



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**HİBRİT ENERJİ HASADI İLE ÇALIŞAN NESNELERİN
İNTERNETİ TABANLI KABLOSUZ VERİ KAYDEDİCİ
TASARIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Umut BURKAZ

Çorum - 2026

**HİBRİT ENERJİ HASADI İLE ÇALIŞAN NESNELERİN İNTERNETİ
TABANLI KABLOSUZ VERİ KAYDEDİCİ TASARIMI**

Umut BURKAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Nuri KAPUCU

Çorum-2026



T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

ÖĞRENCİNİN

Adı ve Soyadı : Umut BURKAZ
Numarası : 220462013
Ana Bilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı
Danışmanı : Doç. Dr. Nuri KAPUCU
Tez Savunma Tarihi : 13.01.2026 **Saati**: 10.00
Tez Başlığı : Hibrit Enerji Hasadı ile Çalışan Nesnelerin İnterneti Tabanlı
Kablosuz Veri Kaydedici Tasarımı

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim Yönetmeliği'nin **9. maddesi** uyarınca, yapılmış olan tez savunma sınavı sonunda adayın tezinin **KABULÜNE OY BİRLİĞİ** ile karar verilmiştir.

TEZ SAVUNMA SINAV JÜRİSİ		KARAR	
Ünvanı Adı ve Soyadı	Görevi	Kabul	Ret
Doç. Dr. Mehmet BİLİM	Jüri Başkanı	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Doç. Dr. Nuri KAPUCU	Tez Danışmanı	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Doç. Dr. Murat Alparslan GÜNGÖR	Üye	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Prof. Dr. Osman ÇUBUK
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Umut BURKAZ



HİBRİT ENERJİ HASADI İLE ÇALIŞAN NESNELERİN İNTERNETİ TABANLI KABLOSUZ VERİ KAYDEDİCİ TASARIMI

Umut BURKAZ

ORCID: 0009-0009-3435-2497

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

Ocak 2026

ÖZET

Bu tez çalışmasında, kırsal veya merkezi alanlarda konumlandırılan Kablosuz Sensör Ağlarının (Wireless Sensor Network, WSN) enerji sürekliliği problemini çözmek amacıyla, Güneş ve Radyo Frekansı (RF) enerjisinden hibrit yapıda enerji hasat elde edebilen bir veri kaydedici tasarlanmıştır. Geleneksel batarya tabanlı sistemlerin bakım zorluklarını aşmayı hedefleyen bu tasarımın merkezinde, yüksek performanslı ESP32 mikrodenetleyicisi ve uzun menzilli LoRa haberleşme modülü yer almaktadır. Güç yönetim mimarisi, fotovoltaiik panellerden maksimum verimi sağlayan Maksimum Güç Noktası İzleme (Maximum Power Point Tracking, MPPT) tabanlı CN3791 entegresi ve ortamdaki elektromanyetik dalgaları geri kazanarak sisteme destek sağlayan AEM30940 RF enerji hasadı modülü üzerine inşa edilmiştir. Bu hibrit topoloji, güneş enerjisinin yetersiz kaldığı durumlarda RF birimini devreye alarak sistemin kesintisiz çalışmasına destek olmaktadır.

Gerçekleştirilen deneysel testlerde, sistemin 100 W/m^2 gibi düşük ışınım seviyelerinde dahi enerji depolayabildiği ve RF biriminin mikrowatt seviyesindeki giriş güçlerinde uyanarak batarya ömrünü uzattığı doğrulanmıştır. Ayrıca, veri bütünlüğünü sağlamak adına geliştirilen "çevrimdışı öncelikli" yazılım algoritması ile bağlantı kopukluklarında veriler yerel SD karta kaydedilmekte ve bağlantı sağlandığında bulut sunucuyla senkronize edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan sistemin enerji darboğazını aşarak endüstriyel ve tarımsal IoT uygulamaları için otonom, güvenilir ve sürdürülebilir bir çözüm olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kavramlar: Solar Enerji Hasadı, Hibrit Enerji Sistemi, RF Enerji Hasadı, ESP32, Veri Kaydedici.

Bilim Kodu: 93443

DESIGN OF AN INTERNET OF THINGS-BASED WIRELESS DATA LOGGER POWERED BY HYBRID ENERGY HARVESTING

Umut BURKAZ

ORCID: 0009-0009-3435-2497

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science Thesis

January 2026

ABSTRACT

In this thesis study, a hybrid data logger combining Solar and Radio Frequency (RF) energy has been designed to address the energy continuity problem of Wireless Sensor Networks deployed in rural or central areas. Aiming to overcome the maintenance challenges of traditional battery-based systems, this design features a high-performance ESP32 microcontroller and a long-range LoRa communication module at its core. The power management architecture is built upon the MPPT-based CN3791 IC, which ensures maximum efficiency from photovoltaic panels, and the AEM30940 RF energy harvesting module, which supports the system by recovering ambient electromagnetic waves. Thanks to this hybrid topology, the continuous operation of the system is guaranteed by the activation of the RF unit in cases where solar energy is insufficient.

Experimental tests confirmed that the system is capable of storing energy even at low irradiance levels such as 100 W/m^2 , and that the RF unit extends battery life by waking up at microwatt-level input powers. Furthermore, with the "offline-first" software algorithm developed to ensure data integrity, data is recorded to a local SD card during connection disruptions and synchronized with the cloud server once the connection is re-established. The obtained results demonstrate that the proposed system offers an autonomous, reliable, and sustainable solution for industrial and agricultural IoT applications by overcoming the energy bottleneck.

Key Terms: Solar Energy Harvesting, Hybrid Energy System, RF Energy Harvesting, ESP32, Data Logger.

Science Code: 93443

TEŐEKKÖR

Bu alıőmanın planlanmasında, araőtırılmasında, yűrűtűlmesinde ve oluőumunda desteęini ve katkılarını esirgemeyen, engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandıęım, kıymetli yűnlendirmeleriyle alıőmanın bilimsel temeller ıőıęında őekillenmesini saęlayan danıőman hocam Sayın Doç. Dr. Nuri KAPUCU'ya, tez çalıőmamın deneysel sűrelerinde ve saha testlerinde teknik altyapı imkanlarını sunarak katkı saęlayan Argesim Teknoloji A.Ő. ailesine ve çalıőma arkadaşlarıma teőekkűr ederim. Ayrıca bu alıőma, TŪBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlıęı (BİDEB) 2210-D Yurt İçi Sanayiye Yűnelik Yűksek Lisans Burs Programı (Baővuru No: 1649B022416464) kapsamında desteklenmiőtir. Saęladıkları bu destekten űtűrű TŪBİTAK'a teőekkűr ederim.

Umut BURKAZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

VERİ KAYDEDİCİLER

1.1. IoT Tabanlı Veri Kaydedici Uygulamaları	4
1.2. Solar Enerji Hasadı Yöntemleri	4
1.3. RF Enerji Hasadı ve Hibrit Sistemler.....	6
1.4. Tezin Katkıları	6

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

2.1. Güç ve Şarj Yönetim Sistemi	8
2.2. IoT Tabanlı Hibrit Veri Kaydedici İçin ESP32 Tasarımı	10
2.2.1. Şematik tasarımları.....	10
2.2.2. PCB yerleşimi	13
2.3. Sistemin Haberleşme Mimarisi.....	16

	Sayfa
2.4. Uzun Menzilli Kablosuz Haberleşme.....	19
2.5. Veri Depolama ve Güvenlik Birimi.....	20
2.6. Güç Yönetim Sistemi ve Solar Enerji Hasadı.....	21
2.6.1. Güneş panelleri.....	21
2.6.2. Solar şarj modülü.....	22
2.6.3. Batarya grubu	22
2.7. RF Enerji Hasadı	23

3. BÖLÜM

YAPILAN TESTLER VE ANALİZLERİ

3.1. Kurulan Sistemin İlk Testleri.....	25
3.2. Işınım Testleri ve Veri Doğrulama Metodolojisi.....	29
3.3. RF Enerji Hasadı Testleri ve Analizleri.....	40
3.3.1. Test metodolojisi ve deney kurulumu	41
3.3.2. Anten kazancı ve mesafe bazlı güç analizi.....	41
3.4. RF Depolama Birimi Şarj Testleri.....	42
3.4.1. Hızlı şarj testi (elektrolitik kapasitör) panelleri.....	42
3.4.2. Sürdürülebilir IoT testi (süper kapasitör)	42
3.5. Yük Entegrasyonu ve Kesintili Hesaplama (ESP32 Testi).....	43
3.5.1. 470uF kapasitör ile sürekli yeniden başlatma döngüsü problemi.....	43
3.5.2. Histerezis ve 0.1F süperkapasitör çözümü.....	43
3.6. Tasarlanan Sistemin Sadece Güneş Enerjisiyle Yapılan Uzun Süreli Testleri	43
3.7. Uzun Süreli Testleri Analizi.....	45
3.8. Batarya Kapasitesine Göre Çalışma Analizi.....	54
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKÇA.....	59

