündür [163,169]. FV panel sıcaklığının farklı noktalardan ölçülmesi ve bu ölçümlerin ortalamasının alınması Fan vd. tarafından önemli bir metod olarak gösterilmiştir [170]. PT100 ile kalibre edilen dijital sıcaklık sensörü DS18B20, Bohórquez vd. tarafından da sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır [171]. DS18B20 sensör ölçüm sonuçları, Pt100'e dayalı kontrol sistemine göre ±0,4 ºC'den az sapma göstermiştir. Silvestre vd.'nin çalışmasında sıcaklık, panelin arka tarafının geometrik merkeze monte edilen PT100 sensörü ile ölçülmüştür. [172]. Sajjad vd., FV panellerin sıcaklığını ölçmek için K-tipi bir termokupl kullanmış ve panel sıcaklıklarının akşam saatlerine kadar

kademeli olarak ortam sıcaklıklarına yaklaştığını gözlemlemişlerdir [173].

2.6.5. Diğer parametrelerin ölçülmesi

Yukarıdaki başlıklarda açıklanan parametrelerin yanı sıra, FV izleme sistemlerinde herhangi bir bileşendeki (paneller, bağlantı hatları, dönüştürücüler, inverterler vb.) arızaları belirlemek veya sistemin performansını daha iyi anlamak için ek parametreler de ölçülebilmektedir.

Dabou vd., hava koşullarının şebekeye bağlı FV sistemlerin performansı üzerindeki etkisini araştırmak için geliştirilen izleme sisteminin bir parçası olarak rüzgar hızı verileri de toplamışlardır [174]. Rüzgar hızı, FV paneller üzerindeki soğutma etkisi nedeniyle kritik bir parametre olarak tanımlanmıştır. Bir diğer çalışmada [175], performansını değerlendirmek için bir FV enerji santralinin yakınına hava durumu veri kayıt istasyonu kurulmuştur. İstasyon, toprak nemi, atmosferik basınç, güneş radyasyonu, sıcaklık, bağıl nem, rüzgar hızı ve yönü ve yağış hakkında veri toplamıştır. Ayrıca rüzgarın, paneli serin tuttuğu ve güç kaybetmesini engellediği belirtilmiştir.

Güç verileri DC veya AC tarafında ölçülebilir. Ölçülen akım veya gerilim değerleri kullanılarak hesaplanabileceği gibi doğrudan güç sensörleri kullanılarak da ölçülebilir. Platon vd. [176], inverter tarafından ölçülen toplam enerji üretim verilerinin bir fonksiyonu olarak AC gücünü hesaplamışlardır.

Kim vd. [177], AC parametre karakterizasyonunu kullanarak sıcak noktaları saptamak için bir yöntem geliştirmişlerdir. Tek bir hücrede, sıcak lekelenme hem kapasitansı hem de DC empedansını artırır. FV dizilerdeki empedans ölçümleri, alt panel dizilerindeki sıcak noktaları belirlemek için kullanılmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

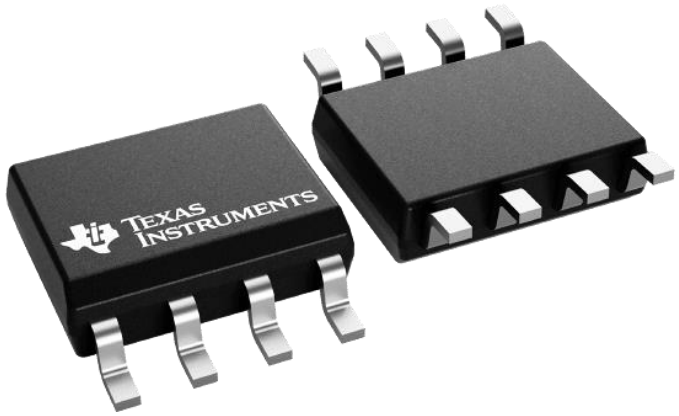
3.1. Materyal

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan bileşenler, ölçü aletleri, yazılım ve programlar hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1. Akım sensörü

Aynı koşullar altında her FV panelin çıkış akımı farklılık gösterebilir. FV panel üreticileri, ürün kataloglarında panelin maksimum güç akımı, kısa devre akımı gibi değerlerini belirtirler. Bir FV panelin çıkışında ölçülebilecek maksimum akım değeri o panelin kısa devre akımıdır (I_{sc}). Yapılan araştırmalarda, 400-500 W gücündeki panellerin I_{sc} değerinin STC altında 15 A değerini geçmediği saptanmıştır [178,179]. Fakat gelişen teknoloji ile beraber daha büyük güçte üretilen paneller mevcuttur. Örneğin, 605 W gücündeki bir panelin I_{sc} değeri 18,57 A'e kadar ulaşabilir [180]. 670 W gücündeki bir diğer panelin I_{sc} değeri 18,62 A'dir [181]. Zaman ilerledikçe daha büyük güçlü FV panellerin kullanımının yaygınlaşacağı tahmin edildiğinden tasarlanan devrede ölçülecek maksimum akım değeri, piyasadaki panellerin I_{sc} değerlerinden fazla olacak şekilde seçilmiştir.

Akım sensörü, FV panelin çıkış akımını ölçme amacı ile kullanılmıştır. Sensör seçilirken, ölçülecek DC akım aralığı, ölçüm hassasiyeti, güç tüketimi ve çalışma gerilimi göz önüne alınarak seçilmiştir. Texas Instruments üreticisinin TMCS1107A2U-Q1 model akım sensörü kullanılmıştır. Seçilen akım sensörü entegresi Şekil 3.1'de görülmektedir. Sensöre ait bazı parametreler Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3. 1 Kullanılan akım sensörü entegresi [182]

Tablo 3. 1 TMCS1107A2U-Q1 model akım sensörünün özel performans göstergeleri [183].

Performans parametresi	**Performans parametresi değeri**
Ölçüm aralığı	–2,8 A → 27,7 A (3,3 V beslemede)
Hassasiyet	100 mV/A
Akım ölçüm yönü	Tek yönlü
Cevap süresi	6,5 µs
Besleme akımı (maksimum)	6 mA
Çalışma gerilimi	3 V ~ 5,5 V

3.1.2. Gerilim sensörü

FV panel çıkış gerilimi ölçümü için gerilim bölücü devre kullanılmıştır. Bu devre için 2 adet dirence ihtiyaç vardır. Ölçüm yapılacak devreye göre hassasiyeti arttırmak amaçlı direnç değerleri değiştirilebilir. Tüm ölçüm devresi 3,3 V ile çalışacağı için gerilim bölücü direnç seçimleri de buna göre yapılmıştır. 3,3 kΩ ve 59 kΩ dirençler kullanılmıştır.

3.1.3. Fotodiyot

Güneş radyasyonunu ölçmek için BPW34 model fotodiyot kullanılmıştır. Kullanılan fotodiyot Şekil 3.2'de gösterilmiştir. 7,5 mm^2 ışımaya duyarlı alanı olan BPW34, test koşullarında yapılan ölçümlere göre -2,6 mV/K sıcaklık katsayısı ile çalışmaktadır. 600 ile 1000 nm dalga boyu arasındaki spektral bant genişliğine karşı duyarlı olan fotodiyot maksimum 30 nA ters karanlık akım değerine sahiptir.



Şekil 3. 2 Güneş radyasyonu ölçümü için kullanılan BPW34 model fotodiyot [184]

3.1.4. Sıcaklık sensörü

Geliştirilen sistemde, FV panel sıcaklığını ölçmek için Şekil 3.3'te gösterilen DS18B20 model dijital sıcaklık sensörünün su geçirmez versiyonu kullanılmıştır. 3,0 V ile 5,5 V arasında çalışabilen sensör, -55 °C ile +125 °C arasında ölçüm yapabilmektedir. Kullanılan dijital sıcaklık sensörü, -10 °C ile +85 °C arasında ±0,5 °C doğruluk ile ölçüm gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 3. 3 DS18B20 dış ortam sıcaklık sensörü [185]

3.1.5. Mikrodenetleyici

Mikrodenetleyici seçimi gerçekleştirilirken, kullanılacak ADC (Analog Dijital Çevirici) pin sayısı, ADC çözünürlüğü, programlama açısından kaynak bulma kolaylığı, çalışma gerilimi ve yapılan detaylı literatür çalışması göz önüne alınmıştır.

Ölçüm kartı tarafında, Espressif Systems tarafından üretilen ESP32-WROOM-32E

modeli tercih edilmiştir. Ölçüm devresinde kullanılan mikrodenetleyici, Şekil 3.4'te gösterilmiştir. 3,3 V ile çalışabilen ESP32-WROOM-32E, 32 bit mikrodenetleyici içermektedir. SPI (Seri Çevre Birimi Arayüzü) haberleşme protokolünü desteklemesi ve programlama kolaylığı da bu mikrodenetleyicinin seçilmesinde önemli rol oynamıştır.

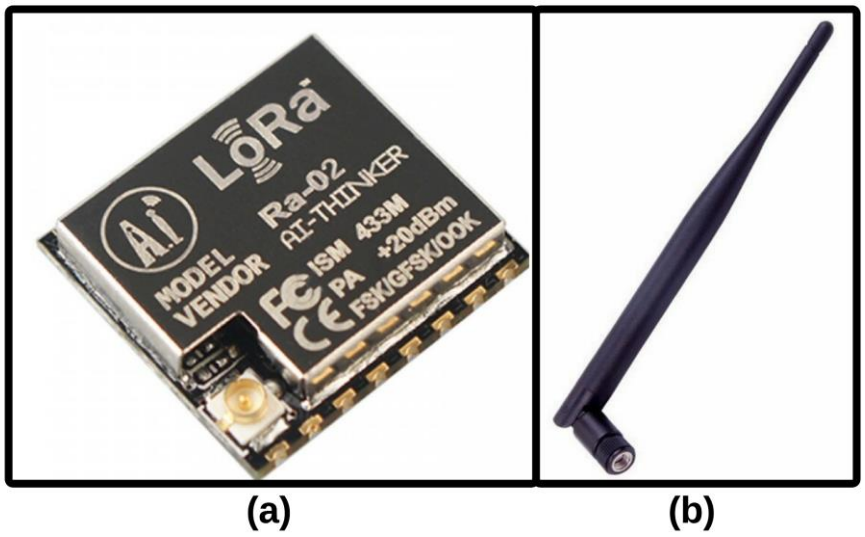


Şekil 3. 4 ESP32-WROOM-32E model mikrodenetleyici [186]

Merkezi Kayıt Birimi (MKB) tarafından tüm verilerin toplanması, işlenmesi ve internet ortamına aktarılması aşamasında, gelişmiş özellikleri ile mini bir bilgisayar olan Raspberry Pi 3 geliştirme kartı tercih edilmiştir. Üzerinde bulunan SD kart sayesinde internet bağlantısı olmadığı durumlarda verilerin SD karta yazılması açısından kolaylık sağlaması en önemli tercih sebeplerinden biri olmuştur.

3.1.6. Haberleşme modülü

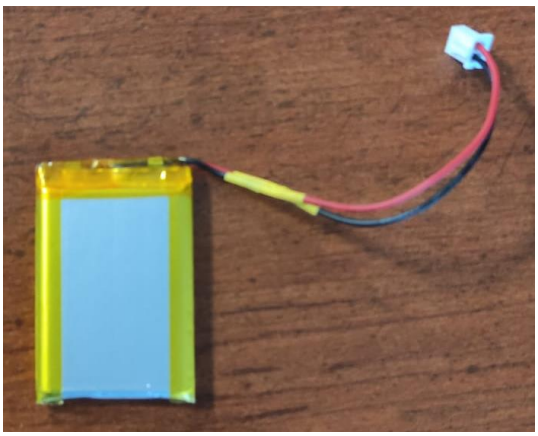
Büyük ölçekli santrallerde çok sayıda FV panelden ayrı ayrı ölçülen verilerin kablo ile aktarılması kablo karmaşıklığı, ekstra maliyet ve veri iletim zorluğuna sebep olabileceğinden kablosuz haberleşme modülü kullanılmıştır. LoRa SX1278 modüllerinin düşük güç tüketimi (verici modda maksimum 120 mA, alıcı modda maksimum 10,8 mA), kullanılan antene bağlı olarak yüksek mesafelerde veri aktarım yeteneği (görüş hattında 10 km'ye kadar) bu tezde haberleşme modülü olarak kullanılmasının sebeplerindendir. Şekil 3.5'te, kullanılan haberleşme modülü (a) ve haberleşme modülüne ait 433 MHz anten (b) gösterilmiştir.



Şekil 3. 5 LoRa SX 1278 kablosuz haberleşme modülü (a) ve 433 MHz anten (b) [187,188]

3.1.7. Şarj entegresi ve pil

Ölçüm devresinin kesintisiz çalışabilmesi ve dışarıdan bir müdahale gerektirmemesi için üzerinde bulunan şarjlı pil ile çalışabilmesi ve bu pilin kendisini FV panel üzerinden şarj etmesi çalışmanın hedeflerinden birisidir. Burada pilin şarj edilmesi için Batarya Yönetim Sistemi (BMS) oluşturulmuştur. Şarj fonksiyonunu kontrol eden entegre TP4056 olarak seçilmiştir. TP4056 düşük maliyetli, Li-Po ve Li-Ion pilleri şarj etmek için kullanılan bir şarj entegresidir. Şarj akımı, girişine bağlanan dirençler ile programlanabilmektedir. Oluşturulan şarj devresinde, giriş gerilimi 5 V'a regüle edilen BMS'nin şarj akımı 0,5 A olarak ayarlanmıştır. Enerji depolaması için 3,7 V 900 mAh Li-Po pil seçilmiştir. Kullanılan pil Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 6 Lityum Polimer 3,7 V pil

3.1.8. Kullanılan program ve yazılımlar

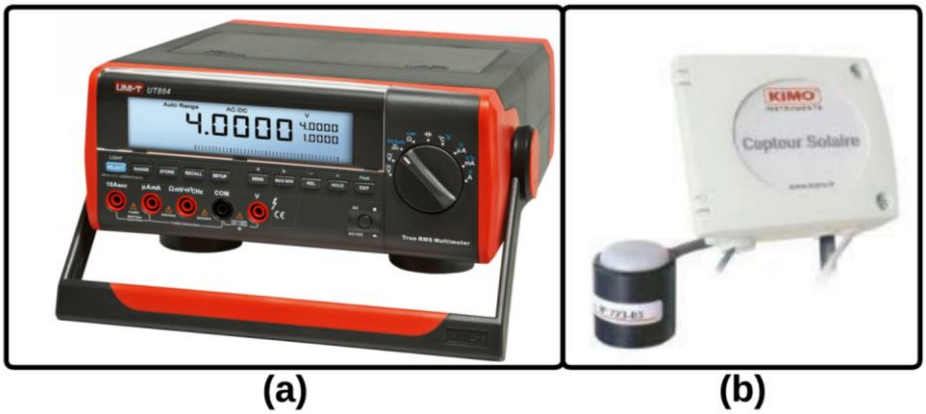
Tez çalışması sırasında çeşitli program ve yazılımlar kullanılmıştır. ESP32-WROOM-32E mikrodenetleyicisinin programlanmasında Arduino IDE geliştirme ortamı kullanılmış, kodlar basitleştirilmiş C dilinde yazılmıştır. Baskı devre kartı (PCB) tasarımı aşamasında, oldukça gelişmiş bir tasarım programı olan Altium Designer kullanılmıştır.

Ölçülen tüm verilerin İnternet üzerinden kullanıcı tarafından izlenebilmesi için açık kaynak Nesnelerin İnterneti (IoT) platformu olan ThingSpeak kullanılmıştır. Thingspeak'e aktarılan verilerinin mobil uygulama üzerinden de takibinin sağlanabilmesi amacı ile ThingView mobil uygulaması kullanılmıştır.

Gerekli durumlarda MKB'ye uzaktan erişim ile müdehale edilebilmesi için TeamViewer yazılımı kullanılmıştır.

3.1.9. Kalibrasyon cihazları

Geliştirilen ölçme sistemi ile akım, gerilim, sıcaklık ve radyasyon değerleri ölçülürken, ölçüm sonuçlarının doğruluğunun test edilmesi ve ölçüm sisteminin kalibre edilmesi için çeşitli cihazlar kullanılmıştır. Bu bağlamda ölçülen akım ve gerilim değerlerinin gerçek veriler ile karşılaştırılmasında UNI-T UT804 model multimetre kullanılmıştır. Ölçülen sıcaklık değerleri kullanılan multimetrenin ölçtüğü değerler ile karşılaştırılmıştır. Güneş radyasyonu ise KIMO CR -100 model piranometre ölçüm sonuçları ile kalibre edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 3.7'de, kalibrasyon amacı ile kullanılan multimetre (a) ve piranometre (b) gösterilmiştir.



Şekil 3. 7 Ölçümleri kalibre etmek için kullanılan UNI-T UT804 model multimetre (a) ve KIMO CR -100 model piranometre (b) [189,190]

3.1.10. Diğer bileşenler

Oluşturulan sistemde birçok ek komponent ihtiyacı olmuştur. PCB kart üzerinde çok sayıda direnç, kondansatör, diyot vb. devre elemanı kullanılmıştır. Bunların yanı sıra fotodiyot çıkış sinyalinin yükseltilmesi için 1,7 mV giriş ofset gerilimine sahip LMV321IDBVR model yükseltici entegre seçilmiştir.

FV panel çıkış gerilimi, şarj entegresi giriş gerilim aralığına uygun olmayabileceğinden 3,8 V ile 55 V arasındaki gerilimleri 5 V seviyesine indirebilmek için MP4559DN-LF-Z – regülatör entegresi kullanılmıştır. PCB kart tasarımında kart ile sensör ve FV panel bağlantılarının yapılması ve ölçme kartının programlanabilmesi için kartın dışarı ile bağlantı yapması gereken noktalar mevcuttur. Bu bağlantı noktaları için çeşitli konnektörler kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Yapılan kapsamlı literatür araştırmasında tez konusuna benzer çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmaların avantaj ve dezavantajları değerlendirilerek tez kapsamında yapılacak çalışmanın detayları belirlenmiştir. Tez çalışmasının amacına yönelik olarak belirlenen fonksiyonların sağlanabilmesi için kullanılacak komponentler seçilirken, sistemin düşük maliyetli olması ve düşük güç tüketimine sahip olması en önemli parametreler olmuştur.