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 3.1. Tarama testlerinde elde edilen ışınlm ve ölçülen voltaj değerleri	30
Tablo 3.2. Mesafeye göre giriş gücü ve port konfigürasyonu	41
Tablo 3.3. 470 μ F kapasitör dolm süreleri (0V -> 3.3V)	42
Tablo 3.4. 0.1F (5.5V) Süperkapasitör Dolm Süreleri (3.0V -> 3.5V).....	42
Tablo 3.5. Uzun süreli testlere ait takip edilen veriler için günlük ortalama, en büyük ve en küçük değerler	46
Tablo 3.6. Örnek bir günlük (24 saatlik) veriler.....	48
Tablo 3.7. Batarya kapasitesine göre sistemin enerji hasadı yapmadan toplam çalışma süresi	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Güç ve şarj yönetim sistemi.....	9
Şekil 2.2. Güç arayüzü şematiği çizim görüntüsü.....	11
Şekil 2.3. USB arayüzünün şematiği çizim görüntüsü.....	12
Şekil 2.4. Mikrodenetleyici arayüzü şematiği çizim görüntüsü.....	13
Şekil 2.5. Üst katman yerleşimi 2D görünümü.....	14
Şekil 2.6. Alt katman yerleşimi 2D görünümü.....	14
Şekil 2.7. 3D görünüm ön yüz.....	15
Şekil 2.8. 3D görünüm arka yüz.....	15
Şekil 2.9. Sistemin haberleşme entegrasyonu.....	16
Şekil 2.10. Sistemin yazılım akış diyagramı	18
Şekil 2.11. UART bağlantı şeması	19
Şekil 2.12. SPI Haberleşme protokolünün bağlantı şeması	20
Şekil 2.13. ZW-11069 Model numaralı güneş paneli	21
Şekil 2.14. CN3791 Solar şarj modülü	22
Şekil 2.15. Kullanılan Li-ion piller	22
Şekil 3.1. ESP32 modülünün 3.3V girişinin osiloskop görüntüsü	29
Şekil 3.2. Tarama testi esnasında ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi	40
Şekil 3.3. Tarama testi esnasında ışınım değerinin zamana bağlı değişimi	40
Şekil 3.4. Verilerin IoT tabanlı olarak aktarıldığı web sayfası görüntüsü.....	46
Şekil 3.5. Takip edilen veriler için örnek bir günlük ışınım verileri.....	53
Şekil 3.6. Takip edilen veriler için örnek bir günlük farklı verilerin değişimi	54
Şekil 3.7. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %100 dolu olduğu durumda çalışma süresi.....	54
Şekil 3.8. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %75 dolu olduğu durumda çalışma süresi.....	55

Şekil 3.9. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %50 dolu olduğu durumda çalışma süresi.....**55**

Şekil 3.10. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %25 dolu olduğu durumda çalışma süresi.....**56**



RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. AEM30940 EVK modülü.....	23
Resim 3.1. Güneş ışınımı simülasyonu için test düzeneği.....	25
Resim 3.2. DC-DC Yükseltici dönüştürücü	26
Resim 3.3. Güneş paneli şarj devresi testi.....	27
Resim 3.4. Kullanılan batarya yönetim sistemi devresi	27
Resim 3.5. Referans sensör olarak kullanılan ışınım sensörü	29
Resim 3.6. Referans ışınım sensörü ve panellerin eş düzlemlili konumlandırılması.....	30
Resim 3.7. Veri kaydedici sistemin test edildiği dış ortam görüntüsü.....	44
Resim 3.8. Tasarlanan sistemin nihai devre yapısı.....	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Amper
dBm	Desibel-miliwatt
Hz	Hertz
I	Akım
V	Volt
W	Wat
Ω	Ohm
η	Verim (Efficiency)
μA	Mikroamper

Kısaltmalar

ADC	Analog-Dijital Dönüştürücü
AES	Gelişmiş Şifreleme Standardı
AWS	Amazon Web Servisleri
BOM	Malzeme Listesi
CC	Sabit Akım
CV	Sabit Gerilim
DC	Doğru Akım
DSSC	Boya Duyarlı Güneş Panelleri
EEPROM	Elektriksel Olarak Silinebilir Programlanabilir Salt Okunur
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
ESD	Elektrostatik Boşalma
ESP32	Espressif Systems 32-bit Mikrodenetleyici
ESR	Eşdeğer Seri Direnç

FIFO	İlk Giren İlk Çıkar
GPIO	Genel Amaçlı Giriş/Çıkış
GSM	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
IIoT	Endüstriyel Nesnelerin İnterneti
IoT	Nesnelerin İnterneti
LDO	Düşük Düşümlü Regülatör
LoRaWAN	Uzun Menzilli Geniş Alan Ağı
MCU	Mikrodenetleyici Birimi
MPPT	Maksimum Güç Noktası Takibi
MQTT	Mesaj Kuyruklama Telemetry Taşıma
NB-IoT	Dar Bant Nesnelerin İnterneti
P&O	Değiştir ve Gözle
PCB	Baskı Devre Kartı
PMIC	Güç Yönetimi Entegre Devresi
PV	Fotovoltaik
RF	Radyo Frekansı
RTC	Gerçek Zamanlı Saat
SD Card	Güvenli Sayısal Hafıza Kartı
SoC	Çip Üzerinde Sistem
SSL/TLS	Güvenli Yuva Katmanı / Taşıma Katmanı Güvenliği
UART	Evrensel Asenkron Alıcı-Verici
USB	Evrensel Seri Veri Yolu Wi-Fi
Wi-Fi	Kablosuz Bağlantı Teknolojisi
WSN	Kablosuz Sensör Ağları

GİRİŞ

Bu bölüm, tezin temelini oluşturan veri kaydedici sistemlerin mimarisi, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) tabanlı izleme uygulamaları ve enerji hasadı yöntemlerinin (Güneş ve Radyo Frekans) güncel literatürdeki yerini incelemektedir. Bu tez çalışmasında güneş enerjisi birincil kaynak, Radyo Frekans (Radio Frequency, RF) enerjisi ise yardımcı kaynak olarak konumlandırılmıştır.

Veri kaydediciler, sıcaklık, nem veya basınç gibi çevresel verileri belirli zaman aralıklarıyla ölçen ve bu bilgileri izleme sistemlerine ileten elektronik cihazlardır. Bu sistemler temel olarak; ortamı algılayan sensörler, veriyi işleyen bir mikrodenetleyici ve nadiren bu bilgilerin tutulduğu bir depolama biriminden oluşur. Veri kaydedicilerin en önemli özelliği, bir bilgisayara veya operatöre sürekli bağlı kalmadan, uzun süre boyunca kendi başına çalışabilmeleridir. İnsan müdahalesine gerek duymadan 7/24 kayıt yapabildikleri için, özellikle meteorolojik ölçümler, enerji takibi ve endüstriyel tesislerin izlenmesi gibi sürekli veri akışı gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılırlar.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bu cihazlar, sadece veriyi hafıza kartına yazan basit kutular olmaktan çıkarak, IoT sayesinde internete bağlanabilen akıllı istasyonlara dönüşmüştür. Yeni nesil veri kaydediciler, topladıkları verileri Wi-Fi veya Uzun Menzilli Haberleşme (Long Range, LoRa) gibi kablosuz teknolojilerle anlık olarak bulut sunucularına gönderebilmektedir. Bu sayede kullanıcılar, kilometrelerce uzaktaki cihazların verilerine buldukları yerden erişebilir ve olası arızaları önceden fark edebilirler. Günümüzde tasarlanan modern sistemlerde artık sadece veri kaydı değil; düşük pil tüketimi, zorlu hava koşullarına dayanıklılık ve güneş enerjisi gibi kaynaklarla kendi enerjisini üretebilme yeteneği de standart bir gereklilik haline gelmiştir.

Dijitalleşme çağında, fiziksel dünyadan verilerin toplanması, işlenmesi ve anlamlı bilgilere dönüştürülmesi süreci, Endüstri 4.0 ve akıllı tarım gibi modern paradigmanın temelini oluşturmaktadır. Bu süreçte, çevresel parametrelerin sürekli ve güvenilir bir şekilde izlenmesini sağlayan veri kaydedici sistemlerin önemi giderek artmaktadır.

Ancak, sensör ağlarının kapsama alanının genişlemesi ve kurulum noktalarının çeşitlenmesi, bu sistemlerin önündeki en büyük engeli ortaya çıkarmıştır: Enerji Sürdürülebilirliği. Özellikle kırsal alanlarda, ormanlık bölgelerde veya yüksek gerilim hatlarında konumlandırılan cihazların pillerinin değiştirilmesi veya şebeke elektriğine bağlanması, hem yüksek işçilik maliyetleri getirmekte hem de operasyonel zorluklar yaratmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bu cihazlar, sadece veriyi hafıza kartına yazan pasif kutular olmaktan çıkıp, IoT teknolojileri sayesinde internete bağlanabilen, karar verebilen ve çevresiyle etkileşime giren akıllı istasyonlara dönüşmüştür.

Bu dönüşümde iletişim teknolojilerinin evrimi kritik bir rol oynamaktadır. Yeni nesil veri kaydediciler, topladıkları verileri Wi-Fi gibi kısa menzilli protokollerin yanı sıra,

kilometrelerce menzile ulaşabilen Düşük Güçlü Geniş Alan Ağları (Low Power Wide Area Network, LPWAN) teknolojileriyle de aktarabilmektedir. Özellikle bu tez çalışmasında üzerinde durulan LoRa teknolojisi, düşük enerji tüketimi ile uzun mesafeli veri iletimini mümkün kılarak, IoT tabanlı veri kaydedicilerin coğrafi sınırlarını ortadan kaldıracak bir teknolojidir.

Günümüzde tasarlanan modern sistemlerde artık sadece veri kaydı ve iletimi yeterli görülmemektedir. "Tak ve Unut" (Deploy and Forget) felsefesine uygun olarak tasarlanan cihazlarda; ultra düşük güç tüketimi, zorlu hava koşullarına dayanıklılık ve en önemlisi enerji hasadı yeteneği standart bir gereklilik haline gelmiştir. Enerji hasadı, ortamdaki atıl enerjinin (güneş, rüzgar, titreşim, RF) elektriksel enerjiye dönüştürülerek sistemin bataryasını şarj etmesi işlemidir. Bu yaklaşım, batarya değiştirme maliyetlerini minimize ederken, cihazların kullanım ömrünü uzatmayı hedefler.

Bu bağlamda, güneş enerjisi en olgun ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip kaynak olarak öne çıksa da, gece saatlerinde veya kapalı hava koşullarında enerji üretiminin durması, sistemin güvenilirliğini tehdit eden bir faktördür. İşte bu noktada, ortamda halihazırda bulunan ve Wi-Fi, GSM, radyo yayınları gibi kaynaklardan yayılan RF enerjisinin hasat edilmesi fikri, tamamlayıcı bir çözüm olarak literatürde yerini almaktadır. RF enerjisi, güneş enerjisine kıyasla çok daha düşük güç seviyelerine sahip olsa da, günün her saati ve kapalı ortamlarda dahi mevcut olabilmesiyle, sistemin derin uyku modundaki enerji ihtiyacını karşılama veya bataryanın tamamen tükenmesini engelleme (can suyu olma) potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; yüksek işlem gücüne sahip ESP32 mikrodenetleyicisi, uzun menzilli LoRa haberleşme altyapısı ve Güneş-RF hibrit enerji hasadı yöntemlerini tek bir mimaride birleştirerek, enerji darboğazını aşan, otonom ve sürdürülebilir bir veri kaydedici sistemi ortaya koymayı amaçlamaktadır.

1. BÖLÜM

VERİ KAYDEDİCİLER

Veri kaydedici sistemlerin tasarımı, analog sinyallerin dijital veriye dönüştürülmesi, işlenmesi ve güvenli bir şekilde depolanması süreçlerini kapsamaktadır. Geleneksel veri kaydedicilerde temel bileşenler; sensör arayüzleri, mikrodenetleyici birimi (Micro Controller Unit, MCU), bellek modülü ve güç yönetim katmanından oluşur. Literatürdeki çalışmalar, özellikle düşük güç tüketimine sahip mikrodenetleyicilerin (STM32, MSP430, ESP32 vb.) sistemin ömrünü uzatmada kritik rol oynadığını göstermektedir (Magno vd., 2016; Ferdoush ve Li, 2014; Ntabeni vd., 2024). Verinin doğruluğu açısından Analog-Dijital Dönüştürücü (Analog-Digital Converter, ADC) çözünürlüğü hayati önem taşımakta olup, çevresel gürültülerin filtrelenmesi için donanımsal ve yazılımsal filtreleme teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır (Mukaro ve Carelse, 1999; Sharif vd., 2021; Khan vd., 2024).

Veri depolama birimleri, kaydedicilerin sahadaki çalışma süresini belirleyen bir diğer faktördür. Güvenli Sayısal Hafıza Kartı (Secure Digital Memory Card, SD Card) tabanlı sistemler yüksek kapasite sunarken, Silinip Programlanabilir Salt Okunur Bellek (Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM) veya Flash bellek tabanlı çözümler daha düşük enerji tüketimi ve hızlı yazma döngüleri nedeniyle tercih edilmektedir (Ali ve Ali, 2019; Gaspar vd., 2025). Araştırmacılar, özellikle uzun süreli çevresel izleme projelerinde veri bütünlüğünü sağlamak adına, veri sıkıştırma algoritmalarının ve İlk Giren İlk Çıkar (First-In-First-Out, FIFO) bellek yapılarının önemine vurgu yapmaktadır (Alippi vd., 2011).

Güç verimliliği, otonom veri kaydediciler için en büyük tasarım zorluğudur. Uyku modları (deep-sleep) ve kesme tabanlı uyanma mekanizmaları, sistemin boşa (idle) geçen süredeki akım çekimini mikroamper seviyelerine düşürmek için kullanılmaktadır (Vishwakarma vd., 2019). Modern tasarımlarda, sensörlerin sadece ölçüm anında beslenmesini sağlayan güç anahtarlama (power gating) teknikleri, pil ömrünü %40'a kadar artırabilmektedir (Saraswat vd., 2018; Hou vd., 2024). Bu teknikler, enerji hasadı yapan sistemler için vazgeçilmezdir.

Sistem güvenilirliği açısından gerçek zamanlı saat (Real Time Clock, RTC) entegrasyonu, verilerin zaman damgası ile etiketlenmesi için zorunludur. Harici RTC modüllerinin kullanımı, mikrodenetleyicinin dahili zamanlayıcısına göre sıcaklık değişimlerinden daha az etkilendiği için veri tutarlılığını artırmaktadır (Gamage vd., 2020; Motlagh vd., 2020). Ayrıca, veri kaydedicilerin zorlu saha koşullarında çalışabilmesi için endüstriyel standartlarda PCB tasarımı ve Elektromanyetik Uyumluluk (Electromagnetic Compatibility, EMC) testleri literatürde geniş yer bulmaktadır (Visconti vd., 2016). Son yıllarda geliştirilen veri kaydedicilerde, modülerlik ön plana çıkmaktadır. Kullanıcının ihtiyacına göre sensör ekleyip çıkarabildiği "Tak-Çalıştır" (Plug-and-Play) mimariler, sistemin esnekliğini artırmaktadır (Oliveira ve Rodrigues, 2011; Amorim vd., 2024). Bu esneklik, farklı fiziksel büyüklüklerin (sıcaklık, nem, titreşim vb.) aynı platform üzerinden izlenmesine olanak tanır.

1.1. IoT Tabanlı Veri Kaydedici Uygulamaları

IoT paradigması, veri kaydedicilerin sadece "kaydeden" cihazlar olmaktan çıkıp, veriyi buluta ileten akıllı düğümlere dönüşmesini sağlamıştır. Wi-Fi, LoRaWAN, ZigBee ve Dar Bant Nesnelerin İnterneti (Narrowband Internet of Things, NB-IoT) gibi kablosuz iletişim protokolleri, veri kaydedicilerin coğrafi kısıtlamalarını ortadan kaldırmıştır (Raza vd., 2017; Centenaro vd., 2016). Özellikle tarımsal izleme alanında yapılan çalışmalarda, geniş arazilere yayılmış sensör düğümlerinin veriyi merkezi bir ağ geçidine ilettiği topolojiler yaygındır (Kodali ve Sahu, 2016).

ESP32 ve ESP8266 gibi Wi-Fi özellikli çip üzerindeki sistem (system on chip, SoC) modülleri, düşük maliyetleri ve yüksek işlem kapasiteleri nedeniyle akademik çalışmalarda sıkça tercih edilmektedir. Bu modüller kullanılarak geliştirilen hava kalitesi izleme istasyonları, verileri anlık olarak ThingSpeak, Amazon Web Servisi Nesnelerin İnterneti (Amazon Web Services Internet of Things, AWS IoT) veya En Az Mesaj Kuyruk Telemetri Taşımacılığı (Message Queuing Telemetry Transport, MQTT) sunucularına ileterek uzaktan izlemeyi mümkün kılmaktadır (Chen vd., 2018; Zanjali ve Talmale, 2016). Bulut tabanlı sistemler, toplanan veriler üzerinde büyük veri analizi ve makine öğrenmesi algoritmalarının koşullanmasına da zemin hazırlar.

Endüstriyel IoT (IIoT) kapsamında, motor titreşim analizi veya enerji tüketimi takibi yapan akıllı veri kaydediciler, kestirimci bakım (predictive maintenance) uygulamalarının temelini oluşturur. Bu sistemlerde veri kaybını önlemek için, internet bağlantısı kesildiğinde veriyi yerel hafızaya kaydeden ve bağlantı sağlandığında senkronize eden hibrit yapılar önerilmektedir (Al-Ali vd., 2017; Gungor vd., 2011). Güvenlik, IoT tabanlı kaydedicilerde bir diğer önemli başlıktır; veri şifreleme (AES, SSL/TLS) yöntemleri, verinin uçtan uca güvenliğini sağlamak için literatürde standart hale gelmiştir (Frustraci vd., 2018).

Sağlık alanında giyilebilir IoT veri kaydediciler, hastaların yaşamsal verilerini (nabız, SpO2) sürekli izleyerek doktorlara raporlamaktadır. Bu cihazlarda enerji verimliliği ve ergonomi ön plandadır (Islam vd., 2015). Benzer şekilde akıllı şehir uygulamalarında, trafik yoğunluğunu veya gürültü seviyesini ölçen dağıtık sensör ağları, şehir planlamasında kritik veriler sunmaktadır (Zanella vd., 2014).