3.2.1. Ölçüm devresinin tasarlanması

Tez çalışmasında akım, gerilim, güneş radyasyonu ve sıcaklık verilerinin ölçümünün gerçekleştirildiği, bu ölçümleri işleyerek üzerinde bulunan kablosuz haberleşme modülü (LoRa) sayesinde MKB'ye aktarıldığı birim ölçüm devresi olarak isimlendirilmiştir. Ölçüm devresinin tasarlanma sürecinde kullanılan yöntemler bu bölümde detaylıca aktarılmıştır.

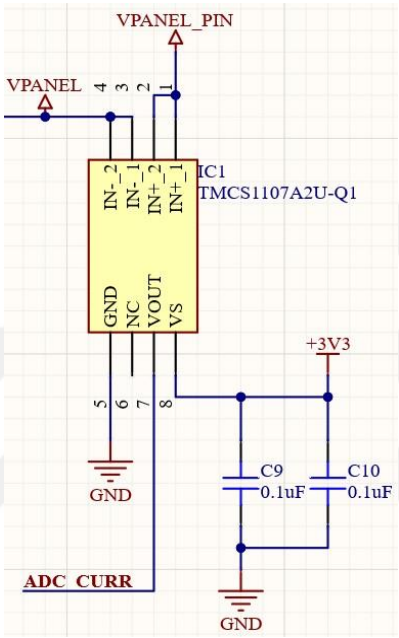
3.2.1.1 Akım ölçümü

Seçilen TMCS1107A2U-Q1 sensörü 3,3 V ile beslendiğinde –2,8 A ile 27,7 A arasındaki akımları ölçebilmektedir. Sensör gerilim çıkışlı bir sensördür. Çıkıştaki bu gerilim değeri mikrodenetleyicinin ADC pinlerinden birisine bağlanarak ölçüm yapılır. ESP32-WROOM-32E tarafından ölçülen sinyal daha sonra 0 ile 4095 arasında bir değere atanır; burada 0 V, 0'a ve 3,3 V, 4095'e karşılık gelir. 0 V ile 3,3 V arasındaki herhangi bir gerilime, aradaki karşılık gelen değer verilir.

Akım ölçümü sensör kataloğuna verilen eşitliklere göre [183], Denklem 3.1'de belirtildiği gibi yapılmıştır.

$$I_{IN,MAX+} = \left(V_{OUT,max} - V_{OUT,0A}\right) \div S \quad (3.1)$$

$I_{IN,MAX+}$, maksimum lineer ölçülebilir pozitif giriş akımıdır. S, kullanılan sensör modelinin hassasiyetidir. Seçilen sensör modeli için 100 mV/A'dir. $V_{OUT,0A}$, sıfır akım çıkış gerilimidir. $V_{OUT,max}$ ise sensörün maksimum akım çıkış gerilimini temsil eder.



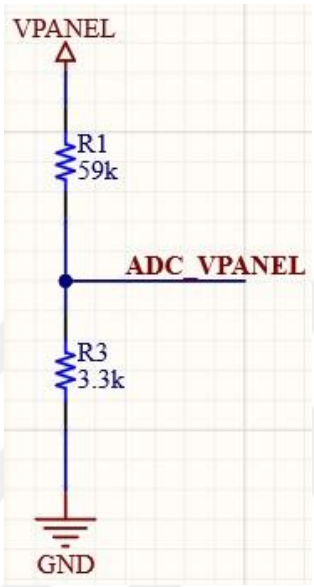
Şekil 3. 8 Akım sensörü devre bağlantı şematiği

Şekil 3.8'de akım sensörünün bağlantılarının gösterildiği şematik verilmiştir. VPANEL_PIN, akımı ölçülecek panelden gelen pozitif ucu, VPANEL, pozitif ucun akım sensörü devresinden çıkışını temsil etmektedir. ADC_CURR, sensör çıkışının mikrodenetleyiciye bağlandığı pini temsil eder. Sensör besleme girişinde (V_s) gürültüyü azaltmak amacıyla iki adet 0,1 µF kapasitör kullanılmıştır.

3.2.1.2 Gerilim ölçümü

Gerilim ölçümü için dikkate alınacak maksimum değer FV panelin açık devre gerilimidir. Gerilim bölücü devre ile, FV panel çıkış gerilimi, mikrodenetleyicinin ölçebileceği bir gerilim değerine indirgenmiştir. 600 W ve 605 W gücündeki iki FV panel için V_{oc} değerinin sırasıyla 54,2 V ve 41,7 V olduğu görülmüştür [180,191]. Direnç seçimi yapılırken ölçülebilecek maksimum gerilim değeri, bu değerlerin daha üzerinde olan 63

V olarak seçilmiştir. Fakat bölücü devredeki direnç değerleri değiştirilerek belirtilen değerden daha yüksek gerilim değerleri ölçülebilecektir. Burada bir üst sınır koyulmasındaki amaç ölçüm hassasiyetini maksimum düzeyde tutmaktır. Oluşturulan gerilim bölücü devre Şekil 3.9'da görülebilir. Burada VPANEL, panel gerilimini ADC_VPANEL ise mikrodenetleyicinin panel gerilimi için atanan pinini temsil etmektedir.



Şekil 3. 9 Gerilim bölücü devre şematiği

3.2.1.3 Sıcaklık ölçümü

DS18B20 dijital sıcaklık sensörünün dış ortama uyumlu modeli kullanılarak sıcaklık ölçülmüştür. Sensör paslanmaz çelik başlık ve silikon dış gövde ile yalıtılmış olduğundan sudan etkilenmemektedir.

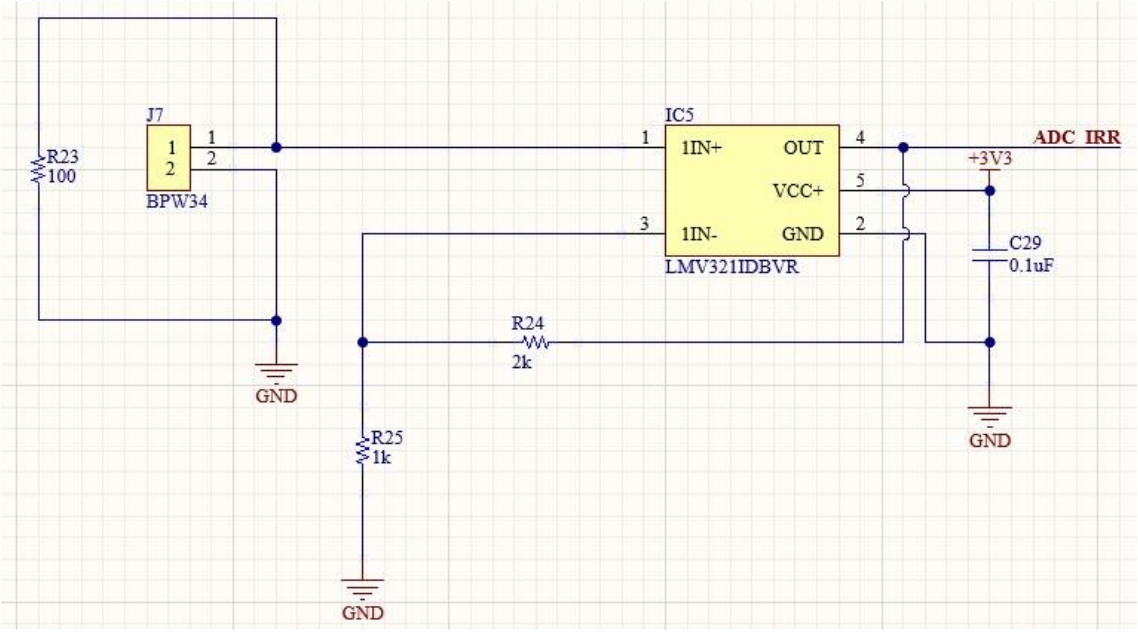
Daha doğru ölçümler alabilmek için sensör FV panelin arka yüzeyinin ortasına monte edilmiştir. Sıcaklık ölçümü için geliştirilen yazılımda ise OneWire kütüphanesi kullanılmıştır. Ölçüm doğruluğunu arttırmak için 10 ms'de gerçekleştirilen 100 adet ölçümün ortalaması alınmıştır.

3.2.1.4 Güneş radyasyonu ölçümü

Toplam güneş radyasyonunu ölçmek genellikle piranometre cihazları kullanılır. Profesyonel piranometre cihazlarının maliyetinin yüksek olması nedeniyle düşük maliyetli sistemlerde fotodiyot ve referans hücre yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu

tez çalışmasında sunulan sistemin düşük maliyetli olması amaçlanmıştır; bu nedenle güneş radyasyonu ölçümü piranometre yerine BW34 model silikon fotodiyot ile yapılmaktadır. Fotodiyot tarafından üretilen akım, fotodiyot çıkışına bağlı direnç üzerindeki gerilim düşüşü üzerinden ölçülür. Güneş radyasyon değerindeki büyük değişikliklere rağmen ölçülen gerilim mV seviyelerinde değişiklik göstermektedir. Bu sebeple daha sağlıklı ölçüm için bir yükselteç devresi kullanılmıştır. Yükselteç devresinde LMV321IDBVR model işlemsel yükselteç kullanılmıştır. Çalışma geriliminin 3,3 V olması, kurulan devredeki tüm komponentlerin aynı besleme gerilimi ile çalışabilmesi açısından tercih sebebidir. Bu sayede fazladan gerilim regülasyonuna ihtiyaç kalmamıştır.

Şekil 3.10'da güneş radyasyonu ölçümü için kurulan devrenin şematiği görülmektedir. Fotodiyot akımı R23 direnci üzerinden geçerek bir gerilim düşümüne sebep olur. Bu gerilim değeri yükselteç devresi girişine bağlıdır ve kazanç oranı kadar yükseltilerek çıkışa aktarılmıştır. Yükselteç devresi çıkışının mikrodenetleyiciye bağlandığı pin ADC_IRR olarak isimlendirilmiştir. Burada yükselteç devresinin kazanç oranı 3 olarak belirlenmiştir. Gürültülü veya yüksek empedanslı güç kaynaklarından gelen kuplaj hatalarını azaltmak için güç kaynağı pinlerinin yakınına 0,1 µF bypass (dekuplaj) kondansatörü yerleştirilmiştir.



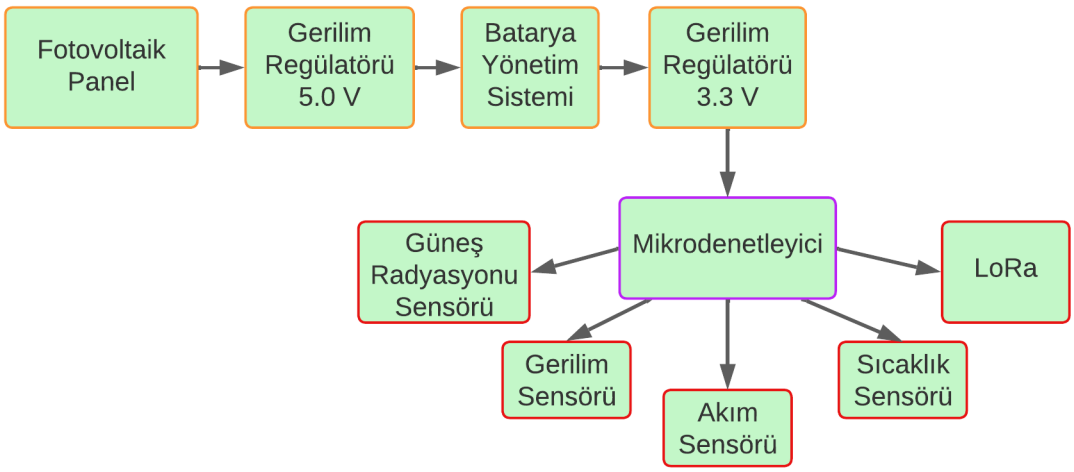
Şekil 3. 10 BPW34 fotodiyotu ile güneş radyasyonu ölçülen devrenin şematiği

Silikon fotodiyot, ölçüm sonuçları, aynı koşullar altında profesyonel bir piranometre

(KIMO CR-100) ve ile karşılaştırılarak kalibre edilmiştir.

3.2.1.5 PCB tasarım ve dizgisinin yapılması

Yapılan ölçümlerin hassasiyeti ve doğruluğu açısından, iletken ve yalıtkan kısımların tamamen görevini yerine getirdiği, bağlantı problemlerinin yaşanmadığı bir devre tasarımı gereksinimi doğmuştur. Ayrıca oluşturulan ölçme sisteminin FV panele kolaylıkla entegre edilebilmesi açısından da sabit ve dayanıklı bir devre gerekmektedir. Bu ihtiyaçları karşılaması dikkate alınarak PCB tasarımı yapılmıştır. Şematik ve PCB tasarıma başlamadan önce devrenin blok diyagramı oluşturulmuştur. Şekil 3.11'de oluşturulan ölçüm devresi diyagramı görülmektedir. Blok diyagramının çizilmesi, oluşturulacak devrenin bölümlere ayrılması açısından önemlidir. Böylece şematik ve PCB çizimi için planlama kolaylaşmıştır.



Şekil 3. 11 Ölçüm devresi blok diyagramı

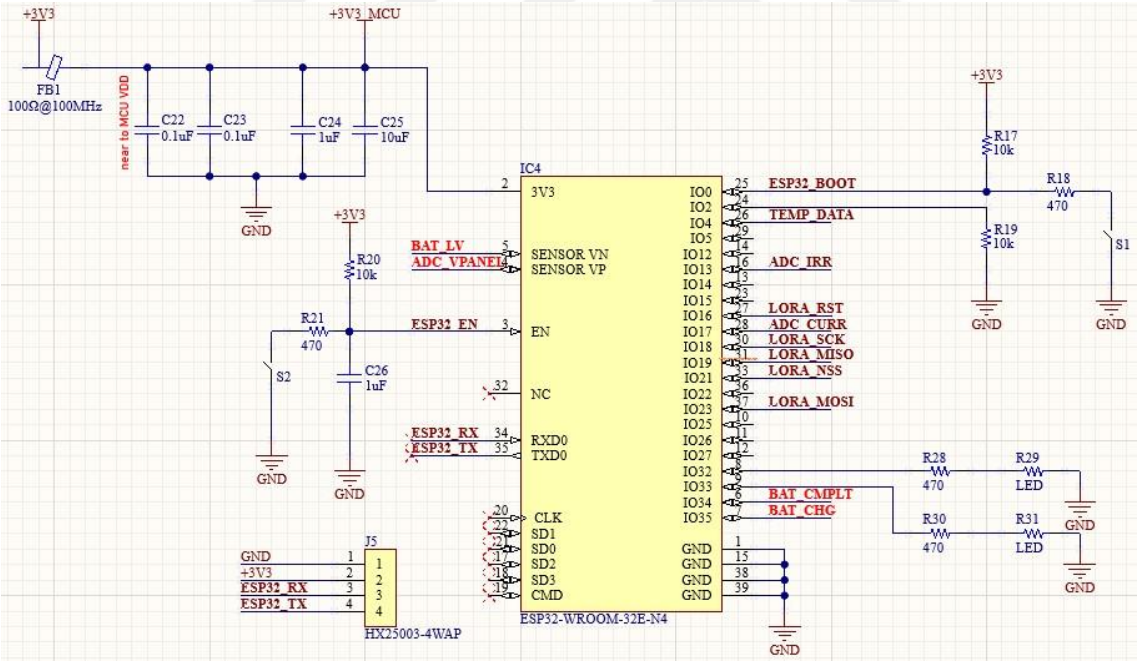
Bir sonraki adımda kullanılacak devre şematikleri oluşturulmuştur. Komponentler varsa hazır kütüphanelerden indirilerek, yoksa da manuel olarak oluşturularak proje şematiğine eklenmiştir. Ölçüm devresinin bütünü birçok devre elemanından oluştuğu için, şematik tasarlanırken her bir devre elemanın 'parametreler' sekmesine ilgili elemanın Üretici Parça Numarası (MPN) kaydedilmiştir. Bu sayede PCB tasarım tamamlandığında, bütün devre elemanlarının toplu olarak listelendiği Malzeme Listesi (BoM) dosyası Altium Designer programından indirildiğinde, ürünlere erişimde kolaylık sağlamaktadır.

Panel çıkışları ile devre arasındaki bağlantıdaki en önemli devre elemanı, MP4559 gerilim regülatörü entegresidir. Entegre pinlerine bağlanan kondansatör ve direnç gibi

devre elemanları, girişe uygulanan 3,8 V ile 55 V aralığındaki gerilim değerini, 5 V'a getirecek şekilde konfigüre edilmiştir. Bu şekilde panelden gelen yüksek gerilim değerleri, ölçüm devresini beslemek ve pili şarj etmek için istenilen seviyeye ayarlanmıştır.

Gerilim regülasyonu yapıldıktan sonra, gerektiğinde devreyi besleyecek ve FV panelden şarj olabilecek bataryanın, batarya yönetim sistemi oluşturulmuştur. TP4056 şarj entegresi, FV panelden yeterli akım ve gerilim sağlandığında bataryayı 0,5 A ile ile şarj edecek şekilde konfigüre edilmiştir.