1.2. Solar Enerji Hasadı Yöntemleri

Bu tez çalışmasının birincil enerji kaynağı olan güneş enerjisi hasadı, kablosuz sensör ağlarının enerji darboğazını aşmak için en uygun ve verimli yöntemdir. Fotovoltaik (PV) panellerin akım-gerilim karakteristiği çevresel koşullara göre değiştiğinden, panelden maksimum gücü çekebilmek için Maksimum Güç Noktası İzleme (Maximum Power Point Tracking, MPPT) algoritmaları kullanılmaktadır (Raghunathan vd., 2005; Li vd., 2011). Literatürde "Değiştir ve

Gözle" (Perturb and Observe- P&O) ve "Artımsal İletkenlik" (Incremental Conductance) algoritmaları, basit yapıları ve yüksek verimleri nedeniyle IoT cihazlarında sıkça tercih edilmektedir (Elgendy vd., 2012).

Maksimum güç noktasında yakalanan ve doğası gereği kararsız olan bu ham elektriksel enerjinin, depolama birimlerine güvenli bir şekilde aktarılması güç yönetim katmanının en kritik aşamasını oluşturmaktadır. Fotovoltaik hücrelerden elde edilen gerilim, depolama biriminin (batarya bloğu) anlık şarj kabul potansiyeli ile doğrudan uyumlu olmadığından, arada bir güç şartlandırma ve regülasyon mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada devreye giren şarj kontrol üniteleri, MPPT algoritmasından gelen optimize edilmiş gücü, bataryanın elektrokimyasal yapısına zarar vermeyecek akım ve gerilim seviyelerine dönüştürür. Bu regülasyon işlemi, güneş ışınımının dalgalı olduğu durumlarda dahi bataryaya giden enerjinin sürekliliğini sağlayarak, sistemin toplam enerji verimliliğini artırmaktadır.

Depolama sürecinin dinamikleri incelendiğinde ise, sistemin enerji rezervi olarak kullanılan Lityum-iyon tabanlı bataryaların şarj karakteristiği belirleyici rol oynamaktadır. Depolama işlemi rastgele bir enerji transferi değil; Sabit Akım (Constant Current- CC) ve Sabit Gerilim (Constant Voltage- CV) prensiplerine dayalı çok aşamalı bir prosedürdür. Batarya boşken veya düşük voltajdayken, sistem öncelikle sabit akım modunda çalışarak enerjiyi hızla hücrelere transfer eder; doyumluk gerilimine (genellikle 4.2V) ulaşıldığında ise sabit gerilim moduna geçerek şarj akımını kademeli olarak düşürür ve hücreleri tam kapasiteye ulaştırır. Bu kontrollü depolama yöntemi, hem güneşten elde edilen kısıtlı enerjinin en az kayıpla kimyasal enerjiye dönüştürülmesini sağlar hem de batarya döngü ömrünü (cycle life) koruyarak sensör düğümlerinin sahada uzun yıllar otonom çalışmasına olanak tanır.

Düşük güçlü sistemlerde, MPPT devrelerinin kendi güç tüketimi de kritik bir parametredir. Bu nedenle araştırmacılar, fraksiyonel açık devre gerilimi (Fractional Open Circuit Voltage) gibi daha az işlemci gücü gerektiren ve pasif bileşenlerle uygulanabilen pilot hücre tabanlı MPPT yöntemlerini önermektedir (Brunelli vd., 2008; Brunelli vd., 2009). Ayrıca, süperkapasitörlerin bataryalara göre daha hızlı şarj olabilmesi ve daha uzun döngü ömrüne sahip olması, güneş enerjisi depolama birimi olarak kullanımlarını artırmıştır (Shao vd., 2013).

İçmekan (indoor) ışık hasadı, standart güneş panellerinin yetersiz kaldığı durumlarda amorf silikon veya boya duyarlı güneş pillerinin (DSSC) kullanımını gerektirir. Bu alandaki çalışmalar, yapay ışık kaynaklarından mikrowatt seviyesinde enerji toplayarak IoT düğümlerinin pil ömrünü yıllarca uzatmayı hedeflemektedir (Wang vd., 2010; Gorlatova vd., 2015). Güç Yönetim Entegreleri (PMIC), hasat edilen düzensiz enerjiyi regüle ederek mikrodenetleyiciye kararlı bir voltaj sunmak için modern tasarımlarda merkezi bir rol oynar (Bandyopadhyay ve Chandrakasan, 2012).

Güneş enerjisi sistemlerinin boyutlandırılması, coğrafi konum ve mevsimsel verilere dayalı simülasyonlarla optimize edilmelidir. Aşırı boyutlandırma maliyeti artırırken, yetersiz

boyutlandırma sistemin gece veya bulutlu günlerde kapanmasına neden olur (Kansal vd., 2007). Bu dengeyi sağlamak için, uyarlanabilir çalışma döngüsü algoritmaları, mevcut enerji seviyesine göre sensörün veri gönderme sıklığını dinamik olarak ayarlamaktadır (Vigorito vd., 2007).

1.3. RF Enerjisi Hasadı ve Hibrit Sistemler

RF enerjisi hasadı, ortamdaki radyo frekans dalgalarını (GSM, Wi-Fi, TV yayınları) DC elektrik enerjisine dönüştürme işlemidir ve bu tez çalışmasında "yardımcı" enerji kaynağı olarak ele alınmaktadır. RF enerji hasadının kalbi doğrultucu anten (Rectifier + Antenna) yapısıdır. Literatürde, farklı frekans bantlarını aynı anda toplayabilen geniş bantlı (wideband) veya çok bantlı (multiband) anten tasarımları, toplanan toplam gücü artırmak için önerilmiştir (Visser ve Vullers, 2013; Valenta ve Durgin, 2014). Bu sayede enerji hasat edilebilecek RF sinyalleri daha geniş frekans aralıklarında toplanabilir.

Ortamdaki RF güç yoğunluğunun düşük olması (genellikle -20 dBm ile 0 dBm arasında), empedans uyumlama devrelerinin tasarımını kritik hale getirir. Maksimum güç transferi için anten ile doğrultucu devre arasındaki empedansın mükemmel eşleşmesi gerekmektedir (Popovic vd., 2013). Schottky diyotlar, düşük ileri yön gerilim düşümleri ve hızlı anahtarlama özellikleri nedeniyle RF doğrultucu devrelerinde standart olarak kullanılmaktadır (Olgun vd., 2012).

RF enerjisi, güneş enerjisinin aksine gece ve gündüz, kapalı veya açık alanda (kaynak mevcutsa) süreklilik arz edebilir, ancak güç yoğunluğu çok daha düşüktür. Bu nedenle literatürdeki hibrit çalışmalar, RF enerjisini genellikle sistemi "uyandırma" (wake-up radio) sinyali olarak veya derin uyku modundaki sızıntı akımlarını telafi etmek için kullanmaktadır (Vullers vd., 2009; Kim vd., 2021).

Güneş ve RF enerjisinin birleşimi, sistemin güvenilirliğini (reliability) maksimize eder. Güneşin olmadığı gece saatlerinde veya panelin kirlendiği durumlarda RF enerji hasadı, bataryanın tamamen boşalmasını önleyen bir "can suyu" görevi görür (Liu vd., 2018; Soyata vd., 2018). Çoklu kaynaklı enerji hasadı devrelerinde, her iki kaynaktan gelen enerjiyi tek bir depolama birimine aktaran güç birleştirici (power combiner) topolojileri üzerine yoğun araştırmalar mevcuttur (Weddell vd., 2013). RF ve Güneş hibrit sistemleri, kendi kendine yeten (self-sustainable) IoT düğümleri için en umut verici çözümlerden biri olarak kabul edilmektedir (Chalasanı ve Conrad, 2008; Shaikh ve Zeadally, 2016).

1.4. Tezin Katkıları

Bu tez çalışması, yüksek işlem gücüne sahip ESP32 mikrodenetleyicisi, uzun menzilli LoRa haberleşme altyapısı ve Güneş-RF hibrit enerji hasadı yöntemlerini tek bir mimaride

birleştirerek, enerji darboğazını aşan, otonom ve sũrdũrũlebilir bir veri kaydedici sistemi ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Buna göre tez çalışmasının literatũre sağladığı-zgũn katkılar şu şekildedir:

- Literatũrde hibrit enerji hasadı yöntemleri ve IoT ağ geçidi tasarımları genellikle bağımsız araştırma konuları olarak incelenmiştir. Ancak bu çalışma; hibrit (RF+Solar) gũ kaynaklarıyla beslenen, LoRa ve Wi-Fi protokollerini tek bir mimaride birleştiren ve veri bũtũnlũęũnũ 'depola-ve-ilet' mekanizmasıyla çevrimdışı öncelikli olarak sağlayan bũtũnleřik bir sistem sunması bakımından ayrışmaktadır. Tasarlanan donanımın saha testleriyle doğrulan operasyonel kararlılığı, literatũrde eksikliği hissedilen otonom ve kayıpsız veri kaydedici ihtiyacına zgũn bir zũm getirmektedir.
- nceki çalışmalarda kullanılan modũler yapıların ötesine geçilerek, endũstriyel standartlarda zgũn bir donanım mimarisinin (PCB) gerçekleştirilmesidir. Hazır geliştirme kartlarında yaşanan RF empedans uyumsuzlukları ve gereksiz gũ tũketimi problemleri, bu tez çalışmasında özel tasarlanan ve AEM30940 ile CN3791 entegrelerini tek bir çatı altında toplayan gũ katmanı tasarımıyla elimine edilmiştir.
- Ayrıca, geliştirilen SD kart tabanlı "evrimdışı öncelikli" senkronizasyon algoritması ile veri kaybı riski donanımsal ve yazılımsal olarak ortadan kaldırılmış; böylece önerilen sistem, laboratuvar leğinden çıkarılarak sahada gũvenle kullanılabilir tam otonom ve sũrdũrũlebilir bir rũn modeline dnũřtũrũlmũřtũr.

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, tasarlanan veri kaydedicinin temel bileşenleri olan güç yönetim sistemi ve haberleşme mimarisinin çalışması detaylı olarak açıklanmaktadır. Tasarlanan sistem, güneş enerjisi ve RF dalgaları ile hem enerji depolamakta hem de aynı zamanda çalışmaya devam etmektedir. Çalışma esnasında sürekli olarak veri toplama, kaydetme ve buluta eş zamanlı veri aktarımı yapılmaktadır.

2.1. Güç ve Şarj Yönetim Sistemi

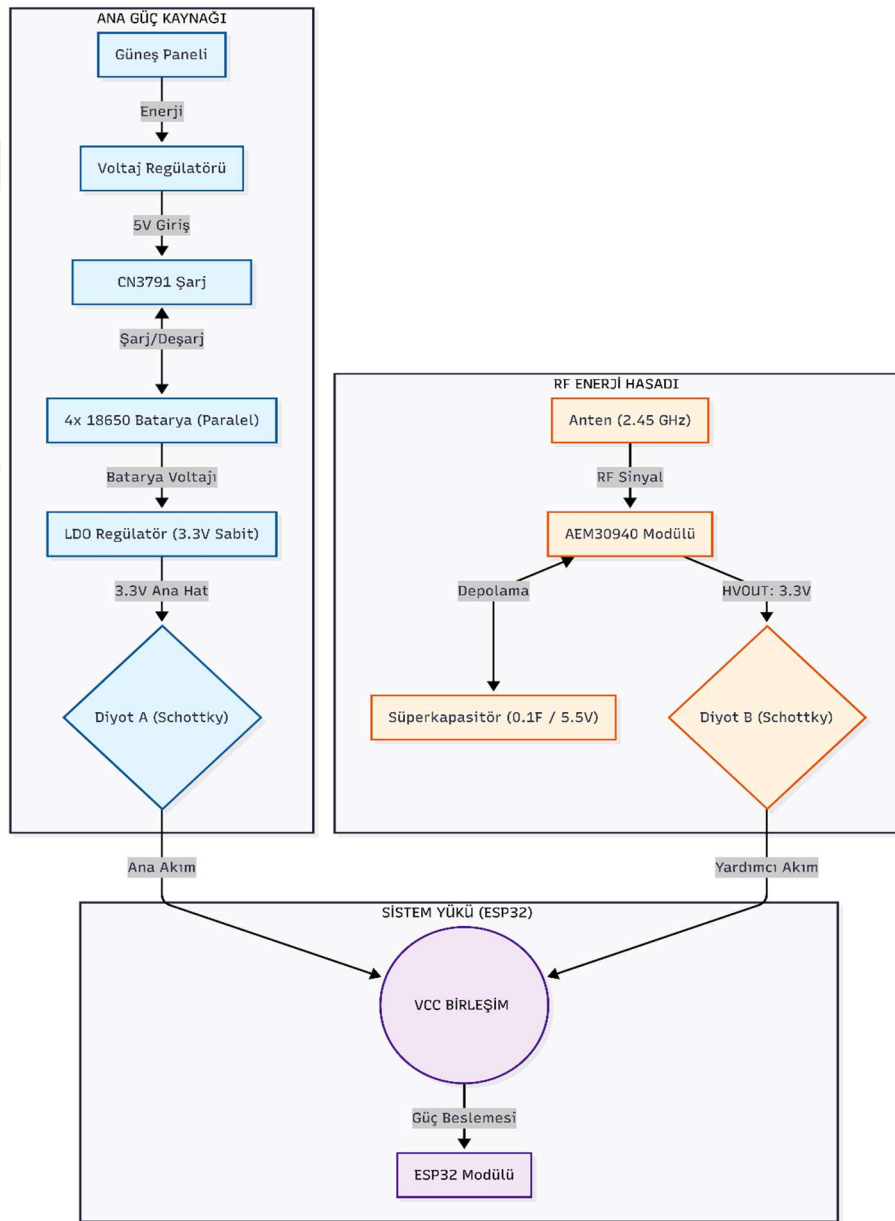
IoT uygulamalarında, düşük güç tüketimi, yüksek işlem kapasitesi ve entegre kablosuz bağlantı özellikleri nedeniyle mikrodenetleyici seçimi kritik bir öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, sistemin merkezi işlem birimi olarak özel tasarlanan ve ESP32 yonga seti üzerine inşa edilen bir kontrol kartı kullanılmıştır. ESP32, çift çekirdekli yapısı, dahili Wi-Fi ve Bluetooth modülleri ile IoT projelerinde endüstriyel standart haline gelmiş güçlü bir mikrodenetleyicidir. Yüksek saat hızlarına çıkabilmesi ve zengin çevresel arayüz Seri Çevresel Arayüz (Serial Peripheral Interface, SPI), Entegreler Arası Haberleşme (Inter-Integrated Circuit, I2C), Evrensel Asenkron Alıcı-Verici (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, UART) vb. desteği, karmaşık sensör ağlarının yönetimi için ideal bir platform sunar.

Tasarlanan sistemin merkezinde yer alan ESP32 tabanlı bu kart, tüm çevresel birimlerin yönetiminden ve veri akışının koordinasyonundan sorumludur. Kart tasarımı, sistemin ihtiyaç duyduğu çoklu protokol mimarisini destekleyecek şekilde optimize edilmiştir. ESP32, güç yönetim biriminden gelen verileri okumak, LoRa üzerinden gelen telemetri verilerini işlemek ve bu verileri hem SD karta yazmak hem de Wi-Fi üzerinden buluta aktarmakla görevlidir.

Mikrodenetleyici, sistemde sadece bir veri aktarıcı olarak değil, aynı zamanda veriyi yerelde işleyen akıllı bir uç cihaz olarak görev yapmaktadır. Sistemin kararlılığını sağlamak adına ESP32; INA219 sensörü ile I2C, SD kart modülü ile SPI ve LoRa modülü ile UART protokolleri üzerinden eş zamanlı haberleşme sağlayacak şekilde programlanmıştır. Ayrıca, güç tüketimini minimize etmek amacıyla, ölçüm yapılmayan zaman dilimlerinde işlemcinin uyku modlarına geçişi ve enerji yönetimi yine bu merkezi ünite tarafından kontrol edilmektedir.

Şekil 2.1'de, tasarlanan veri kaydedici sistemin enerji yönetim birimi gösterilmektedir. Sistem, 5V 220mAh 3 adet güneş panelinin paralel bağlanmasıyla enerji hasat etmektedir. Bununla birlikte RF dalgalarını elektrik enerjisine çevirmek için AEM30940 EVK modülü kullanılmıştır. Bu sayede, güneş ışığından ve RF dalgalarından elde edilen enerji elektriğe dönüştürülerek sistemin enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Güneş panellerinin çıkış voltajı, bir regülatör aracılığıyla 4V-5V seviyelerine yükseltilmektedir ve bu voltaj CH3791 solar şarj modülüne iletilmektedir. CH3791 modülü, her iki işlevi bir arada yerine getirir. Bir yandan 18650 model

2900mAh 4 adet paralel bağlı lityum iyon pil setini şarj eder, diğer yandan bu pillerden alınan güçle tüm sistemin çalışmasını sağlar. Bu sayede sistem, güneş enerjisinin sürekli olarak depolanmasını ve pil setinin şarj edilmesini mümkün kılar. Sistem güç mimarisi, 'Load Sharing' (Yük Paylaşımı) topolojisi kullanılarak hibritleştirilmiştir. Ana güç hattı (Li-ion Batarya) ve Hasat hattı (RF), ESP32 yükü öncesinde Schottky diyotlar ile izole edilmiş, böylece kaynaklar arası ters akım problemleri donanımsal olarak engellenmiştir. Şekil 2.1'de yer alan diyagramda Diyot A ve Diyot B olarak belirtilen diyotlar bunun için kullanılmıştır. Schottky diyot kullanılmasının sebebi normal diyotların üzerinde 0.7V gerilim düşümünün olmasıdır. Schottky diyotlarda bu 0.2V - 0.3V seviyelerindedir. Bu değer RF hasadı açısından oldukça önemlidir.