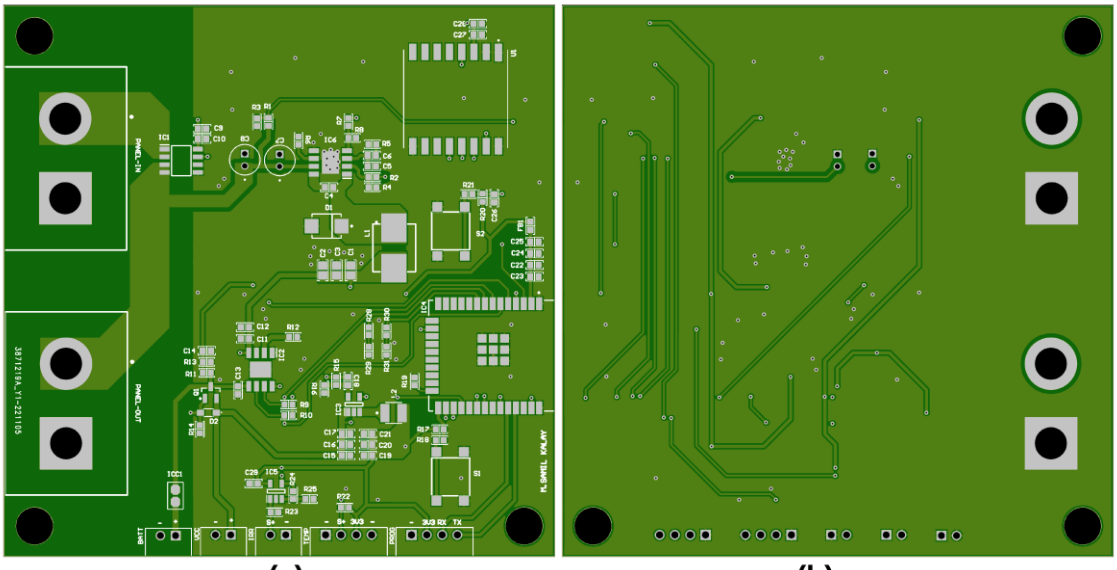
Devrenin diğer kısımlarındaki şematik tasarımı tamamlandıktan sonra ilgili kısımların mikrodenetleyici ile bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Burada pin bağlantılar analog veya dijital pin, SPI haberleşme pinleri ve benzeri özelliklerine göre seçilmiştir. PCB çizim yapılırken, iletken yolların çiziminde kolaylık sağlaması açısından bazı pinler sonradan değiştirilmiştir. Mikrodenetleyici şematik tasarımı Şekil 3.12'deki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 12 Ölçme devresi mikrodenetleyicisinin şematik tasarımı

Şematik tasarımlar yapıldıktan sonra Altium Designer programında PCB projesi kısmına geçilmiştir. Bu kısımda, şematik tasarımda kullanılan komponentlerin PCB çizimleri, program tarafından otomatik olarak PCB çizim sayfasına aktarılmaktadır.

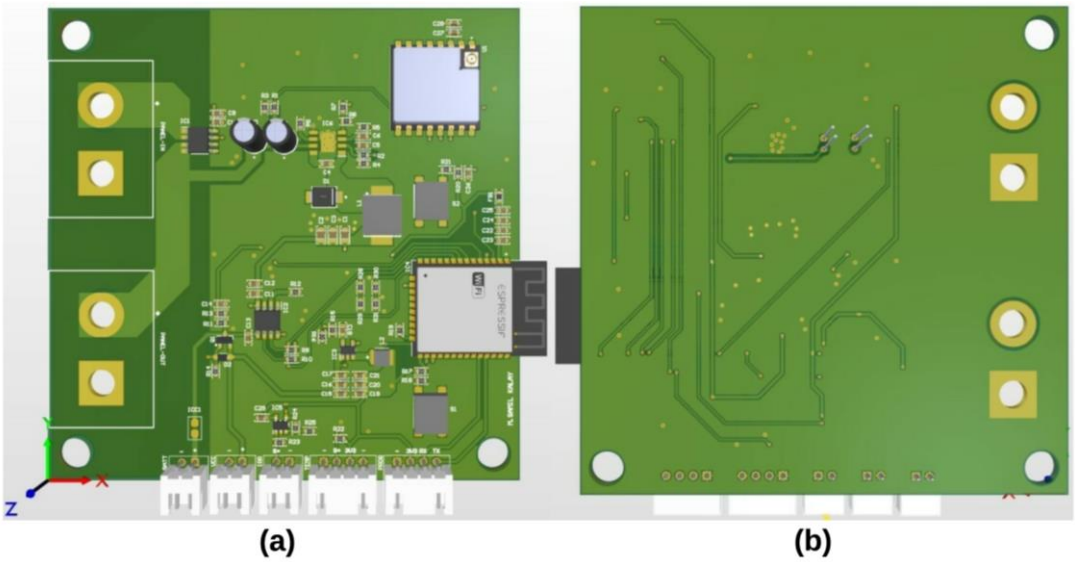
Ölçme devresi dışındaki komponentlerin devreye bağlantısı konnektörler yardımı ile yapılacak şekilde tasarlanmıştır. FV panel çıkışlarının PCB'ye bağlantısı 40 A'e kadar dayanabilen büyük konnektörler ile sağlanmıştır. FV panel bağlantısının yapılacağı konnektörler ve tüm akımın üzerinden geçeceği akım sensörü, devrenin diğer kısımları ile arasında mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bunun sebebi yüksek akımın gürültü üreterek, diğer devre elemanlarının çalışmasını olumsuz etkilememesidir. FV panel akımının geçeceği iletken yolun devreye olumsuz etki etmemesi açısından bu kısım oldukça kısa çizilmiştir. Panelin tüm akımının geçeceği iletken yollar diğerlerine oranla çok daha geniştir. Böylece devrede aşırı ısınmaların önüne geçmek hedeflenmiştir. Tüm konnektörler, kullanım kolaylığı düşünülerek PCB'nin kenar bölgelerine yerleştirilmiştir. Bağlantı yapılacak konnektörlerin karıştırılmaması için bağlantı noktası isimleri devre kartı üzerine basılmıştır. LoRa modülünün anten bağlantının yapılacağı kısım da PCB'nin köşe noktasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Devrede gürültünün minimuma indirilmesi için boş yüzeylerin büyük bir kısmı GND (referans noktası) ile kaplanmıştır. Şekil 3.13'te PCB tasarımın Altium üzerindeki ön (a) ve arka (b) yüzünün görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 13 PCB tasarımın Altium üzerindeki ön yüzü (a) ve arka yüzünün (b) görüntüsü

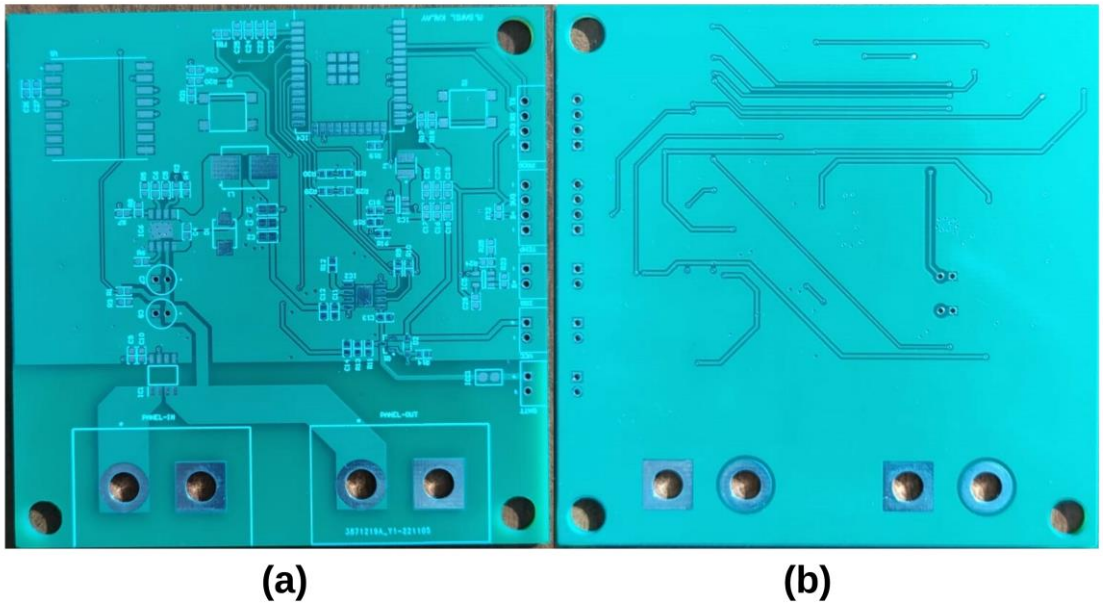
Ölçüm devresi, basım maliyetleri ve kullanılan devre elemanlarının boyutları gözetilerek 9 cm x 9 cm boyutlarında 2 katlı olarak tasarlanmıştır. Devrenin yüksekliği ise 1,5 cm'dir. PCB tasarımın üç boyutlu görüntüsü, üst yüzü (a) ve alt yüzü (b) Şekil 3.14'te

görülmektedir.



Şekil 3. 14 PCB tasarımınn üç boyutlu üst yüzü (a) ve alt yüzü (b) görüntüsü

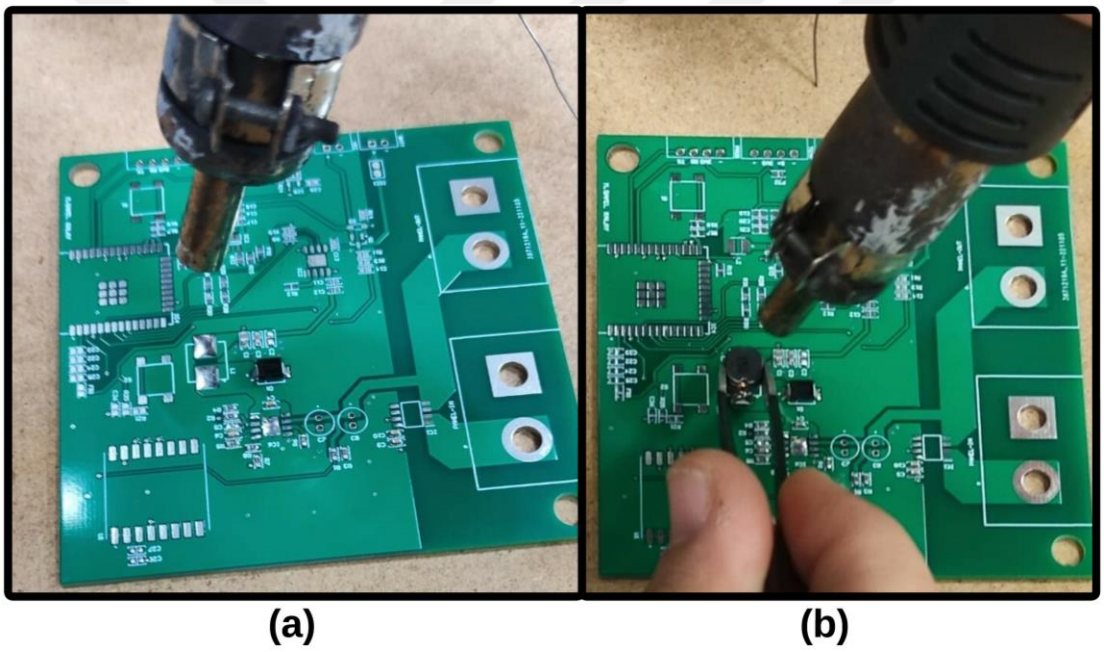
PCB tasarım tamamlandıktan sonra baskı için proje dosyalarının çıktısı alınarak, baskının yapılacağı firmaya iletilmiştir. PCB kartların baskı sonrası ilk hali Şekil 3.15'te, ön yüzü (a) ve arka yüzü (b) olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 15 Baskı sonrası PCB'lerin ön yüzü (a) ve arka yüzü (b)

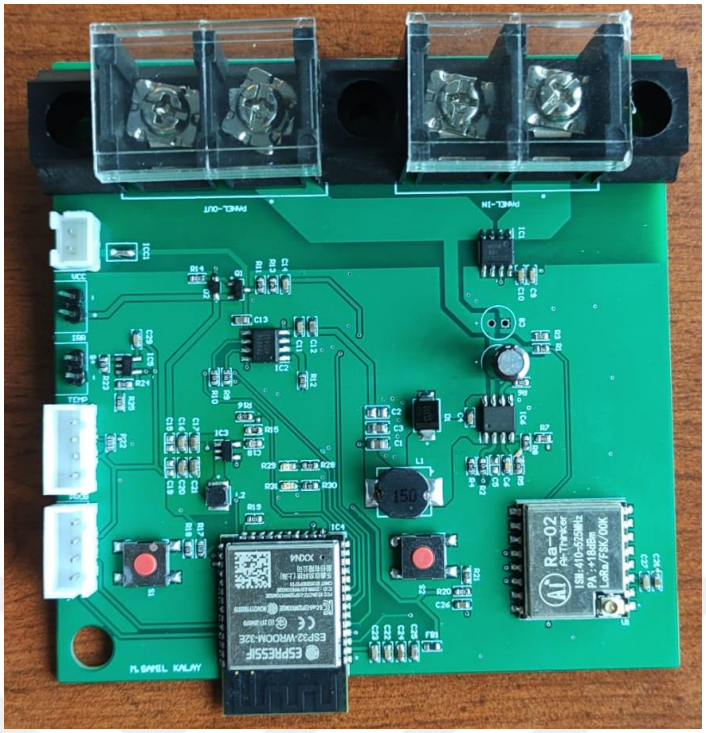
Devredeki yollarda herhangi bir iletim veya yalıtım problemi olma ihtimaline karşın

çeşitli testler yapılmıştır. Testler sonucunda bir probleme rastlanmamıştır. Sipariş edilen tüm komponentlerin ulaşması ile beraber kart üzerinde dizgi işlemi aşamasına geçilmiştir. Dizgi sırasında dikkat edilmesi gereken birkaç önemli nokta vardır. Özellikle küçük boyutlu komponentlerin kullanıldığı devrelerde, lehimlenecek bacaklar arasındaki mesafeler çok kısa olmaktadır. Kısa ve küçük kısımlarda lehim yapması da oldukça zordur. Oluşabilecek hataları minimuma indirmek için ilk önce havya ve sıcak hava tabancası kullanılarak PCB üzerinde komponentlerin yerleştirileceği yerlere az miktarda lehim eritilerek bırakılmıştır. Komponentler ilgili bölümlere lehimlenirken ise sıcak hava tabancası ile o bölgedeki lehim eritilerek, cımbız yardımı ile dizgi işlemi yapılmıştır. Şekil 3.16'da sıcak hava tabancası ile o bölgedeki lehimin eritilmesi (a) ve eriyen kısma komponentin yerleştirilmesi (b) anları gösterilmiştir.



Şekil 3. 16 Bağlantı noktaları üzerine lehimin eritilmesi (a) ve komponentlerin yerleştirilmesi (b)

Dizgi yapılırken, bölüm bölüm (güç yönetimi, batarya yönetim sistemi, sensörler vb.) ilerlenmiştir ve her bölüm bittiğinde herhangi bir olumsuzluk olup olmadığı multimetre yardımı ile test edilmiştir. Aksi takdirde, dizginin tamamı bittikten sonra oluşabilecek bir hatanın teşhis edilmesi uzun zaman alabilir. Ölçüm kartının, dizgi işlemi sona erdikten sonraki hali Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 17 Dizgi işlemi tamamlanan ölçüm kartı

Dizginin tamamlanmasının ardından, devreye güç verilerek devrenin bazı fonksiyonları test edilmiştir. Örneğin DC güç kaynağı, FV panellerin devreye bağlanacağı noktadan bağlanarak kademeli olarak akım ve gerilim verilmiştir. Verilen akım ve gerilim değerine göre devrenin davranışı multimetre yardımı ile çeşitli noktalardan ölçülerek devrenin bazı fonksiyonları test edilmiştir. Daha sonra Li-Po batarya devreye bağlanarak, devrenin çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Güç kaynağı ve Li-Po batarya aynı anda bağlandığında, devrenin hangisi üzerinden beslendiği ve bataryanın şarj olma fonksiyonları test edilmiştir. Analog çıkışlı olan akım sensörü ile ilgili testler yapılırken, sensörün mikrodenetleyici bağlantısının dijital pin üzerinden yapıldığı fark edilmiştir. Boşta olan bir analog pine kablo ile atlama yapılarak bu sorun çözülmüştür.

3.2.1.6 Ölçüm devresi yazılımının geliştirmesi

Testler sonrasında programlama kısmına geçilmiştir. İlk olarak Arduino IDE üzerinde ESP 32 Wroom mikrodenetleyicisini programlamak için ilgili kütüphaneler indirilmiş ve parametreler ayarlanmıştır. Sensörlerden gelen verilerin anlamlandırılması için ilgili kütüphaneler indirilmiştir. ESP 32 Wroom mikrodenetleyicisinde analog veri okurken, referans gerilimi (V_{ref}) değiştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında V_{ref} 3,3 V olarak ayarlanmıştır. İlk olarak panel gerilimini ölçmek için tasarlanan gerilim bölücü devrede

3.3 kΩ üzerindeki gerilimi ölçen kod yazılarak başlanmıştır. Ölçülen gerilim, gerilim bölücü devre oranında büyültülerek panel gerilim değeri *PVvoltage* değişkenine atanmıştır.

Mikrodenetleyici programlanırken CP2102 USB TTL dönüştürücü modül kullanılmıştır. PCB'nin programlama pinlerine dönüştürücü modül bağlantısı yapılarak kod atılmıştır.

Sıcaklık sensörü için OneWire ve DallasTemperature kütüphaneleri indirilmiştir. Yazılan kod içerisinde de DS18B20 sıcaklık sensörünün bağlı olduğu 4 numaralı pin konfigüre edilmiştir. Sıcaklık sensörünün ölçüm kartına bağlantısı gerçekleştirilerek yazılan kod çalıştırılmıştır. Ölçüm kartı yazılımında akım, güneş radyasyonu ve batarya gerilimi de ölçülerek hesaplanmıştır. Hesaplanan tüm veriler kablosuz olarak MKB'ye aktarılmadan önce tek bir satır haline getirilmiştir. Tüm verilerin tek bir satır halinde iletilmesi ile veri kayıplarının minimuma indirilmesi amaçlanmıştır.

LoRa haberleşmesi için Arduino IDE üzerinde LoRa kütüphanesi indirilmiştir. Veri aktarımı için, indirilen kütüphanenin bir fonksiyonu olan LoRa.print() kullanılmıştır. Bu bölümde yazılan kod sayesinde LoRa.print() fonksiyonunda parantez içerisine yazılan karakterlerler, dakikada bir olmak üzere alıcı LoRa'ya göndermektedir. 433 MHz frekansında çalışan LoRa modülleri için, 125 kHz bant genişliğinde iletişim tercih edilmiştir.

Laboratuvar ortamında yapılan testler ve iyileştirmelerden sonra, ölçüm kartının içerisinde konulacağı kutu tasarlanmıştır. Anten, sıcaklık sensörü, ışınım sensörü ve panelden gelen kabloların devreye takılacağı kısımlar belirlenerek kutuya uygun ölçülerde delikler açılmıştır. Dış ortamdandan etkilenmemesi için kutudan kabloların çıktığı kısımlara sıcak silikon uygulamıştır.

3.2.1.7 Ölçüm devresinin fotovoltaik panele entegrasyonu

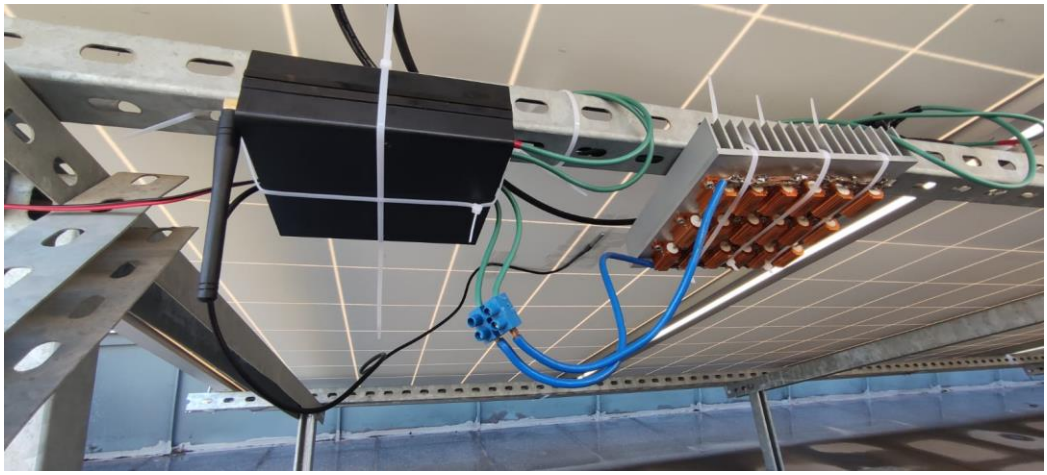
Ölçüm devresisi, laboratuvar ortamındaki testlerinin tamamlanmasının ardından kutu içerisine yerleştirilmiştir.

Panelin çıkışlarına bağlanmak üzere 4,1 Ω değerinde alüminyum dirençlerden oluşan yük tasarlanmıştır. Yükün aşırı ısınmasını önlemek için dirençler alüminyum soğutucu üzerine vidalanmıştır. Tasarlanan yük Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

+-

Şekil 3. 18 Panel uçlarına bağlanmak üzere tasarlanan alüminyum dirençlerden oluşan yük

Tasarlanan ölçüm devresi, Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi T4 blok terasında 395 W gücündeki KY-395M-72F-GB model panelin alt tarafına Şekil 3.19'da görüldüğü gibi kablo bağları kullanılarak monte edilmiştir.



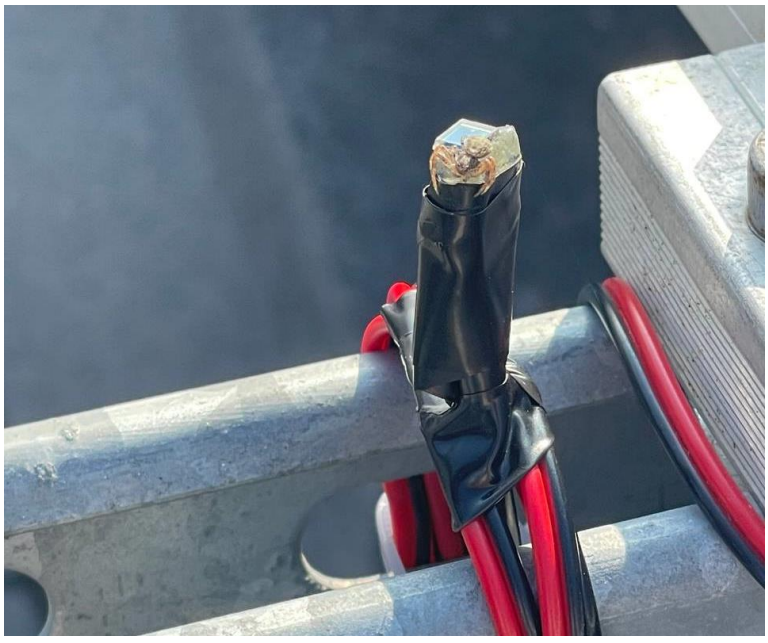
Şekil 3. 19 Geliştirilen ölçüm sisteminin KY-395M-72F-GB model panel üzerine kurulumuş hali

FV panel çıkışları ölçüm devresine ve yüklere konnektörler yardımı ile bağlanarak sabitlenmiştir. Sıcaklık sensörü Şekil 3.20'de görüldüğü gibi panelin arka tarafının orta noktasına denk gelecek ve yüzey ile temas edecek şekilde yapıştırılmıştır.



Şekil 3. 20 Sıcaklık sensörünün panelin arka tarafına yapıştırılması

Fotodiyot, panel yüzeyine gelen güneş radyasyonunun doğru bir şekilde ölçülebilmesi için, panelin yakınında ve panel ile aynı hizada olacak şekilde konumlandırılmıştır. Kablo bağları ile sabitlenen fotodiyot Şekil 3.21'de görülmektedir.



Şekil 3. 21 Fotodiyotun panel üzerindeki yerleşimi

3.2.2. Merkezi kayıt biriminin tasarlanması

FV santral alanlarının şekli ve kurulu güç – alan oranı değişiklik göstermektedir. 1 MW kurulu güce sahip bir santralin yaklaşık 20 dönüm alan kapladığı bilinmektedir [192]. Veri toplama işlemi her bir panel seviyesinde yapıldığında ve büyük ölçekli santraller göz önüne alındığında çok sayıda veri toplama kartından söz edilebilir. Bu işlem kablo ile yapıldığında kablo maliyeti ve karmaşası meydana gelecektir. Bu yüzden bu tezde panellerden ölçülen veriler kablosuz olarak aktarılmıştır. Bütün verilerin toplandığı MKB, bütün panellere ait verileri hem üzerinde depolayıp hem de internet bağlantısı sayesinde uzaktan erişime açmaktadır. MKB olarak Raspberry Pi 3B model cihaz kullanılmıştır. LoRa modülünden gelen veriler, ilk önce bir Arduino Nano kartının SPI pinleri aracılığıyla okunmuştur. Arduino tarafında okunan veriler USB seri haberleşmesi ile Raspberry Pi cihazına aktarılmıştır. Raspberry Pi tarafında Python programlama dili ile geliştirilen yazılım sayesinde dakikada bir alınan veriler aynı anda hem bir Microsoft Excel dokümanına hem de Thingspeak IoT platformuna aktarılmıştır. MKB, verinin geldiği tarih, saat, dakika ve saniye bilgilerini de kayıt altına almaktadır. Gelen verilerin kaydedildiği Microsoft Excel dokümanına ait ekran görüntüsü Şekil 3.22'de gösterilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Tarih	Panel ID	Batarya Gerilimi (V	Panel Gerilimi(V)	Panel Akımı (A)	Güneş Radyasyonu (W/m2)	Panel Sıcaklığı (C)	Sarj durumu (1 = Sarj oluyor
2	2022-12-31 11:42:00	1	4.18	12.56	3.02	284	28.12	1
3	2022-12-31 11:43:03	1	4.18	12.67	3.13	284	28.19	1
4	2022-12-31 11:44:06	1	4.18	12.90	3.16	284	28.19	1
5	2022-12-31 11:45:09	1	4.18	12.98	3.15	284	28.12	1
6	2022-12-31 11:46:12	1	4.19	13.04	3.16	284	27.94	1
7	2022-12-31 11:47:16	1	4.16	13.34	3.25	284	27.69	0
8	2022-12-31 11:48:19	1	4.15	13.60	3.28	292	27.44	0
9	2022-12-31 11:49:22	1	4.15	13.81	3.29	300	27.13	0
10	2022-12-31 11:50:26	1	4.15	13.80	3.35	296	27.13	0
11	2022-12-31 11:51:29	1	4.15	13.83	3.32	296	27.25	0
12	2022-12-31 11:52:33	1	4.15	13.98	3.38	304	27.31	0
13	2022-12-31 11:53:36	1	4.15	13.93	3.32	296	27.50	0
14	2022-12-31 11:54:40	1	4.15	13.83	3.34	280	27.31	0
15	2022-12-31 11:55:43	1	4.15	14.27	3.48	300	27.06	0
16	2022-12-31 11:56:46	1	4.15	14.51	3.55	308	27.13	0
17	2022-12-31 11:57:50	1	4.15	14.40	3.49	292	27.19	0
18	2022-12-31 11:58:53	1	4.15	14.52	3.49	296	27.19	0
19	2022-12-31 11:59:57	1	4.15	14.95	3.57	308	27.13	0
20	2022-12-31 12:01:00	1	4.15	14.90	3.58	300	27.00	0
21	2022-12-31 12:02:04	1	4.14	14.86	3.60	296	27.00	0
22	2022-12-31 12:03:07	1	4.14	15.19	3.65	304	27.31	0

Şekil 3. 22 MKB'de Excel dokümanına kaydedilen ölçüm verilerinin görüntüsü

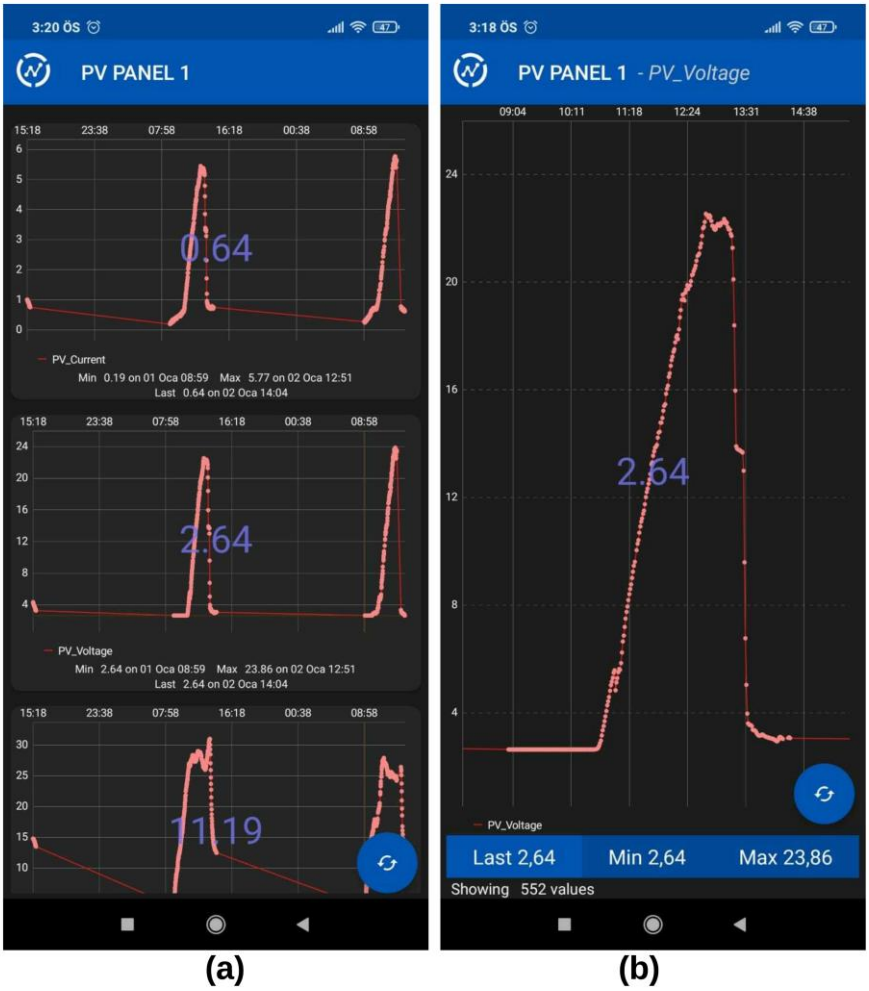
Thingspeak platformuna aktarılan veriler, web arayüzünde grafik üzerinde gösterilmektedir. Bu veriler aynı zamanda Google Play ve App Store uygulama mağazalarından indirilebilen ThingView uygulaması ile cep telefonundan da takip edilebilmektedir. Bu kısımda Panel Gerilimi, Panel Akımı, Sıcaklık ve Güneş

Radyasyonu başlıkları ile oluşturulan grafiklerin yanı sıra batarya geriliminin ve batarya şarj durumunun da görüntülenebileceği grafikler oluşturulmuştur. Şekil 3.23'te Thingspeak platformu üzerinden izlenebilen Panel Akımı, Panel Gerilimi, Panel Sıcaklığı ve Güneş Radyasyonu grafikleri verilmiştir.



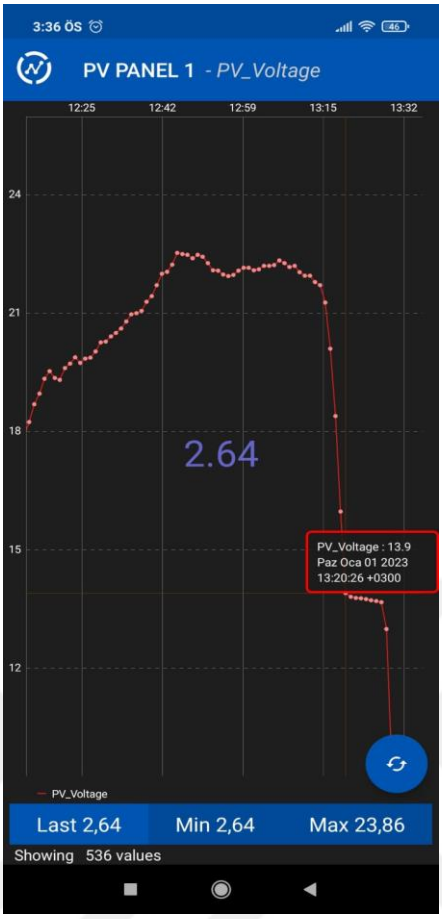
Şekil 3. 23 Thingspeak platformu üzerinden izlenebilen Panel Akımı, Panel Gerilimi, Panel Sıcaklığı ve Güneş Radyasyonu grafikleri

Bilgisayardan erişimin zor olduğu veya mümkün olmadığı durumlarda, verilere daha kolay erişim için mobil uygulama tarafında da verilere erişim mümkündür. Cep telefonundan erişim için ThingView mobil uygulaması kullanılmıştır. ThingView mobil uygulamasında panel verilerine ait grafiklerin genel görünümü (a) ve panel gerilim grafiğine ait görünüm (b), Şekil 3.24'te görülmektedir.



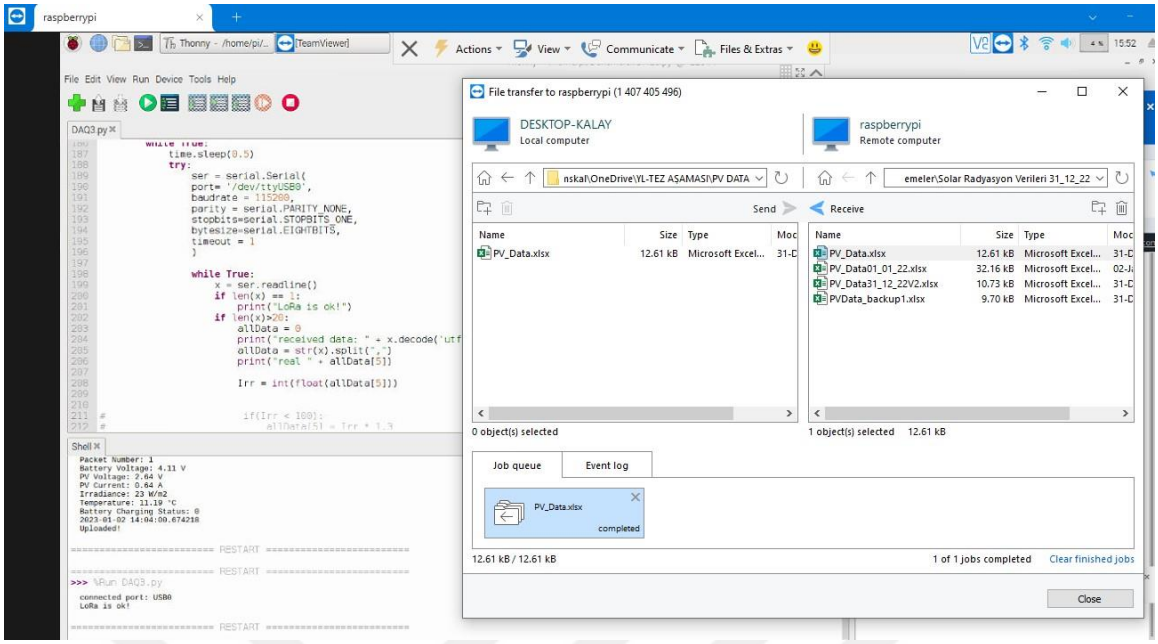
Şekil 3. 24 ThingView mobil uygulamasında panel verilerine ait grafiklerin genel görünümü (a) ve panel gerilim grafiğine ait görünüm (b)

ThingView mobil uygulaması, grafiklere ayrıntılı bakmak için Web arayüzünden daha avantajlıdır. Web arayüzünde grafiklerde yakınlaştırma vb. özellikler olmamasına karşın, mobil uygulamada herhangi bir andaki veriyi incelemek üzere o kısma yakınlaştırma yapılıp, grafiğe daha detaylı bakmak mümkündür. Şekil 3.25'te panelin geriliminin gözle görülür bir şekilde düştüğü ana yakınlaştırma yapılarak, ölçüm verisine ait detaylara bakıldığı ekran görüntüsü verilmiştir. Kırmızı kutu içerisinde, verinin geldiği tarih ve verinin tam değeri görülebilmektedir.



Şekil 3. 25 ThinView uygulamasında belli bir ölçüm verisine ait detaylara bakıldığı ekran görüntüsü

Ölçüm devresi, sadece ölçme ve ölçülen verileri merkeze aktarma işini yaparken, kalan bütün yazılım MKB üzerinde çalışmaktadır. Ölçülen verilerin internete aktarılmasında bir problem oluşması, yazılımda bir güncelleme gereksiniminin doğması veya MKB'nin verileri kaydettiği Excel dokümanına ulaşılmak istenmesi gibi durumlarda, her zaman FV enerji santrali operasyon merkezine ulaşım mümkün olmayacağı için uzaktan erişim imkanı sağlanmıştır (Şekil 3.26). Uzaktan erişim için TeamViewer yazılımı kullanılmıştır.