Şekil 2.1. Güç ve şarj yönetim sistemi

Pillerin şarj durumu, INA219 akıllı enerji ölçüm modülü ile izlenmektedir. Bu modül, pil voltajı, akım ve güç verilerini ölçerek, sistemin enerji verimliliği ve sağlamlığı hakkında sürekli bilgi sağlar. Bu sayede kullanıcı hem talep ettiği verileri izleme fırsatına erişebilmekte hem de kullandığı sistemin güç yönetimini anlık olarak takip edebilmektedir.

2.2. IoT Tabanlı Hibrit Veri Kaydedici İçin ESP32 Tasarımı

Piyasada bulunan hazır ESP32 modüllerinin (NodeMCU, ESP32-DevKit vb.) önemli bir kısmı, orijinal üretim standartlarının dışında kalan replika veya klon olarak nitelendirilen varyasyonlardan oluşmaktadır. Bu tip kartlarda maliyeti düşürmek amacıyla kullanılan pasif bileşenlerin (kapasitör, direnç, voltaj regülatörü) tolerans değerleri ve sıcaklık dayanımları endüstriyel gereksinimleri karşılamamaktadır. Özellikle RF tabanlı veri aktarım süreçlerinde, kalitesiz filtre kapasitörlerinin neden olduğu parazitik gürültüler, veri paketlerinde kayıplara ve iletişim kopukluklarına yol açabilmektedir. Tasarlanan özgün kartta ise düşük Eşdeğer Seri Direnç (Equivalent Series Resistance, ESR) değerine sahip, %1 toleranslı ve yüksek kaliteli bileşenler tercih edilerek veri bütünlüğünün güvenliği sağlanmıştır.

Hazır modüllerin birçoğunda, anten yolu ile RF çıkış pini arasındaki empedans uyumu, seri üretim hataları nedeniyle 50 Ohm standardından sapabilmektedir. Bu durum, yansıyan güç problemlerine ve Wi-Fi/LoRa iletişim menzilinün kısılmasına neden olmaktadır. Kısaca bu durum, iletilmek istenen sinyalin antenden çıkamayıp geri tepmesi anlamına gelir. Özgün tasarımda ise PCB çizimi esnasında RF yol hatları, EMC kurallarına göre optimize edilmiş ve sinyal-gürültü oranı (signal to noise ratio, SNR) maksimize edilmiştir.

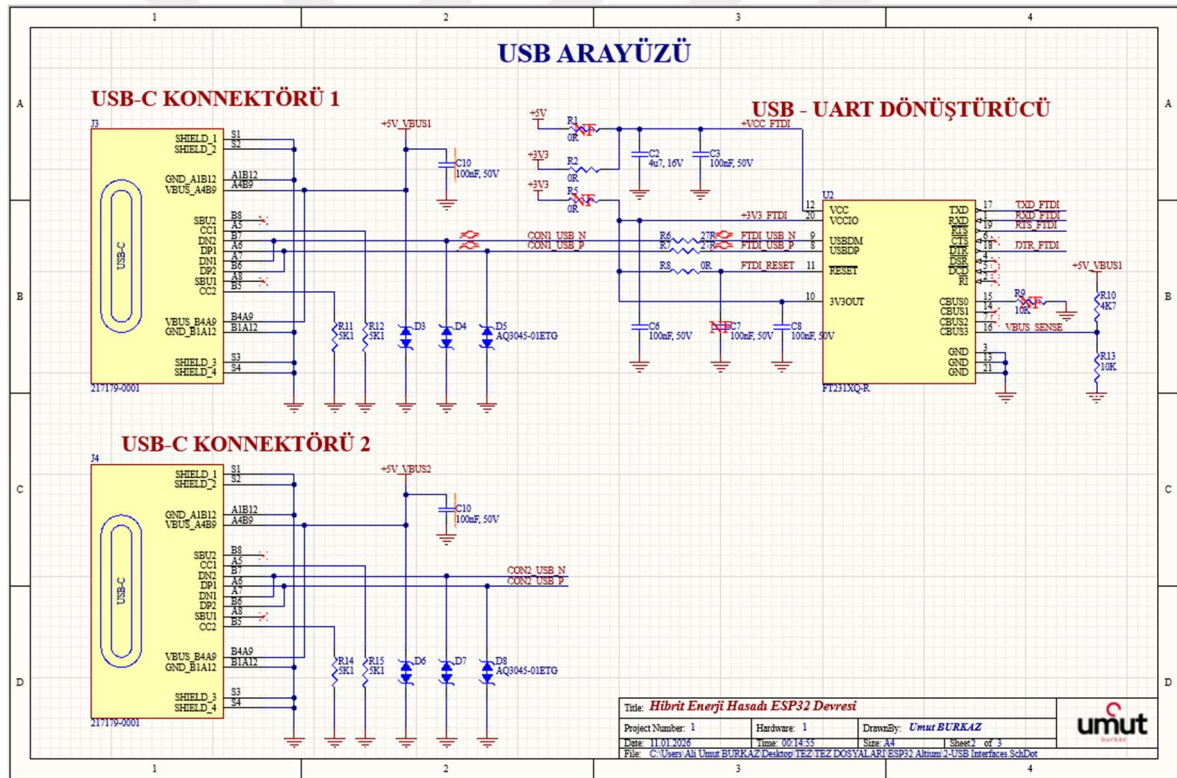
Bu tez çalışmasında tasarlanan veri kaydedici, hibrit enerji hasadı (RF ve Güneş) yöntemiyle beslendiğinden, mikrowatt seviyesindeki enerji kayıpları dahi sistemin sürdürülebilirliği için kritiktir. Piyasada bulunan hazır modüllerin üzerinde yer alan USB-TTL dönüştürücü entegreleri ve pasif ledler, sistem uyku modunda olsa dahi gereksiz akım tüketmektedir. Bu tezde yapılan tasarımımızda ise sadece sistemin ihtiyaç duyduğu çevre birimler kullanılmış, gereksiz güç tüketen elemanlar tasarımdan çıkarılarak sistemin toplam enerji tüketimi minimum seviyeye indirilmiştir. Sistemin zorlu dış ortam koşullarında hatasız çalışabilmesi, toplanan verilerin sunucuya kayıpsız aktarılabilmesi ve sistemin bu tez çalışmasına özgü olması amacıyla ESP32-WROOM özgün bir tasarım süreciyle özel bir Baskı Devre Kartı (Printed Circuit Board, PCB) mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Tasarımın tüm aşamaları için Altium Designer programı kullanılmıştır.

2.2.1. Şematik tasarımları

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi sistemin kararlı çalışması için gerekli olan güç regülasyonu ve kullanıcı etkileşim birimlerinin tasarımına odaklanılmıştır. Sistemin ana güç regülasyonu için,

oluşturulmuştur. FT231X serisi, entegre MTP belleği ve düşük çalışma akımı (8mA tipik) sebebiyle tercih edilmiştir. Bu entegre, bilgisayar tarafındaki USB protokolünü, ESP32'nin iletişim kurabileceği UART formatına dönüştürmektedir. VBUS hattı üzerindeki gürültüleri filtrelemek amacıyla ferrit boncuklar ve dekaplaj kapasitörleri (C9-C14) güç hattına paralel bağlanmıştır.

İkinci USB-C portu (J6) ise doğrudan ESP32-S3'ün dahili USB (Native USB) arayüzüne yönlendirilmiştir. Her iki USB arayüzünde de veri hatlarının (D+/D-) elektrostatik deşarjlara (ESD) karşı korunması kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, AQ3045-01ETG (D3, D4, D5, D6, D7, D8) tek yönlü Geçici Gerilim Bastırma Diyodu (Transient Voltage Suppressor Diode, TVS) diyotları kullanılmıştır. Bu bileşenler, 0.35pF gibi oldukça düşük kapasitans değerine sahip olduklarından için yüksek hızlı USB veri sinyalleri üzerinde bozulmaya yol açmazken, IEC 61000-4-2 standardına göre $\pm 30kV$ 'a kadar kontak deşarj koruması sağlamaktadır. Böylece, son kullanıcının konnektörlere teması sırasında oluşabilecek statik yüklerin hassas işlemci ve arayüz entegrelerine zarar vermesi engellenmiştir.