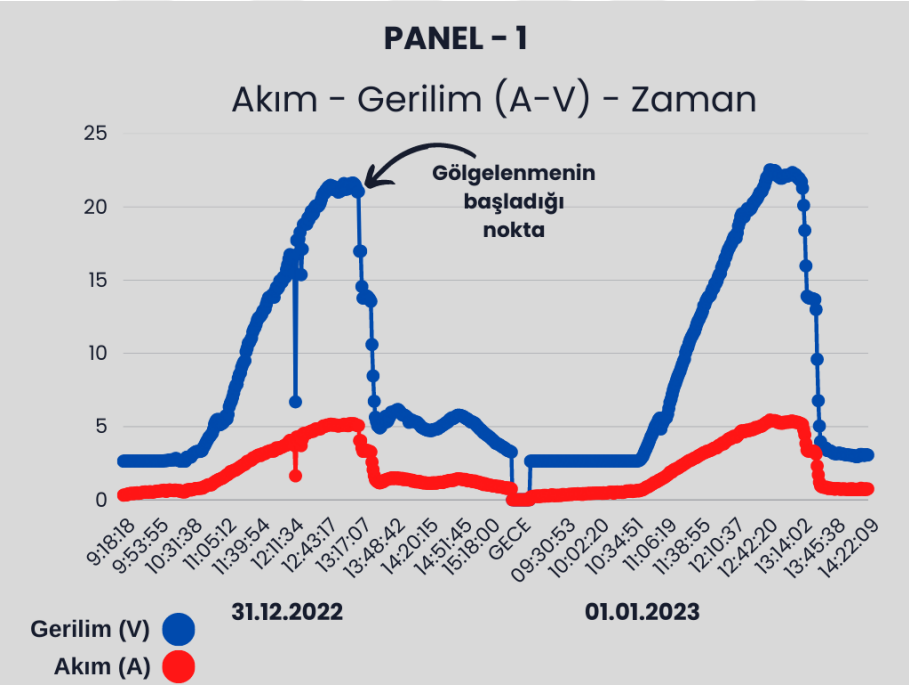


Şekil 3. 26 TeamViewer üzerinden, MKB'ye uzaktan erişim ile yazılım güncellemesi ve dosya transferi yapıldığı ekran görüntüsü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında FV paneller için tasarlanıp geliştirilen uzaktan izleme sisteminin çalışma performansı incelenmiş ve sunulmuştur. Örnek olarak iki gün boyunca toplanan veriler, kaydedildiği Microsoft Excel dokümanından alınarak detaylı grafikler şeklinde gösterilmiştir. Ölçülen verilerin doğruluğunun yanı sıra sistemin güç tüketim verileri hesaplanarak verilmiştir.

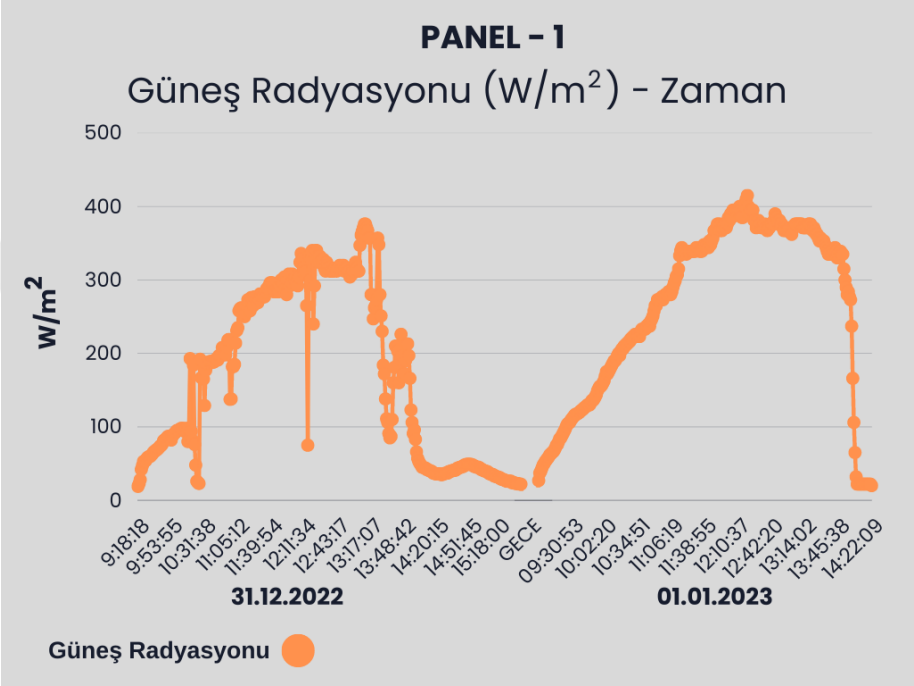
Geliştirilen sistemden 31.12.2022 ve 01.01.2023 tarihlerinde her bir dakikada bir ölçülerek kayıt altına alınan veriler, grafikler şeklinde verilmiştir. Enerji tüketiminin minimuma indirilmesi amacı ile güneş radyasyonu 20 W/m^2'nin altındayken sistem veri göndermeyi durdurmaktadır. Panelin yerleştirildiği konum sebebi ile saat 13:10'dan sonra kısmi gölgelenme olmakta ve panel üzerine düşen gölge giderek büyümektedir. Şekil 4.1'de ölçüm sisteminin kurulduğu FV panele ait belirtilen tarihlerdeki akım-gerilim-zaman grafiği görülmektedir. Panel üzerindeki gölgelenmenin akım ve gerilim değerlerine etkisi grafik üzerinde net bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 4. 1 31.12.2022 ve 01.01.2023 tarihlerinde ölçülen akım ve gerilim değerlerinin zamana bağlı grafikleri

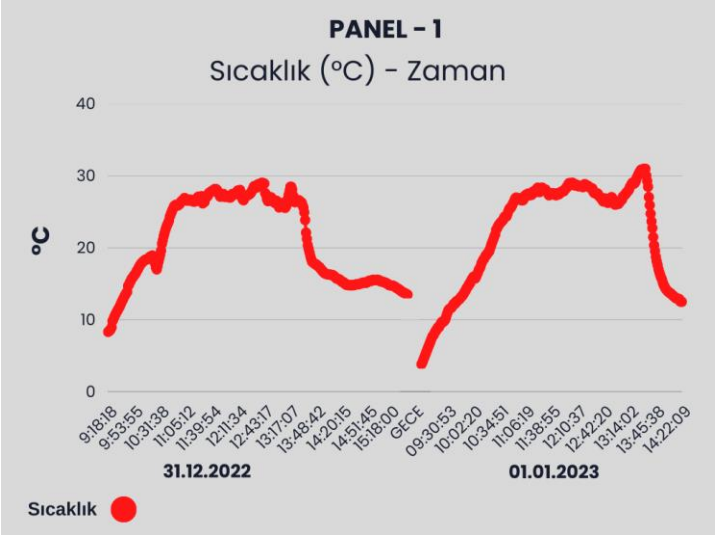
Geliştirilen sistemde gerilim ortalama %99, akım değeri ise %98 doğruluk ile ölçülmüştür.

Güneş radyasyonu, BPW34 model fotodiyotun kullanıldığı ölçüm devresi ile ±20 W/m^2 hata ile ölçülmüştür. Güneş radyasyonu değeri, FV panel performans verilerini yorumlamak için oldukça önemlidir. Örneğin, Şekil 4.2'de, 31.12.2022 tarihinde saat 12:11'de güneş radyasyonunda anlık düşüş gözlemlenmiştir. Aynı saatte gerilim ve akımdaki düşüş Şekil 4.1'de görülmektedir. İki grafiğe birlikte bakılarak, bu düşüşün bir arıza değil, geçici gölgelenme vb. bir durum olabileceği yorumlanabilir.



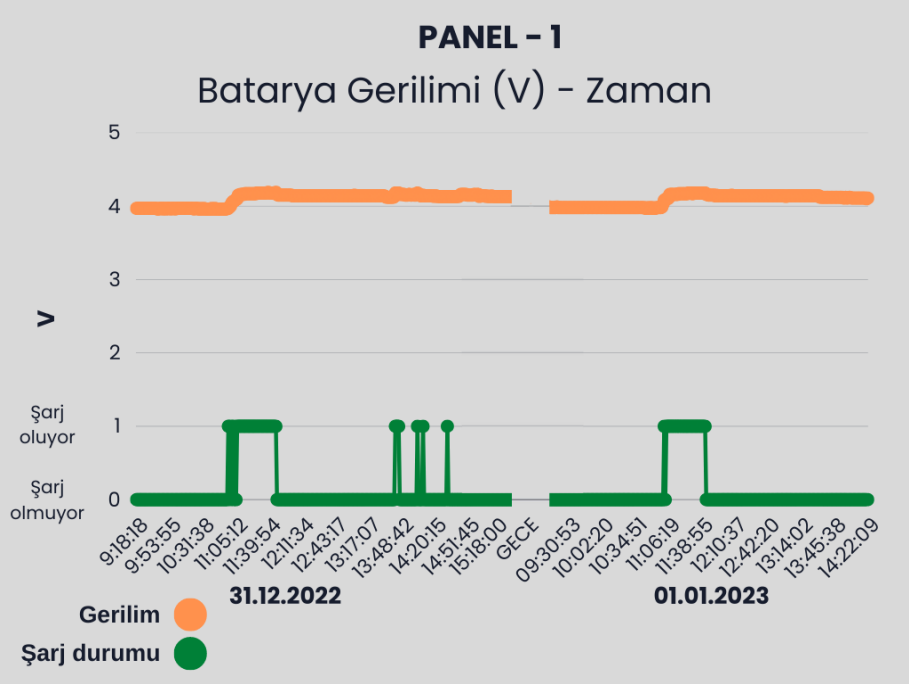
Şekil 4. 2 31.12.2022 ve 01.01.2023 tarihlerinde fotodiyot ile ölçülen güneş radyasyonu grafiği

Belirtilen tarihlerde yapılan sıcaklık ölçümleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Öğle saatlerinde panel arka yüzeyinden ölçülen sıcaklığın 30 °C civarına çıktığı gözlemlenmiştir. Gölgelenmenin başlamasından sonra ise sıcaklık sürekli bir düşüşe geçmektedir.



Şekil 4. 3 31.12.2022 ve 01.01.2023 tarihlerinde panelin arka yüzünden yapılan sıcaklık ölçümleri

Panel gerilimi 5 V'un altında iken ölçüm devresi üzerinde bulunan Li-Po batarya üzerinden beslenmektedir. Panel gerilimi 5 V üzerine çıktığında ise batarya şarj olmaya başlamakta ve ölçüm devresi güç ihtiyacını direkt olarak FV panelden sağlamaktadır. Bataryanın şarj ve deşarj durumu Şekil 4.4'te görülmektedir. Bu grafik Şekil 4.1 ile beraber incelendiğinde panel geriliminin 5 V üzerinde çıktığında pilin şarj olmaya başladığı görülmektedir. Batarya 4,2 V iken tam şarj olmaktadır ve 4,1 V değerine düştüğünde tekrar şarj olmaya başlamaktadır. 31.12.2022 tarihinde gelen son veri paketinde batarya gerilimi 4,12 V'tur. Ertesi gün gelen ilk veride ise 3,98 V olarak ölçülmüştür. 1 S lityum polimer batarya gerilimi-doluluk oranı tablolarından anlaşılacağı üzere, bataryanın tüm gece boyunca sadece %15 tükendiği ölçülmüştür. Bu da bataryanın, sistemin dengeli çalışabilmesi için yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 4 Li-Po batarya gerilimi ve şarj durumunu gösteren grafik

Ölçüm sisteminin güç tüketimi Tablo 4.1'de verilmiştir. Mikrodenetleyici, dakikada bir kez bir saniye boyunca ölçüm yapıp veri gönderirken geri kalan 59 saniye derin uyku modunda kalmaktadır. Bu şekilde bataryanın uzun ömürlü olması ve enerji tüketiminin minimumda tutulması hedeflenmiştir. Ölçüm sistemi enerji tüketimi günde 1,95 Wh'dir.

Tablo 4. 1 Ölçüm devresi güç tüketim tablosu

Komponent/ Bileşen	**Çektiği akım**	**Günlük enerji tüketimi**
LoRa SX1278	120 mA	0,16 Wh
Gerilim bölücü devre	0.9 mA (V_{oc} değerinde)	1,21 Wh
ESP32 Wroom	~ 200 mA, (5 µA derin uyku modunda)	0,264 Wh 0,4 mWh
Sıcaklık sensörü	1,5 mA	0,02 Wh
Akım sensörü (TMCS1107A2U-Q1)	6 mA	0,08 Wh
Gerilim regülatörü 5 V (MP4559DN)	140 µA	0,18 Wh
Gerilim regülatörü 3 V (RT8059GJ5)	78 µA	0,01 Wh
Batarya yönetim sistemi (TP4056-EMSOP8)	55 µA (standby) 150 µA (şarjda)	0,007 Wh 0,018 Wh
Toplam güç tüketimi		**1,95 Wh**

Geliştirilen sistemin toplam maliyeti Tablo 4.2'de verilmiştir. Büyük bir FV santral alanında tek bir MKB olacağından, MKB'ye ait fiyatlar tabloya eklenmemiştir. Çok sayıda toplu ürün alımlarında toplam maliyet azalacaktır.

Tablo 4. 2 Ölçüm devresi maliyet tablosu

Komponent/ Bileşen	**Fiyat (USD)**
LoRa SX1278	4
ESP32 Wroom	4
Sıcaklık sensörü	1
Akım sensörü (TMCS1107A2U-Q1)	2,2
Gerilim regülatörü 5 V (MP4559DN)	1
Gerilim regülatörü 3 V (RT8059GJ5)	0,22
Batarya yönetim sistemi (TP4056-EMSOP8)	0,3
Diğer (direnç, kondansatör)	1
PCB baskı	1
Toplam fiyat	**14,72**

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma ile FV panele ait akım, gerilim, ışınım ve sıcaklık bilgileri yüksek doğrulukta ölçülerek uzaktaki merkeze aktarılmıştır. Bu verilerin aktarıldığı Merkezi Kayıt Birimi, aldığı verileri üzerindeki SD karta depolamış ve aynı zamanda internet ortamına aktarmıştır. İnternet bağlantısı olan herhangi bir yerden FV panele ait ölçülen veriler takip edilebilmektedir. Sistem, panel verimini minimum düzeyde etkileyecek şekilde ve mümkün olan en düşük maliyetle tasarlanmıştır.

Geliştirilen sistem ile geniş alanlardaki büyük çaplı FV santrallerde panel seviyesinde veri toplanması ve uzaktan izlenmesi mümkün olmuştur. Bu sayede panellerde meydana gelebilecek herhangi bir arıza, daha kısa sürede ve daha az iş gücü ile teşhis edilebilecektir. Teşhis edilen arızalara yapılacak hızlı müdahaleler ile enerji üretim kayıpları minimuma indirilerek, FV santral verimi arttırılabilecektir. Ayrıca santral operatörlerinin harcadığı iş gücü azalacağından, iş gücü maliyetinde de düşüş öngörülmektedir.

Ölçüm kartı ve MKB tasarlanırken bazı önemli tecrübeler edinilmiştir. Bu kısımda bu tecrübelerden yola çıkılarak öneriler sunulmuştur.

Ölçüm kartının panel bağlantı noktalarının normal konnektör yerine MC4 tipi solar konnektör olarak tasarlanması, yapılacak bağlantıların daha sağlıklı ve kolay olmasını sağlayacaktır. Ayrıca ölçüm kartı tasarlanırken, üzerine farklı renklerde ledler konulması, test aşamalarında büyük kolaylık sağlamıştır. Veri gönderme, bataryanın şarj durumu vb. durumlarda ledlerin farklı süre veya renklerde yakılması, kartın doğru çalışıp çalışmadığının anlaşılabilmesini sağlamıştır. Altium Desginer'da PCB tasarımı yapılırken bütün seçilen komponentlerin değerlerinin doğru girilmesi ve üretici numaralarının veya satın alma linklerinin özellikler bölümüne yerleştirilmesi, tasarım tamamlandığında komponent satın alımı için kolaylık sağlamıştır. Tasarımda, PCB'den dışarıya çıkacak bileşenler (LoRa anteni, sıcaklık sensörü vb.) kartın hangi tarafından çıkacağı planlanarak kenar kısımlara doğru yerleştirilmelidir.

Ölçüm devresi mikrodenetleyicisinin ölçme ve veri gönderme işlemini yaptıktan sonra bir dakika boyunca derin uyku modunda çalışması, çok düşük akım çekmesini sağlamış ve dolayısıyla güç tüketimini büyük ölçüde düşürmüştür.

Merkezi Kayıt Birimi'ne uzaktan erişimin mümkün olması, sisteme uzaktan müdahale yeteneği kazandırmıştır. Gerekli yazılım güncellemeleri ve kayıt altına alınan verilerin Excel dosyası olarak, uzaktan dosya transferi ile alınabilmesi sistemi çok daha etkin kılmıştır. Merkezi Kontrol Birimi'nde işlemci gücü yüksek bir mikrodenetleyici kullanılması, gelecek verilerin sürekli izlenmesi, gelen verilerin internete atılması ve SD kart üzerine kaydedilmesi gibi işlemlerin yapılması açısından kolaylık sağlamıştır. Raspbery Pi bir mini bilgisayar olduğundan, uzaktan erişim imkanı sağlaması bir diğer avantajı olmuştur. Merkezi Kayıt Birimi, birçok panelden gelen verileri toplayan merkez görevini gördüğü için, Raspberry Pi 3'ün yüksek maliyeti, büyük çaptaki bir FV santral düşünüldüğünde, toplam sistem maliyeti üzerinde çok etkili olmayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Birol F. World Energy Investment 2022:1–183.

[2] Wright VP. World Energy Outlook. 1986:23–8.

[3] Al-Shahri OA, Ismail FB, Hannan MA, Lipu MSH, Al-Shetwi AQ, Begum RA, et al. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. J Clean Prod 2021;284:125465. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465.

[4] KumarKrishnan S, Kandasamy S, Subbiah K. Nanomaterials. Application in Biofuels and Bioenergy Production Systems, Academic Press; 2021, p. 677–87. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822401-4.00003-9.

[5] International Energy Agency. Electricity Market Report. Electricity Market Report 2022:118.

[6] Renewable Energy Agency I. Renewable Capacity Statistics 2022. 2022.

[7] Panigrahi R, Mishra SK, Srivastava SC, Srivastava AK, Schulz NN. Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems in Secondary Distribution Network - A Review. IEEE Trans Ind Appl 2020;56:3178–95. https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979789.

[8] Solangi KH, Islam MR, Saidur R, Rahim NA, Fayaz H. A review on global solar energy policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011;15:2149–63. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.007.

[9] Kabir E, Kumar P, Kumar S, Adelodun AA, Kim KH. Solar energy: Potential and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;82:894–900. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094.

[10] Rühle S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. Solar Energy 2016;130:139–47. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015.

[11] Kannan N, Vakeesan D. Solar energy for future world: - A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;62:1092–105. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022.

[12] Mekhilef S, Saidur R, Safari A. A review on solar energy use in industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011;15:1777–90. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.018.

[13] Carrasco M, Laudani A, Lozito GM, Mancilla-David F, Fulginei FR, Salvini A. Low-Cost Solar Irradiance Sensing for PV Systems. Energies (Basel) 2017;10:998. https://doi.org/10.3390/en10070998.

[14] Widén J, Munkhammar J. Solar Radiation Theory. 2019. https://doi.org/10.33063/diva-381852.

[15] El-Sebaii AA, Al-Hazmi FS, Al-Ghamdi AA, Yaghmour SJ. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. Appl Energy 2010;87:568–76. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.032.

[16] Pazikadin AR, Rifai D, Ali K, Malik MZ, Abdalla AN, Faraj MA. Solar irradiance measurement instrumentation and power solar generation forecasting based on Artificial Neural Networks (ANN): A review of five years research trend. Science of the Total Environment 2020;715:136848. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136848.

[17] Karamanav M. Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri 2007:50–8.

[18] Condurache-bota S, Condurache-bota G, Flore I. THE EVOLUTION OF THE SURFACE ULTRAVIOLET FLUX OVER ROMANIA 2017:182–7.

[19] Rezk H, Tyukhov I, Al-Dhaifallah M, Tikhonov A. Performance of data acquisition system for monitoring PV system parameters. Measurement 2017;104:204–11. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.050.

[20] Perez R, Seals R, Ineichen P, Stewart R, Menicucci D. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. Solar Energy 1987;39:221–31. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2.

[21] de Souza MB, Tonolo ÉA, Yang RL, Tiepolo GM, Urbanetz J. Determination of diffused irradiation from horizontal global irradiation-Study for the City of Curitiba. Brazilian Archives of Biology and Technology 2019;62:1–9. https://doi.org/10.1590/1678-4324-SMART-2019190014.

[22] Boland J, Huang J, Ridley B. Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013;28:749–56. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.023.

[23] Noorian AM, Moradi I, Kamali GA. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. Renew Energy 2008;33:1406–12. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.027.

[24] Reda I, Stoffel T, Myers D. A method to calibrate a solar pyranometer for measuring reference diffuse irradiance. Solar Energy 2003;74:103–12. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00124-5.

[25] Myers DR. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: Data and model quality. Energy 2005;30:1517–31. https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.034.

[26] Raïch. Effects of solar height, cloudiness and temperature on silicon pyranometer measurements. Tethys, Journal of Weather and Climate of the Western Mediterranean 2007;4:11–8. https://doi.org/10.3369/tethys.2007.4.02.

[27] Rühle S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. Solar Energy 2016;130:139–47. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015.

[28] Urbina A. Photovoltaic Technology. Photovoltaic Technology, Springer, Cham; 2022, p. 19–38.

[29] Celik AN, Özgür E. Review of Turkey's photovoltaic energy status: Legal structure, existing installed power and comparative analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2020;134. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110344.

[30] Cubukcu M, Gumus H. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic plant in eastern Turkey. Sustainable Energy Technologies and Assessments 2020;39:100724. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100724.

[31] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası 2022. https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes#:~:text=Bakanlığımızca hazırlanan%2C Türkiye Güneş

Enerjisi,kWh%2Fm2 olarak hesaplanmıştır.

[32] TEİAŞ. YÜK TEVZİ DAİRESİ BAŞKANLIĞI - KURULU GÜÇ RAPORU-KASIM 2022. 2022.

[33] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2 yıl içerisinde 1000 MW kurulu güce ulaşmayı hedefliyoruz 2021. https://enerji.gov.tr/haber-detay?id=802.

[34] Xiang C, Zhao X, Tan L, Ye J, Wu S, Zhang S, et al. A solar tube: Efficiently converting sunlight into electricity and heat. Nano Energy 2019;55:269–76. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.077.

[35] Tumbelaka BY, Hidayat D, Taufik M, Novita D, Suhendi N. Converting solar energy to electricity energy using diffractive and selective crystalline photonics. 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA) 2016:493–6. https://doi.org/10.1109/ISITIA.2016.7828709.

[36] Zhang T, Yang H. High Efficiency Plants and Building Integrated Renewable Energy Systems. 2019. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00040-1.

[37] Wang H, Shen J. Analysis of the Characteristics of Solar Cell Array Based on MATLAB/Simulink in Solar Unmanned Aerial Vehicle. IEEE Access 2018;6:21195–201. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2802927.

[38] Padoan FCSM, Altimari P, Pagnanelli F. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. Solar Energy 2019;177:746–61. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.003.

[39] Sica D, Malandrino O, Supino S, Testa M, Lucchetti MC. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;82:2934–45. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039.

[40] Khursheed MUN, Nadeem Khan MF, Ali G, Khan AK. A review of estimating solar photovoltaic cell parameters. 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, iCoMET 2019, Taxila: IEEE; 2019, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/ICOMET.2019.8673500.

[41] Pindado S, Cubas J. Simple mathematical approach to solar cell/panel behavior

based on datasheet information. Renew Energy 2017;103:729–38. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.007.

[42] Khatib T, Mohamed A, Sopian K. A review of photovoltaic systems size optimization techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013;22:454–65. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.023.

[43] Chaibi Y, Allouhi A, Malvoni M, Salhi M, Saadani R. Solar irradiance and temperature influence on the photovoltaic cell equivalent-circuit models. Solar Energy 2019;188:1102–10. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.005.

[44] Domínguez C, Antón I, Sala G. Multijunction solar cell model for translating I-V characteristics as a function of irradiance, spectrum, and cell temperature. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2010;18:272–84. https://doi.org/10.1002/pip.965.

[45] Chellaswamy C, Taha, Shaji M, Rao RY, Jawwad M, Sharma G. A Novel Optimization Method for Parameter Extraction of Industrial Solar Cells. 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2019, Vellore, India: 2019, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/i-PACT44901.2019.8959966.

[46] Cotfas DT, Cotfas PA, Machidon OM. Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells. Sustainability at the Cutting Edge 2018:12. https://doi.org/10.4324/9780080498355-10.

[47] El-Hameed MA, Elkholy MM, El-Fergany AA. Three-diode model for characterization of industrial solar generating units using Manta-rays foraging optimizer: Analysis and validations. Energy Convers Manag 2020;219:113048. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113048.

[48] Sabadus A, Paulescu M. On the nature of the one-diode solar cell model parameters. Energies (Basel) 2021;14:3974. https://doi.org/10.3390/en14133974.

[49] Bader S, Ma X, Oelmann B. One-diode photovoltaic model parameters at indoor illumination levels – A comparison. Solar Energy 2019;180:707–16. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.048.

[50] Mäki A, Valkealahti S. Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial

shading conditions. IEEE Transactions on Energy Conversion 2012;27:173–83. https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2175928.

[51] Bastidas-Rodriguez JD, Gonzalez D, Ramos-Paja CA. Model of series-parallel photovoltaic arrays designed for parallel computing. SMACD 2017 - 14th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, Giardini Naxos, Italy: 2017, p. 1–4. https://doi.org/10.1109/SMACD.2017.7981592.

[52] Sharma V, Chandel SS. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013;27:753–67. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.046.

[53] Ibrahim H, Anani N. Variations of PV module parameters with irradiance and temperature. Energy Procedia 2017;134:276–85. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.617.

[54] Saloux E, Teyssedou A, Sorin M. Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. Solar Energy 2011;85:713–22. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.022.

[55] Armstrong S, Hurley WG. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. Appl Therm Eng 2010;30:1488–95. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012.

[56] Rodrigues EMG, Melício R, Mendes VMF, Catalão JPS. Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit model. Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality — ICREPQ´11, 2011. https://doi.org/10.24084/repqj09.339.

[57] Xiao W, Dunford WG, Capel A. A novel modeling method for photovoltaic cells. PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, vol. 3, Aachen, Germany: IEEE; 2004, p. 1950–6. https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355416.

[58] Tian H, Mancilla-David F, Ellis K, Muljadi E, Jenkins P. A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels. Solar Energy 2012;86:2695–706. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.004.

[59] Krauter S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. Solar Energy Materials and Solar Cells 2004;82:131–7. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.011.

[60] Krauter S, Preiss A. Comparison of module temperature measurement methods. 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Philadelphia, PA, USA: IEEE; 2009, p. 000333–8. https://doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411669.

[61] Mattei M, Notton G, Cristofari C, Muselli M, Poggi P. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. Renew Energy 2006;31:553–67. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010.

[62] Ye Z, Nobre A, Reindl T, Luther J, Reise C. On PV module temperatures in tropical regions. Solar Energy 2013;88:80–7. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.001.

[63] Ouédraogo A, Zouma B, Ouédraogo E, Guissou L, Bathiébo DJ. Individual efficiencies of a polycrystalline silicon PV cell versus temperature. Results in Optics 2021;4:100101. https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100101.

[64] Xu P, Zhu H. Preparation of Functionalized Carbon Nanomaterials and Their Applications in Polymer Solar Cells. Integrated Ferroelectrics 2021;216:276–89. https://doi.org/10.1080/10584587.2021.1911294.

[65] Mesquita DDB, Lucas De Silva J, Moreira HS, Kitayama M, Villalva MG. A review and analysis of technologies applied in PV modules. 2019 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Latin America 2019, Gramado, Brazil: IEEE; 2019, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895369.

[66] Ahmed A, Zhang G, Shanks K, Sundaram S, Ding Y, Mallick T. Performance evaluation of single multi-junction solar cell for high concentrator photovoltaics using minichannel heat sink with nanofluids. Appl Therm Eng 2021;182:115868. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115868.

[67] Mahmoudinezhad S, Ahmadi Atouei S, Cotfas PA, Cotfas DT, Rosendahl LA, Rezania A. Experimental and numerical study on the transient behavior of multi-junction solar cell-thermoelectric generator hybrid system. Energy Convers Manag

2019;184:448–55. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.081.

[68] Siefer G, Beutel P, Lackner D, Oliva E, Predan F, Schachtner M, et al. Four-Junction Wafer Bonded Solar Cells for Space Applications. 2019 European Space Power Conference, (ESPC), Juan-Les-Pins, France: 2019, p. 1–4. https://doi.org/10.1109/ESPC47532.2019.9049265.

[69] Dimroth F, Tibbits TND, Niemeyer M, Predan F, Beutel P, Karcher C, et al. Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. IEEE J Photovolt 2016;6:343–9. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2501729.

[70] Jaszczur M, Teneta J, Hassan Q, Majewska E, Hanus R. An Experimental and Numerical Investigation of Photovoltaic Module Temperature Under Varying Environmental Conditions. Heat Transfer Engineering 2019;42:354–67. https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1699306.

[71] de Melo GCG, Torres IC, de Araújo ÍBQ, Brito DB, Barboza E de A. A low-cost iot system for real-time monitoring of climatic variables and photovoltaic generation for smart grid application. Sensors 2021;21:3293. https://doi.org/10.3390/s21093293.

[72] Tyagi A, Dubey M, Gawre S. Advance Monitoring of Electrical and Environmental Parameters of PV System: A Review. 2018 International Conference on Sustainable Energy, Electronics and CoMputing System, (SEEMS) 2018:1–5. https://doi.org/10.1109/SEEMS.2018.8687366.

[73] Aghenta LO, Iqbal MT. Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol. AIMS Electronics and Electrical Engineering 2019;4:57–86. https://doi.org/10.3934/ElectrEng.2020.1.57.

[74] Lopez-Vargas A, Fuentes M, Garcia MV, Munoz-Rodriguez FJ. Low-Cost Datalogger Intended for Remote Monitoring of Solar Photovoltaic Standalone Systems Based on Arduino™. IEEE Sens J 2019;19:4308–20. https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2898667.

[75] Aghenta LO, Iqbal MT. Low-cost, open source IoT-based SCADA system design using thinger.IO and ESP32 thing. Electronics (Basel) 2019;8:822.

https://doi.org/10.3390/electronics8080822.

[76] Anand R, Pachauri RK, Gupta A, Chauhan YK. Design and analysis of a low cost PV analyzer using Arduino UNO. 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, (ICPEICES-2016), Delhi, India: IEEE; 2016, p. 1–4. https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853491.

[77] Bizzarri F, Bongiorno M, Brambilla A, Gruosso G, Gajani GS. Model of photovoltaic power plants for performance analysis and production forecast. IEEE Trans Sustain Energy 2013;4:278–85. https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2219563.

[78] Nkoloma M, Zennaro M, Bagula A. SM2: Solar monitoring system in Malawi. Proceedings of ITU Kaleidoscope 2011: The Fully Networked Human? - Innovations for Future Networks and Services (K-2011), Cape Town: IEEE; 2011, p. 1–6.

[79] Hu T, Zheng M, Tan J, Zhu L, Miao W. Intelligent photovoltaic monitoring based on solar irradiance big data and wireless sensor networks. Ad Hoc Networks 2015;35:127–36. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.07.004.

[80] Zedak C, Lekbich A, Belfqih A, Boukherouaa J, Haidi T, El Mariami F. A proposed secure remote data acquisition architecture of photovoltaic systems based on the Internet of Things. International Conference on Multimedia Computing and Systems -Proceedings, Rabat, Morocco: IEEE; 2018, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/ICMCS.2018.8525902.

[81] Zago RM, Fruett F. A low-cost solar generation monitoring system suitable for internet of things. 2017 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Fortaleza, Brazil: 2017, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/INSCIT.2017.8103509.

[82] Jucá SCS, Pereira RIS, Carvalho PCM. WiFi Data Acquisition System applied to a photovoltaic powered water pumping plant. Sensors & Transducers 2014;0:1–8.

[83] Papageorgas P, Piromalis D, Antonakoglou K, Vokas G, Tseles D, Arvanitis KG. Smart solar panels: In-situ monitoring of photovoltaic panels based on wired and wireless sensor networks. Energy Procedia 2013;36:535–45.

https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.062.

[84] Rouibah N, Barazane L, Mellit A, Hajji B, Rabhi A. A low-cost monitoring system for maximum power point of a photovoltaic system using IoT technique. 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), Fez, Morocco: IEEE; 2019, p. 1–5. https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723724.

[85] Prieto MJ, Pernía AM, Nuño F, Díaz J, Villegas PJ. Development of a wireless sensor network for individual monitoring of panels in a photovoltaic plant. Sensors 2014;14:2379–96. https://doi.org/10.3390/s140202379.

[86] Lin H, Chen Z, Wu L, Lin P, Cheng S. On-line monitoring and fault diagnosis of PV array based on BP neural network optimized by genetic algorithm. International Workshop on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence, vol. 9426, 2015, p. 102–12. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26181-2_10.

[87] Ando B, Baglio S, Pistorio A, Tina GM, Ventura C. Sentinella: Smart Monitoring of Photovoltaic Systems at Panel Level. IEEE Trans Instrum Meas 2015;64:2188–99. https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2386931.

[88] Andreoni Lopez ME, Galdeano Mantinan FJ, Molina MG. Implementation of wireless remote monitoring and control of solar photovoltaic (PV) system. 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), IEEE; 2012, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319050.

[89] Shariff F, Rahim NA, Hew WP. Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system. Expert Syst Appl 2015;42:1730–42. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.10.007.

[90] Badave PM, Karthikeyan B, Badave SM, Mahajan SB, Sanjeevikumar P, Gill GS. Health monitoring system of solar photovoltaic panel: An internet of things application. Lecture Notes in Electrical Engineering 2018;435:347–55. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4286-7_34.

[91] Rus-Casas C, Jiménez-Castillo G, Aguilar-Peña JD, Fernández-Carrasco JI, Josémuñoz-Rodríguez F. Development of a prototype for monitoring photovoltaic

self-consumption systems. Electronics (Basel) 2020;9:67. https://doi.org/10.3390/electronics9010067.

[92] Meyer EL, Apeh OO, Overen OK. Electrical and meteorological data acquisition system of a commercial and domestic microgrid for monitoring pv parameters. Applied Sciences 2020;10:1–18. https://doi.org/10.3390/app10249092.

[93] Victor JLF, Jucá SCS, Pereira RIS, Carvalho PCM, Fernández-Ramírez LM. IoT monitoring systems applied to photovoltaic generation: The relevance for increasing decentralized plants. Renewable Energy and Power Quality Journal 2019;17:536–45. https://doi.org/10.24084/repqj17.368.

[94] Deshmukh MK, Singh AB. Online monitoring of roof-mounted stand-alone solar photovoltaic system on residential building. Mater Today Proc 2019;23:56–61. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.487.

[95] Fuentes M, Vivar M, Burgos JM, Aguilera J, Vacas JA. Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards. Solar Energy Materials and Solar Cells 2014;130:529–43. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.008.

[96] Li YF, Lin PJ, Zhou HF, Chen ZC, Wu LJ, Cheng SY, et al. On-line monitoring system of PV array based on internet of things technology. IOP Conf Ser Earth Environ Sci, vol. 93, Kunming, China: 2017, p. 012078. https://doi.org/10.1088/1755-1315/93/1/012078.