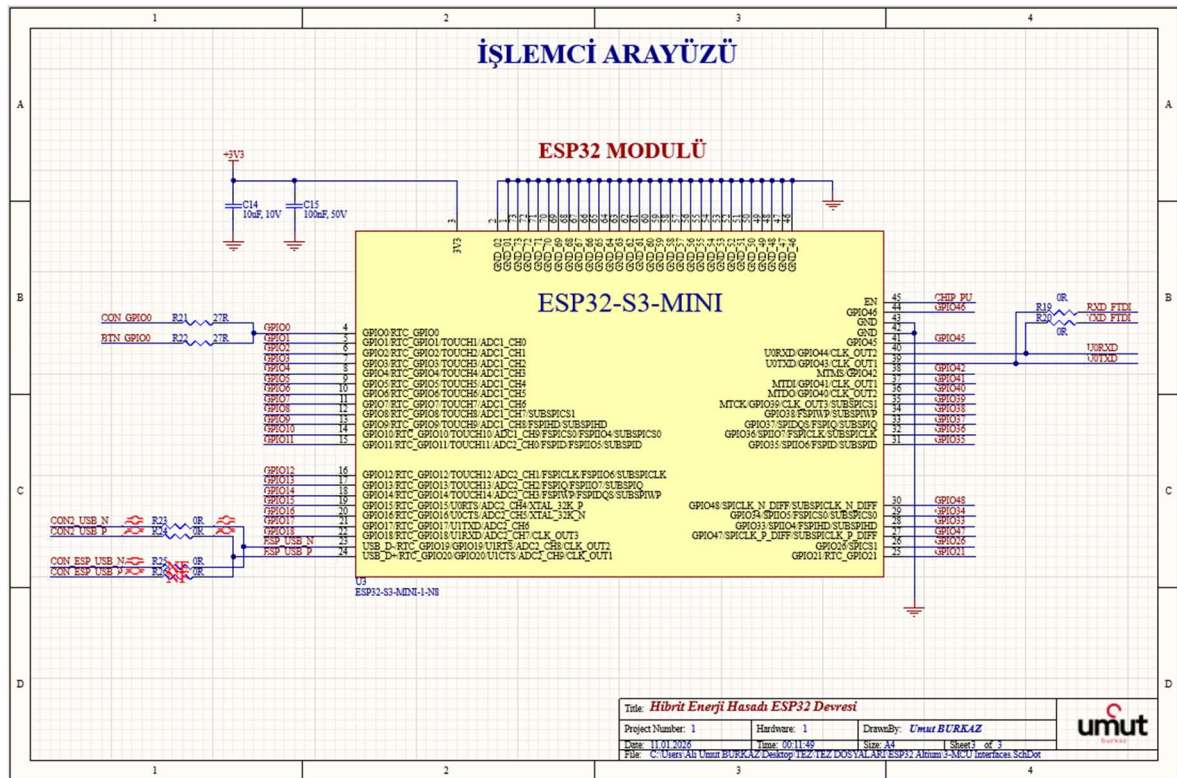


Şekil 2.3. USB arayüzünün şematiği çizim görüntüsü

Şekil 2.4.'te görüldüğü gibi sistemin ana işlem birimi olarak Espressif Systems üretimi ESP32-S3-MINI-1-N8 (U3) modülü kullanılmıştır. Bu modül, çift çekirdekli Xtensa® LX7 işlemcisi ve dahili 8 MB Quad SPI Flash belleği ile yüksek işlem gücü ve veri depolama kapasitesi sunmaktadır. Modülün güç giriş pinlerine (3V3 ve GND) mümkün olduğunca yakın

konumlandırılan 10uF ve 100nF (C16, C17) kapasitörler, işlemcinin ani akım çekimleri sırasında oluşan yüksek frekanslı gürültüleri filtreleyerek güç bütünlüğünü korumaktadır.

Modülün şematik tasarımında, USB-UART entegresi ile iletişim kurmak üzere GPIO43 (U0TXD) ve GPIO44 (U0RXD) pinleri konfigüre edilmiştir. Bu hatlar üzerine, sinyal yansımalarını önlemek ve hat empedansını dengelemek amacıyla 0 Ohm serisi dirençler (R19, R21) yerleştirilmiştir. Ayrıca, modülün USB_D- (GPIO19) ve USB_D+ (GPIO20) pinleri doğrudan ikinci USB-C portuna taşınarak, ESP32-S3'ün JTAG debug ve doğrudan USB haberleşme yetenekleri aktif hale getirilmiştir. Tasarımda kullanılan 0402 ve 0603 kılıf pasif bileşenler (R20, R22 vb.), PCB üzerinde alan tasarrufu sağlarken parazitik etkilerin minimize edilmesine katkıda bulunmaktadır.

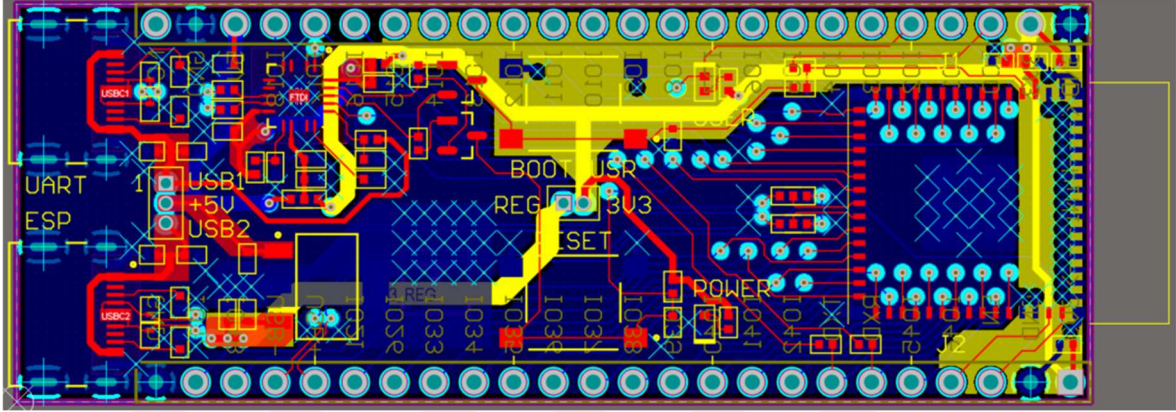


Şekil 2.4. Mikrodenetleyici arayüzü şematığı çizim görüntüsü

2.2.2. PCB yerleşimi

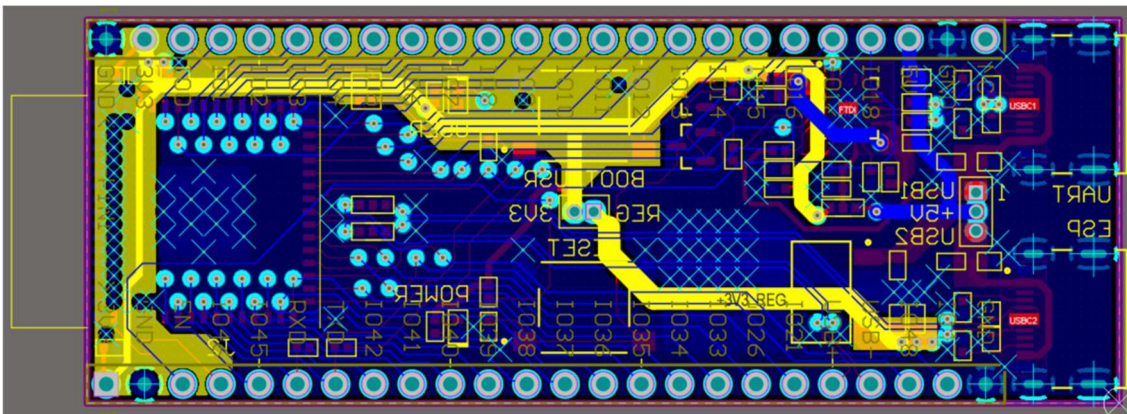
Şekil 2.5'te yer alan PCB'nin üst katman yerleşiminde, sinyal bütünlüğünü korumak ve elektromanyetik girişimi minimize etmek amacıyla kritik hatlar ve ana bileşenler stratejik olarak konumlandırılmıştır. ESP32-S3-MINI-1 modülünün PCB anten kısmı, RF performansını olumsuz etkilememesi için kartın kenar noktasına yerleştirilmiş ve antenin altındaki bakır alanlar tamamen boşaltılarak yasaklı bölge oluşturulmuştur. Amaç, antenin altındaki metallerin sinyali perdelemesini önleyerek, antenin havaya rahatça sinyal yaymasını

sağlamaktır. Yüksek hızlı veri iletimi sağlayan USB hatları (D+ ve D-), empedans eşleşmesini sağlamak için diferansiyel çift (differential pair) tekniği ile mümkün olan en kısa yoldan yönlendirilmiştir. Ayrıca, AMS1117-3.3 regülatörü ve dekaplaj kapasitörleri, besleme hattındaki parazitik endüktansı düşürmek amacıyla entegrelerin güç pinlerine en yakın noktalara yerleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Üst katman yerleşimi 2D görünümü

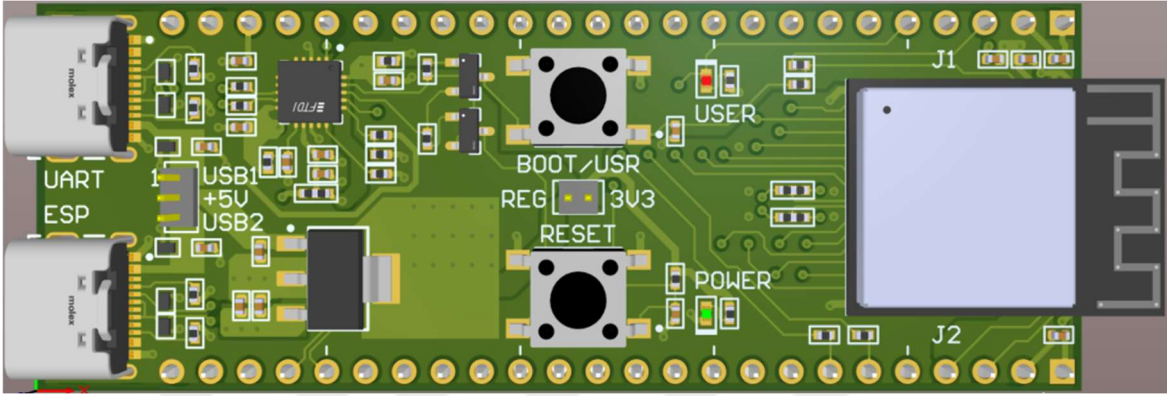
Şekil 2.6'da yer alan alt katman tasarımı, sistemin elektriksel kararlılığını sağlamak adına ağırlıklı olarak kesintisiz toprak düzlemi ve termal yönetim unsurlarına ayrılmıştır. Tüm kart yüzeyini kaplayan toprak düzlemi sayesinde, üst katmandaki sinyallerin dönüş yollarının (return paths) en düşük empedansla tamamlanması sağlanmış ve devrenin EMI bağışıklığı artırılmıştır. Isı dağılımını optimize etmek için, özellikle lineer voltaj regülatörünün altında ve ESP32 modülünün termal pad bölgesinde çoklu termal geçiş deliği (thermal vias) kullanılarak ısıның PCB'nin alt yüzeyine transfer edilmesi hedeflenmiştir. Bununla birlikte, üst katmandan geçen bazı sinyal hatları ve montaj deliklerinin elektriksel bağlantıları bu katmanda sonlandırılmıştır.