[97] Kalay MŞ, Kılıç B, Sağlam Ş. Systematic review of the data acquisition and monitoring systems of photovoltaic panels and arrays. Solar Energy 2022;244:47–64. https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.029.

[98] Kharb RK, Shimi SL, Chatterji S, Ansari MF. Modeling of solar PV module and maximum power point tracking using ANFIS. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014;33:602–12. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.014.

[99] Boutana N, Mellit A, Haddad S, Rabhi A, Pavan AM. An explicit I-V model for photovoltaic module technologies. Energy Convers Manag 2017;138:400–12. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.016.

[100] Aranda ED, Gomez Galan JA, de Cardona MS, Andujar Marquez JM. Measuring

the I-V curve of PV generators. IEEE Industrial Electronics Magazine 2009;3:4–14.

[101] Ramos Hernanz JA, Campayo Martín JJ, Zamora Belver I, Larrañaga Lesaka J, Zulueta Guerrero E, Puelles Pérez E. Modelling of photovoltaic module. Renewable ENergy & Power Quality Journal, vol. 1, Granada, Spain: 2010, p. 1186–90. https://doi.org/10.24084/repqj08.619.

[102] International Electrotechnical Commission (IEC). Photovoltaic System Performance Monitoring – Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis. Geneva, Switzerland: 1998.

[103] Madeti SR, Singh SN. Monitoring system for photovoltaic plants: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;67:1180–207. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.088.

[104] Ferrero R, Marracci M, Tellini B. Analytical study of impulse current measuring shunts with cage configuration. IEEE Trans Instrum Meas 2012;61:1260–7. https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2175823.

[105] Ranhotigamage C, Mukhopadhyay SC. Field trials and performance monitoring of distributed solar panels using a low-cost wireless sensors network for domestic applications. IEEE Sens J 2011;11:2583–90. https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2150214.

[106] Ziegler S, Woodward RC, Iu HHC, Borle LJ. Current sensing techniques: A review. IEEE Sens J 2009;9:354–76. https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2013914.

[107] Ripka P. Current sensors using magnetic materials. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials 2004;6:587–92.

[108] Adhya S, Saha D, Das A, Jana J, Saha H. An IoT based smart solar photovoltaic remote monitoring and control unit. 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication, (CIEC), Kolkata, India: IEEE; 2016, p. 432–6. https://doi.org/10.1109/CIEC.2016.7513793.

[109] Huang PY, Shimizu T. High Power/Current Inductor Loss Measurement with Shunt Resistor Current-sensing Method. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), Niigata, Japan: IEEJ Industry

Application Society; 2018, p. 2165–9. https://doi.org/10.23919/IPEC.2018.8507755.

[110] Moravek P, Komosny D, Simek M, Mraz L. Energy demands of 802.15.4/ZigBee communication with IRIS sensor motes. 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP 2011), Budapest, Hungary: 2011, p. 69–73. https://doi.org/10.1109/TSP.2011.6043770.

[111] Kent AD. Quantum physics: New spin on the Hall effect. Nature 2006;442:143–5. https://doi.org/10.1038/442143a.

[112] Ramsden E. Hall-Effect Physics. Hall-Effect Sensors, 2006, p. 1–10. https://doi.org/10.1016/b978-075067934-3/50002-8.

[113] Liu C, Liu JG. Offset error reduction in Open Loop Hall Effect current sensors powered with single voltage source. 2014 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems Proceedings (AMPS), Aachen, Germany: IEEE; 2014, p. 40–5. https://doi.org/10.1109/AMPS.2014.6947705.

[114] Xu C, Liu JG, Zhang Q, Yang Y. Investigation of the thermal drift of open-loop Hall Effect current sensor and its improvement. 2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, AMPS 2015 - Proceedings, Aachen, Germany: IEEE; 2015, p. 19–24. https://doi.org/10.1109/AMPS.2015.7312732.

[115] Wang Y, Liu JG, Zhao J, Yang Y. Split core closed loop hall effect current sensors and applications. PCIM EUROPE International Exhibition and Conference for Power Electronics, Nuremberg, Germany: 2012, p. 1633–8.

[116] Chen KL, Chen N. A new method for power current measurement using a coreless Hall effect current transformer. IEEE Trans Instrum Meas 2011;60:158–69. https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2049234.

[117] Gokmen G, Tuncalp K. The Design of a Hall Effect Current Transformer and Examination of The Linearity with Real Time Parameter Estimation. Elektronika Ir Elektrotechnika 2010;2:3–8. https://doi.org/10.5755/j01.eee.101.5.9386.

[118] Cristaldi L, Ferrero A, Lazzaroni M, Ottoboni R. A linearization method for commercial Hall-effect current transducers. IEEE Trans Instrum Meas

2001;50:1149–53. https://doi.org/10.1109/19.963175.

[119] Kabalci Y, Kabalci E, Canbaz R, Calpbinici A. Design and implementation of a solar plant and irrigation system with remote monitoring and remote control infrastructures. Solar Energy 2016;139:506–17. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.026.

[120] Tina GM, Grasso AD. Remote monitoring system for stand-alone photovoltaic power plants: The case study of a PV-powered outdoor refrigerator. Energy Convers Manag 2014;78:862–71. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.065.

[121] Dickinson R, Milano S. Isolated Open Loop Current Sensing Using Hall Effect Technology in an Optimized Magnetic Circuit 2002:1–12.

[122] Lazzaretti AE, da Costa CH, Rodrigues MP, Yamada GD, Lexinoski G, Moritz GL, et al. A monitoring system for online fault detection and classification in photovoltaic plants. Sensors (Switzerland) 2020;20:4688. https://doi.org/10.3390/s20174688.

[123] Swathika OVG, Hemapala KTMU. IOT Based Energy Management System for Standalone PV Systems. Journal of Electrical Engineering and Technology 2019;14:1811–21. https://doi.org/10.1007/s42835-019-00193-y.

[124] Aghenta LO, Iqbal MT. Development of an IoT Based Open Source SCADA System for PV System Monitoring. 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE), Edmonton, AB, Canada: IEEE; 2019, p. 1–4. https://doi.org/10.1109/CCECE.2019.8861827.

[125] Olivier MM, Kassegne S, Muvengei M. Real-time monitoring and diagnosis of organic solar cell stability. International Journal of Scientific and Technology Research 2020;9:2385–91.

[126] Cross RC. Current transformers. Am J Phys 1986;54:1110–3. https://doi.org/10.1119/1.14726.

[127] Collin AJ, Delle Femine A, Gallo D, Langella R, Luisa M. Compensation of Current Transformers' Non-Linearities by Means of Frequency Coupling Matrices. 2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for

Power Systems (AMPS), Bologna, Italy: 2018, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/AMPS.2018.8494893.

[128] Das N, Kazimierczuk MK. An overview of technical challenges in the design of current transformers. Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005., vol. 2005, Indianapolis, IN, USA: IEEE; 2005, p. 369–77. https://doi.org/10.1109/EEIC.2005.1566323.

[129] Kondrath N, Kazimierczuk MK. Bandwidth of current transformers. IEEE Trans Instrum Meas 2009;58:2008–16. https://doi.org/10.1109/TIM.2008.2006134.

[130] Tiwari S, Patel RN. Real time monitoring of solar power plant and automatic load control. 2015 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES), Allahabad, India: IEEE; 2016, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/SCES.2015.7506453.

[131] Tsai YP, Chen KL, Chen YR, Chen N. Multifunctional coreless hall-effect current transformer for the protection and measurement of power systems. IEEE Trans Instrum Meas 2014;63:557–65. https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2281555.

[132] Spang M, Hofstoetter N. Evaluation of current measurement accuracy for a power module with integrated shunt resistors. PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany: 2017, p. 1–8. https://doi.org/10.1109/SBMicro.2017.7990722.

[133] Murata Power Solutions. DMS Accessories. 50mV and 100mV Base-Mounted DC Shunts n.d.:1–4. https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/power/datasheet/dpm_shunts.pdf (accessed November 8, 2021).

[134] Basnayake BADJCK, Jayathilaka WADM, Amarasinghe YWR, Attalage RA, Jayasekara AGBP. Smart solar tracking and on-site photovoltic efficiency measurement system. 2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), Moratuwa, Sri Lanka: IEEE; 2016, p. 54–9. https://doi.org/10.1109/MERCon.2016.7480115.

[135] Pereira RIS, Dupont IM, Carvalho PCM, Jucá SCS. IoT embedded linux system

based on Raspberry Pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant. Measurement 2018;114:286–97. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.033.

[136] Le PT, Tsai HL, Lam TH. A wireless visualization monitoring, evaluation system for commercial photovoltaic modules solely in MATLAB/Simulink environment. Solar Energy 2016;140:1–11. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.043.

[137] Mhetre C, Narkhede P, Pashte Y, Patankar N, Nishan P. Solar Powered Wireless Sensor Network Using Zigbee Module. 2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS), Madurai, India: IEEE; 2019, p. 468–73.

[138] Touati F, Gonzales ASP, Qiblawey Y, Benhmed K. A customized PV performance monitoring system in Qatar's harsh environment. 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Rabat, Morocco: IEEE; 2018, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8703020.

[139] Anwari M, Hidayat A, Hamid MI, Taufik. Wireless data acquisition for photovoltaic power system. INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference, Incheon, Korea (South): IEEE; 2009, p. 1–4. https://doi.org/10.1109/INTLEC.2009.5352086.

[140] Texas Instruments. INA219 2008. https://www.ti.com/product/INA219.

[141] Al-Taani H, Arabasi S. Solar irradiance measurements using smart devices: A cost-effective technique for estimation of solar irradiance for sustainable energy systems. Sustainability 2018;10:508. https://doi.org/10.3390/su10020508.

[142] Lester A, Myers DR. A method for improving global pyranometer measurements by modeling responsivity functions. Solar Energy 2006;80:322–31. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.02.010.

[143] Varghese A, Vasanthakumary AM, Freeman J, Achuthan K. Remote triggered solar energy assessment using a pyrheliometer and a pyranometer. 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, USA: 2017, p. 115–20. https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191251.

[144] Myers DR, Stoffel TL, Reda I, Wilcox SM, Andreas AM. Recent progress in reducing the uncertainty in and improving pyranometer calibrations. J Sol Energy Eng 2002;124:44–50. https://doi.org/10.1115/1.1434262.

[145] Martínez MA, Andújar JM, Enrique JM. A new and inexpensive pyranometer for the visible spectral range. Sensors 2009;9:4615–34. https://doi.org/10.3390/s90604615.

[146] Haeffelin M, Kato S, Smith AM, Rutledge CK, Charlock TP, Mahan JR. Determination of the thermal offset of the Eppley precision spectral pyranometer. Appl Opt 2001;40:472–84. https://doi.org/10.1364/ao.40.000472.

[147] Beaubien DJ, Bisberg A, Beaubien AF. Investigations in pyranometer design. J Atmos Ocean Technol 1998;15:677–86. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0677:IIPD>2.0.CO;2.

[148] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 2018th ed. World Meteorological Organisation (WMO); 2018.

[149] Karki S, Ziar H, Korevaar M, Bergmans T, Mes J, Isabella O. Performance Evaluation of Silicon-Based Irradiance Sensors Versus Thermopile Pyranometer. IEEE J Photovolt 2021;11:144–9. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3038342.

[150] Cohen S, Stanhill G. Widespread Surface Solar Radiation Changes and Their Effects: Dimming and Brightening. Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth: Second Edition. Second Edi, Elsevier B.V.; 2016, p. 491–511. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63524-2.00029-4.

[151] Macome MA, Cuambal B, Pillay S, Lovseth J. Design, construction and characterization of a multiple sensors solar radiation detector for ises 2009. 29th ISES Biennial Solar World Congress 2009, ISES 2009, vol. 2, 2009, p. 1026–32.

[152] da Rocha ÁB, Fernandes E de M, Dos Santos CAC, Diniz JMT, Junior WFA. Development of a real-time surface solar radiation measurement system based on the internet of things (Iot). Sensors 2021;21:3836. https://doi.org/10.3390/s21113836.

[153] Awasthi S, Mor P. Web based Measurement System for Solar Radiation.

International Journal of Advanced Computer Research 2012;2:101–5.

[154] Bian Z, Lu W, Sha Y, He X, Chong W. Research on performance test method of silicon pyranometer. Proceedings of 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI 2013, vol. 1, Harbin, China: IEEE; 2013, p. 43–8. https://doi.org/10.1109/ICEMI.2013.6743034.

[155] Delta-T Devices. SPN1 Sunshine Pyranometer n.d. https://delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2016/10/SPN1-2.png (accessed November 8, 2021).

[156] Scientificsales. 200SZ Silicon Pyranometer n.d. https://www.scientificsales.com/200SZ-Silicon-Pyranometer-p/200sz.htm (accessed November 8, 2021).

[157] Dunn L, Gostein M, Emery K. Comparison of pyranometers vs. PV reference cells for evaluation of PV array performance. 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, TX, USA: IEEE; 2012, p. 2899–904. https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6318193.

[158] Meydbray J, Emery K, Kurtz S. Pyranometers and reference cells, the difference. PV Magazine 2012;4:108–10.

[159] Basaran K. Effect of Irradiance Measurement Sensors on the Performance Ratio of Photovoltaic Power Plant Under Real Operating Conditions: An Experimental Assessment in Turkey. Journal of Electrical Engineering and Technology 2019;14:2607–18. https://doi.org/10.1007/s42835-019-00294-8.

[160] Kratzenberg; MG, Beyer; HG, S. Colle 1 AA. Uncertainty Calculations in Pyranometer Measurements and Application. ASME 2006 International Solar Energy Conference, Denver, Colorado, USA: 2006, p. 1–10.

[161] Touati F, Al-Hitmi MA, Chowdhury NA, Hamad JA, San Pedro Gonzales AJR. Investigation of solar PV performance under Doha weather using a customized measurement and monitoring system. Renew Energy 2016;89:564–77. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.046.

[162] Martínez MA, Andújar JM, Enrique JM. Temperature measurement in PV facilities on a per-panel scale. Sensors 2014;14:13308–23. https://doi.org/10.3390/s140813308.

[163] Jankovec M, Topič M. Intercomparison of temperature sensors for outdoor monitoring of photovoltaic modules. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The Asme 2013;135:031012. https://doi.org/10.1115/1.4023518.

[164] Kurnik J, Jankovec M, Brecl K, Topic M. Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions. Solar Energy Materials and Solar Cells 2011;95:373–6. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.022.

[165] Gupta V, Sharma M, Pachauri RK, Babu KND. A Low-Cost Real-Time IOT Enabled Data Acquisition System for Monitoring of PV System. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects 2021;43:2529–43. https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1844351.

[166] Priharti W, Rosmawati AFK, Wibawa IPD. IoT based photovoltaic monitoring system application. J Phys Conf Ser 2019;1367. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1367/1/012069.

[167] Ben Belghith O, Sbita L. Remote GSM module monitoring and Photovoltaic system control. 2014 First International Conference on Green Energy (ICGE-2014), Sfax, Tunisia: IEEE; 2014, p. 188–92. https://doi.org/10.1109/ICGE.2014.6835420.

[168] Bohórquez MA, Sidrach-de-Cardona M, Durán E, Enrique JM, Carretero JE, Andújar JM. A New Lowcost Temperature Sensor for Use in Photovoltaic Monitoring Systems. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2005, p. 248–50. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2908.3924.

[169] Piotrowicz M, Marańda W. Temperature analysis system for photovoltaic instalation. 2009 MIXDES-16th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems, Lodz, Poland: IEEE; 2009, p. 708–11.

[170] Fan SY, Yao XS, Cao SX, Zhao B. Temperature Prediction of Photovoltaic Panels Based on Delayed Echo State Network. Complexity 2020;2020:1–12. https://doi.org/10.16383/j.aas.c200167.

[171] Bohórquez MAM, Enrique Gómez JM, Andújar Márquez JM. A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar

facilities. Solar Energy 2009;83:883–90. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.12.007.

[172] Silvestre S, Mora-López L, Kichou S, Sánchez-Pacheco F, Dominguez-Pumar M. Remote supervision and fault detection on OPC monitored PV systems. Solar Energy 2016;137:424–33. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.030.

[173] Sajjad U, Amer M, Ali HM, Dahiya A, Abbas N. Cost effective cooling of photovoltaic modules to improve efficiency. Case Studies in Thermal Engineering 2019;14:100420. https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100420.

[174] Dabou R, Bouchafaa F, Arab AH, Bouraiou A, Draou MD, Neçaibia A, et al. Monitoring and performance analysis of grid connected photovoltaic under different climatic conditions in south Algeria. Energy Convers Manag 2016;130:200–6. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.10.058.

[175] Yadav SK, Bajpai U. Performance evaluation of a rooftop solar photovoltaic power plant in Northern India. Energy for Sustainable Development 2018;43:130–8. https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.01.006.

[176] Platon R, Martel J, Woodruff N, Chau TY. Online Fault Detection in PV Systems. IEEE Trans Sustain Energy 2015;6:1200–7. https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2421447.

[177] Kim KA, Seo GS, Cho BH, Krein PT. Photovoltaic Hot-Spot Detection for Solar Panel Substrings Using AC Parameter Characterization. IEEE Trans Power Electron 2016;31:1121–30. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2417548.

[178] Trina Solar. Catalogue TSM-DE21 2022:2003–5. https://static.trinasolar.com/sites/default/files/AU_Datasheet_Vertex_DE20_2020A.pdf.

[179] enfsolar. Solar Panel Directory Mono 415-450W 2022.

[180] Trina Solar. Catalogue TSM-DE21 2022:2003–5. https://static.trinasolar.com/sites/default/files/AU_Datasheet_Vertex_DE20_2020A.pdf.

[181] Trina Solar. TSM-DE21 catalog n.d. https://pdf.directindustry.com/pdf/trina-

solar/tsm-de21/99499-1005379-_2.html.

[182] Texas Instruments. TMCS1107A2UQDR 420-V isolated Hall-effect current sensor with internal reference 2022. https://www.ti.com/product/TMCS1107/part-details/TMCS1107A2UQDR.

[183] Texas Instruments. TMCS1107 3% Basic Isolation Hall-Effect Current Sensor With ±420-V Working Voltage 2021. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmcs1107.pdf?ts=1671964939504&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTMCS1107%252Fpart-details%252FTMCS1107A2UQDR.

[184] Components101. BPW34 Photodiode 2021. https://components101.com/diodes/bpw34-photodiode.

[185] Amazon. DS18B20 Digital Tube Humidity Meter Temperature Sensor Indoor Home Outdoor Industry (Sell 5). 2020 n.d. https://www.amazon.de/-/en/DS18B20-Digital-Humidity-Temperature-Industry/dp/B08JGK8771?th=1.

[186] Digi-Key. ESP32-WROOM-32E-H4 2022. https://www.digikey.com/en/products/detail/espressif-systems/ESP32-WROOM-32E-H4/12696413.

[187] Makerfabs. SX1278 LoRa Module 433M 10KM Ra-02 2021. https://www.makerfabs.com/sx1278-lora-module-433m-10km-ra-02.html.

[188] Dwmzone. USD3.0/pcs MOQ100pcs LoRa Antenna-433MHz /868MHz /915MHz 5dBi Waterproof SMA Male Whip antenna 2022. https://dwmzone.com/en/moq100pcs-order/593-usd30pcs-moq100pcs-lora-antenna-433mhz-868mhz-915mhz-5dbi-waterproof-sma-male-whip-antenna.html.

[189] UcuzKonfor. Unit UT 803 Masa Tipi Dijital Multimetre 2022. https://www.ucuzkonfor.com/urun/unit-ut-803-masa-tipi-dijital-multimetre.

[190] findtheneedle. CR100 Fixed Solarimeter 2022. https://www.findtheneedle.co.uk/companies/kimo-instruments/products/cr100-fixed-solarimeter.

[191] Ankara Solar. AS-MQ7 580W – 600W Halfcut PV Module 2022.

[192] Manoj Kumar N, Sudhakar K, Samykano M. Techno-economic analysis of 1 MWp grid connected solar PV plant in Malaysia. International Journal of Ambient Energy 2019;40:434–43. https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1410226.

EKLER

EK 1. Ölçüm devresi mikrodenetleyicisi yazılımı

```
//LORA

#include <SPI.h>

#include <LoRa.h>

#include "Arduino.h"

#define uS_TO_S_FACTOR 1000000ULL /* Conversion factor for micro seconds to seconds */

#define TIME_TO_SLEEP 60 /* Time ESP32 will go to sleep (in seconds) */

RTC_DATA_ATTR int bootCount = 0;

float PVcurrent_value;

float irradiance_value;

float temperature_value;

float battery_voltage_value;

float PVvoltage_value;

float limitedIrradianceValue = 17.00;

float BATT_data_voltage;

//TEMPERATURE

#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

const int oneWireBus = 4;  // GPIO where the DS18B20 is connected to

OneWire oneWire(oneWireBus); // Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices

DallasTemperature sensors(&oneWire); // Pass our oneWire reference to Dallas Temperature sensor

//LEDs

const int greenLed = 32;
```

```
const int redLed = 33;
//ANALOG READ CONFIG
#include <ESP32AnalogRead.h>
ESP32AnalogRead BatVoltage;
ESP32AnalogRead PVvoltage;
ESP32AnalogRead PVcurrent;
ESP32AnalogRead PVirradiance;
// SENSOS' PIN CONFIG
int BatVoltage_Pin = 39;
int PVvoltage_Pin = 36;
int PVcurrent_Pin = 15;
int PVirradiance_Pin = 13;
int BAT_chg = 35;
int BAT_cmplt = 34;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000); //Take some time to open up the Serial Monitor
  //++bootCount;  //Increment boot number and print it every reboot
  //Serial.println("Boot number: " + String(bootCount));
  print_wakeup_reason(); //Print the wakeup reason for ESP32

 /*
  First we configure the wake up source
  We set our ESP32 to wake up every 5 seconds
  */
  esp_sleep_enable_timer_wakeup(TIME_TO_SLEEP * uS_TO_S_FACTOR);
```

```
  Serial.println("Setup ESP32 to sleep for every " + String(TIME_TO_SLEEP) +
  " Seconds");
  LoRa.setPins(21, 16, 25);
  //LEDPINS
  pinMode (greenLed, OUTPUT); // green led pin is output
  pinMode (BAT_chg, INPUT); // green led pin is output
  pinMode (BAT_cmplt, INPUT); // green led pin is output
  pinMode (redLed, OUTPUT); // red led pin is output
  //SENSORS' PINS TO ATTACH
  BatVoltage.attach(39);
  PVvoltage.attach(36);
  PVcurrent.attach(15);
  PVirradiance.attach(13);
  sensors.begin(); //Start the DS18B20 sensor
  while (!Serial);
  Serial.println("LoRa Sender");
  if (!LoRa.begin(433E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
  LoRa.setTxPower(20); //2-17
  LoRa.setSpreadingFactor(11); //6-12
  //LoRa.setCodingRate4(6); //5-8
  LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
//7.8E3, 10.4E3, 15.6E3, 20.8E3, 31.25E3, 41.7E3, 62.5E3, 125E3, and 250E3.
//looptan gelenler
```

```
  Serial.println(float(averageIrradianceCalc()));
  Serial.println(PVirradiance.readVoltage()-0.075);
 if (float(averageIrradianceCalc())>limitedIrradianceValue){
   sensors.requestTemperatures();
  float temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0);
  //float temperatureF = sensors.getTempFByIndex(0);
  Serial.println("Sending packet: ");
  Serial.println("PANEL 1 - PACKET NUMBER: " + String(1));
  Serial.println("Battary Voltage = "+String(averageBatVCalc()));
  Serial.println("Panel Voltage = "+String(averagePVVCalc()));
  Serial.println("PV Current = "+String(averageCurrentCalc()));
  Serial.println("Irradiance = "+String(averageIrradianceCalc()));
  Serial.println("Temperature = "+String(temperatureC)+"ºC");
  Serial.println("Battery charging statue = "+ String(!digitalRead(BAT_chg)));
  Serial.println("Battery charge completed = "+ String(!digitalRead(BAT_cmplt)));
  Serial.println(" ");
  Serial.println("PN - BV - PV Vol - PV Crr - Irr - Temp");
Serial.println(String(1)+","+String(averageBatVCalc())+","+String(averagePVVCalc())+","+String(averageCurrentCalc())+","+String(averageIrradianceCalc())+","+String(temperatureC)+","+String(!digitalRead(BAT_chg))+","+String(!digitalRead(BAT_cmplt)+","));
  Serial.println(" ");
  // send packet
  LoRa.beginPacket();
LoRa.println(","+String(1)+","+String(averageBatVCalc())+","+String(averagePVVCalc())+","+String(averageCurrentCalc())+","+String(averageIrradianceCalc())+","+String(temperatureC)+","+String(!digitalRead(BAT_chg))+","+String(!digitalRead(BAT_cmplt)+ ","));
```

```
  digitalWrite (greenLed, HIGH); // sending led lights up
  if (!digitalRead(BAT_chg) == 1){
    digitalWrite(redLed,HIGH);
    delay (50);
    digitalWrite(redLed,LOW);
    delay (50);
    digitalWrite(redLed,HIGH);
        delay (50);
    digitalWrite(redLed,LOW);
    }
  if (!digitalRead(BAT_cmplt) == 1){
    digitalWrite(redLed,HIGH);
    delay (500);
    digitalWrite(redLed,LOW);
    }
  LoRa.endPacket();
  digitalWrite (greenLed, LOW); // sending led turns off
  }
  delay(60);
  Serial.println("Going to sleep now");
  delay(200);
  Serial.flush();
  esp_deep_sleep_start();
  Serial.println("This will never be printed");
}
void loop() {
```

```
}
//methods
float averageCurrentCalc()
{
   PVcurrent_value = 0;
   int measurementsToAverage = 100;
   for (int i = 0; i < measurementsToAverage; ++i)
   {
      PVcurrent_value += PVcurrent.readVoltage();
   }
   PVcurrent_value = PVcurrent_value / measurementsToAverage;
   PVcurrent_value = PVcurrent_value - 0.04;
   PVcurrent_value = 10*(PVcurrent_value - 0.330);
   return PVcurrent_value;
}
float averageIrradianceCalc()
{
   irradiance_value = 0;
   int measurementsToAverage = 100;
   for (int i = 0; i < measurementsToAverage; ++i)
   {
      irradiance_value += PVirradiance.readVoltage();
   }
   irradiance_value = irradiance_value / measurementsToAverage;
   irradiance_value = irradiance_value - 0.075;
```

```
  irradiance_value = (irradiance_value)*1000/3.3;
  return irradiance_value;
}
float averageBatVCalc()
{
  battery_voltage_value = 0;
  int measurementsToAverage = 100;
  for (int i = 0; i < measurementsToAverage; ++i)
  {
    battery_voltage_value += BatVoltage.readVoltage();
  }
  battery_voltage_value = battery_voltage_value / measurementsToAverage;
  battery_voltage_value = battery_voltage_value - 0.04;
  battery_voltage_value *=2;
  return battery_voltage_value;
}
float averagePVVCalc()
{
  PVvoltage_value = 0;
  int measurementsToAverage = 100;
  for (int i = 0; i < measurementsToAverage; ++i)
  {
    PVvoltage_value += PVvoltage.readVoltage()*62.3/3.3;
  }
  PVvoltage_value = PVvoltage_value / measurementsToAverage;
  PVvoltage_value = PVvoltage_value - 0.04;
```

```
  // Serial.println("PV voltage" + String(PVvoltage_value));
   return PVvoltage_value;
}
void print_wakeup_reason(){
 esp_sleep_wakeup_cause_t wakeup_reason;
 wakeup_reason = esp_sleep_get_wakeup_cause();
 switch(wakeup_reason)
 {
   case ESP_SLEEP_WAKEUP_EXT0 : Serial.println("Wakeup caused by external signal using RTC_IO"); break;
   case ESP_SLEEP_WAKEUP_EXT1 : Serial.println("Wakeup caused by external signal using RTC_CNTL"); break;
   case ESP_SLEEP_WAKEUP_TIMER : Serial.println("Wakeup caused by timer"); break;
   case ESP_SLEEP_WAKEUP_TOUCHPAD : Serial.println("Wakeup caused by touchpad"); break;
   case ESP_SLEEP_WAKEUP_ULP : Serial.println("Wakeup caused by ULP program"); break;
   default : Serial.printf("Wakeup was not caused by deep sleep: %d\n",wakeup_reason); break;
 }
}
```

EK 2. Raspbbery Pi 3 içerisine gömülü Merkezi Kayıt Birimi'ne ait Python dilinde geliştirilmiş yazılım kodu.

```
# -*- coding: utf-8 -*-

import serial.tools.list_ports

import time

import datetime

import thingspeak

import sys

import RPi.GPIO as GPIO

from time import sleep

import urllib3

import urllib.request

import requests

from requests.adapters import HTTPAdapter

from urllib3.util.retry import Retry

import os

import openpyxl

from openpyxl.styles import PatternFill

from openpyxl.workbook import Workbook # Excel writing

from openpyxl import load_workbook # Excel reading - writing

path = '/home/pi/Denemeler/PV_Data.xlsx'

isExist = os.path.exists(path)

workbook_name = 'PV_Data.xlsx'

if isExist == False:

    headers       = ['Tarih','Panel ID','Paket No','Batarya Gerilimi (V)','Panel Gerilimi(V)','Panel Akımı (A)','Güneş Radyasyonu (W/m2)','Panel Sıcaklığı (C)','Sarj durumu (1 = Sarj oluyor)']
```

```
    wb = Workbook()
    page = wb.active
    page.title = 'PANEL1'
    page.append(headers) # write the headers to the first line
    page.column_dimensions['A'].width = 20
    page.column_dimensions['D'].width = 17
    page.column_dimensions['E'].width = 15
    page.column_dimensions['F'].width = 15
    page.column_dimensions['G'].width = 24
    page.column_dimensions['H'].width = 18
    page.column_dimensions['I'].width = 25
    ws = wb['PANEL1']
    fill_cell = PatternFill(patternType='solid', fgColor='00FFFF')
    ws['A1'].fill = fill_cell
    ws['B1'].fill = fill_cell
    ws['C1'].fill = fill_cell
    ws['D1'].fill = fill_cell
    ws['E1'].fill = fill_cell
    ws['F1'].fill = fill_cell
    ws['G1'].fill = fill_cell
    ws['H1'].fill = fill_cell
    ws['I1'].fill = fill_cell
    wb.save(filename = workbook_name)
connected = []
while True:
    comlist = serial.tools.list_ports.comports()
```

```
for element in comlist:
    connected.append(element.device)
if any("USB1" in s for s in connected):
    print("connected port: USB1")
    while True:
        time.sleep(0.5)
        try:
            ser = serial.Serial(
            port= '/dev/ttyUSB1',
            baudrate = 115200,
            parity = serial.PARITY_NONE,
            stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
            bytesize=serial.EIGHTBITS,
            timeout = 1
            )
            while True:
                x = ser.readline()
                if len(x) == 1:
                    print("LoRa is ok!")
                if len(x)>20:
                    allData = 0
                    print("received data: " + x.decode('utf-8'))
                    allData = str(x).split(",")
                    print("real " + allData[5])
                    Irr = int(float(allData[5]))
                    if(140 > Irr > 100):
```

```
            Irr = Irr * (Irr/78)
        elif (150 > Irr >= 140):
            Irr = Irr * (Irr/75)
        elif(160 > Irr >= 150):
            Irr = Irr * (Irr/72)
        elif(Irr >= 160):
            Irr = Irr * (Irr/68)
        else:
            Irr = Irr * 1.3
        allData[5] = str(int(Irr))
        print("Packet Number: " + allData[1])
        print("Battery Voltage: " + allData[2]+ " V")
        print("PV Voltage: " + allData[3]+ " V")
        print("PV Current: " + allData[4] + " A")
        print("Irradiance: " + allData[5] + " W/m2")
        print("Temperature: " + allData[6] + " °C")
        print("Battery Charging Status: " + allData[7])
        current_time = datetime.datetime.now() #get the current time
        print(current_time)
        wb = load_workbook(workbook_name)   #excel read
        page = wb.active
        new_Data =
[[current_time,'1',allData[1],allData[2],allData[3],allData[4],allData[5],allData[6],allDat
a[7]]]
        for info in new_Data:  #append the end of the excel
            page.append(info)
        wb.save(filename=workbook_name) # save the excel file
```

```
            queries = {"api_key": "OTJQO1ZUD83A9U9V",
                       "field1": allData[2],
                       "field2": allData[3],
                       "field3": allData[4],
                       "field4": allData[5],
                       "field5": allData[6],
                       "field6": allData[7]
                      }
            r = requests.get('https://api.thingspeak.com/update', params=queries)
            if r.status_code == requests.codes.ok:
               print("Uploaded!")
            else:
               print("Error Code: " + str(r.status_code))
         ser.close
except FileNotFoundError:
   print("Arduino algilanamadi")
except TypeError as e:
   break
except serial.SerialException as e:
   print("Couldn't read serial port")
   break
#except serial.serialutil.SerialException as e:
   #print("couldn read")
except FileNotFoundError:
   print("Arduino algilanamadi")
   break
```

```
        except TypeError as e:
            #ser.close()
            break
        except serial.SerialException as e:
            print("Couldnt read serial port")
            break
        except UnicodeDecodeError:
            break
        except requests.exceptions.ConnectionError:
            print("Connection refused")
            break
            #r.status_code = "Connection refused"
        #except serial.serialutil.SerialException as e:
            #print("couldn read")
            #break
if any("USB0" in s for s in connected):
    print("connected port: USB0")
    while True:
        time.sleep(0.5)
        try:
            ser = serial.Serial(
            port= '/dev/ttyUSB0',
            baudrate = 115200,
            parity = serial.PARITY_NONE,
            stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
            bytesize=serial.EIGHTBITS,
```

```
timeout = 1
)
while True:
    x = ser.readline()
    if len(x) == 1:
        print("LoRa is ok!")
    if len(x)>20:
        allData = 0
        print("received data: " + x.decode('utf-8'))
        allData = str(x).split(",")
        print("real " + allData[5])
        Irr = int(float(allData[5]))
        if(140 > Irr > 100):
            Irr = Irr * (Irr/78)
        elif (150 > Irr >= 140):
            Irr = Irr * (Irr/75)
        elif(160 > Irr >= 150):
            Irr = Irr * (Irr/72)
        elif(Irr >= 160):
            Irr = Irr * (Irr/68)
        else:
            Irr = Irr * 1.3
        allData[5] = str(int(Irr))
        print("Packet Number: " + allData[1])
        print("Battery Voltage: " + allData[2]+ " V")
        print("PV Voltage: " + allData[3]+ " V")
```

```
print("PV Current: " + allData[4] + " A")
print("Irradiance: " + allData[5] + " W/m2")
print("Temperature: " + allData[6] + " °C")
print("Battery Charging Status: " + allData[7])
current_time = datetime.datetime.now() #get the current time
print(current_time)
wb = load_workbook(workbook_name)   #excel read
page = wb.active
new_Data =
[[current_time,'1',allData[1],allData[2],allData[3],allData[4],allData[5],allData[6],allDat
a[7]]]
for info in new_Data:  #append the end of the excel
   page.append(info)
wb.save(filename=workbook_name) # save the excel file
queries = {"api_key": "OTJQO1ZUD83A9U9V",
          "field1": allData[2],
          "field2": allData[3],
          "field3": allData[4],
          "field4": allData[5],
          "field5": allData[6],
          "field6": allData[7]
          }
r = requests.get('https://api.thingspeak.com/update', params=queries)
if r.status_code == requests.codes.ok:
   print("Uploaded!")
else:
   print("Error Code: " + str(r.status_code))
```

```
        ser.close
except FileNotFoundError:
    print("Arduino algilanamadi")
except TypeError as e:
    break
except serial.SerialException as e:
    print("Couldn't read serial port")
    break
#except serial.serialutil.SerialException as e:
    #print("couldn read")
except FileNotFoundError:
    print("Arduino algilanamadi")
    break
except TypeError as e:
    #ser.close()
    break
except serial.SerialException as e:
    print("Couldnt read serial port")
    break
except UnicodeDecodeError:
    break
except requests.exceptions.ConnectionError:
    print("Connection refused")
    break
    #r.status_code = "Connection refused"
#except serial.serialutil.SerialException as e:
```

```
#print("couldn read")
#break
```