Şekil 2.6. Alt katman yerleşimi 2D görünümü

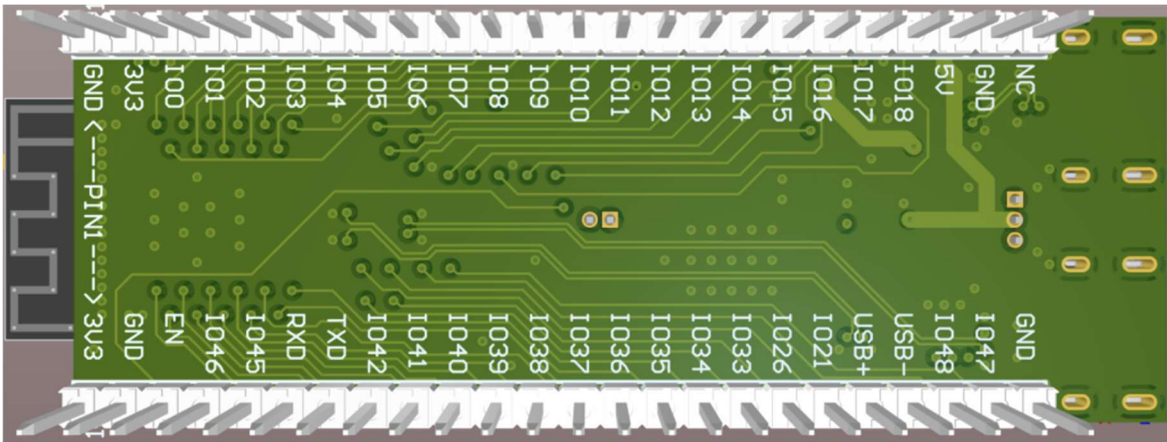
Şekil 2.7'de yer alan tasarımın 3 boyutlu ön yüzey görünümü incelendiğinde, bileşen yerleşiminin hem elektriksel performansa hem de mekanik montaj standartlarına uygun

olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. USB Type-C konnektörleri (J5, J6), kablo bağlantısının ergonomik ve sağlam yapılabilmesi için kartın kenar eksenine hizalanmıştır. Geliştirme ve test süreçlerinde kolay erişim sağlamak amacıyla Reset (SW1) ve Boot (SW2) butonları ile durum LED'leri, diğer bileşenlerin çalışmasını engellemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. ESP32-S3 modülü ve pasif bileşenlerin yükseklik profilleri dikkate alınarak, olası bir kutulama tasarımı için kompakt ve düşük profilli bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 2.7. 3D görünüm ön yüz

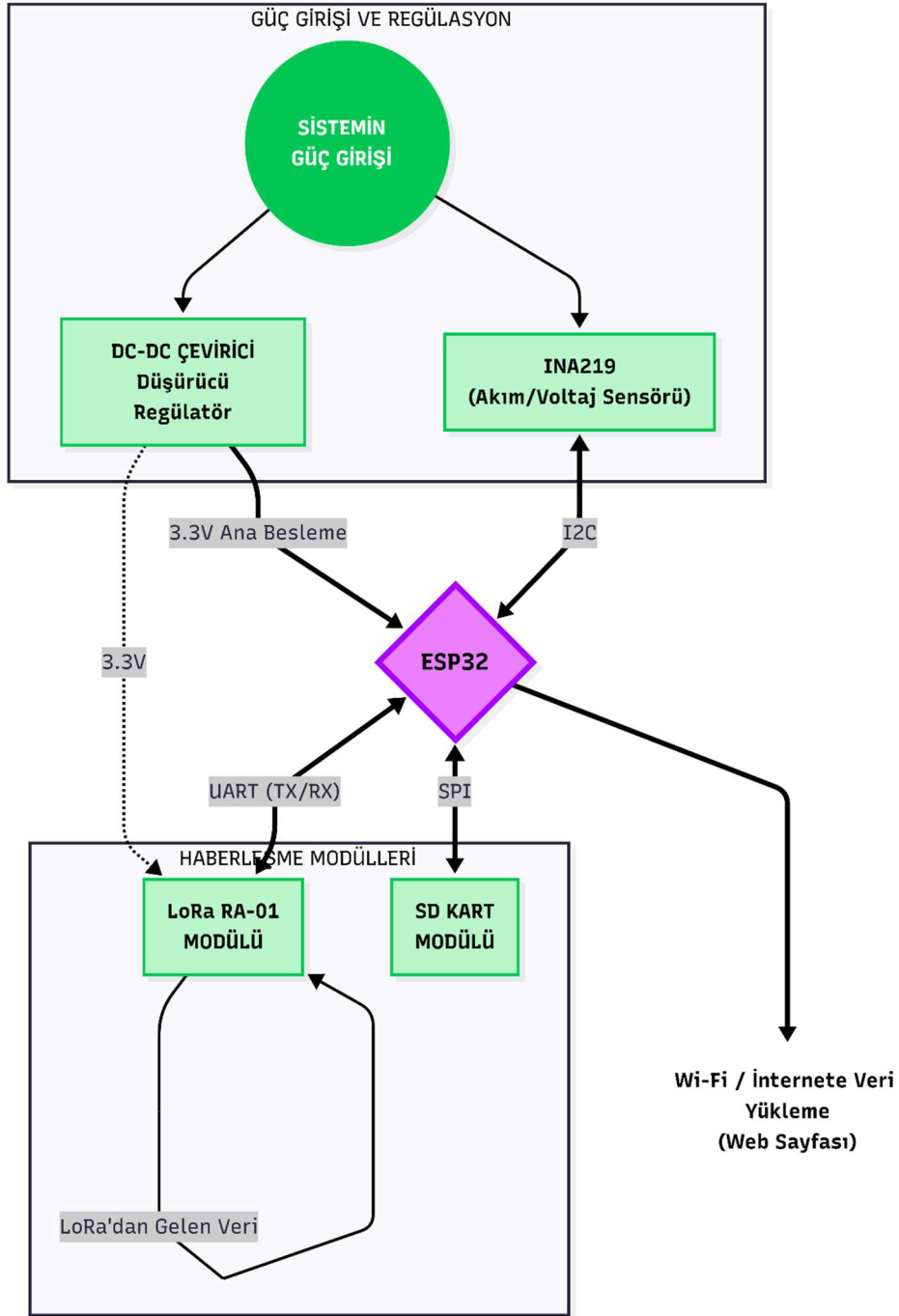
Şekil 2.8'de yer alan 3 boyutlu arka yüzey görünümü, fiziksel montaj detaylarını ve üretim kalitesini yansıtmaktadır. PCB'nin dört köşesine yerleştirilen simetrik montaj delikleri, kartın bir şasiye veya taşıyıcı sisteme güvenli bir şekilde sabitlenmesine olanak tanıyacak standart metrik ölçülerde tasarlanmıştır. Alt yüzeyde bileşen yoğunluğu minimize edilerek düz bir zemin profili korunmuş, bu sayede montaj sırasında oluşabilecek kısa devre riskleri azaltılmıştır. Ayrıca, pin başlıklarının lehim bağlantı noktaları ve serigrafisi (silkscreen) katmanındaki bilgilendirici etiketler, donanımın revizyon takibi ve pin tanımlamalarının net bir şekilde anlaşılabilmesi için görünür kılınmıştır. Bu katman, montaj ve hata ayıklama süreçlerinde kullanıcıya kılavuzluk etmesi amacıyla kart üzerine işlenen metin ve sembolleri ifade eder.



Şekil 2.8. 3D görünüm arka yüz

2.3. Sistemin Haberleşme Mimarisi

Sistemin haberleşme mimarisi Şekil 2.9'da gösterildiği gibi merkezde bir ESP32 mikrodenetleyicinin olduğu farklı çevresel birimler ve sensörlerin yer aldığı seri haberleşme protokolleri ile oluşturulmuştur. Güç yönetim sisteminden anlık olarak verilerin izlenebilmesi için INA219 sensörü ile I2C protokolü kullanılmıştır.



Şekil 2.9. Sistemin haberleşme entegrasyonu

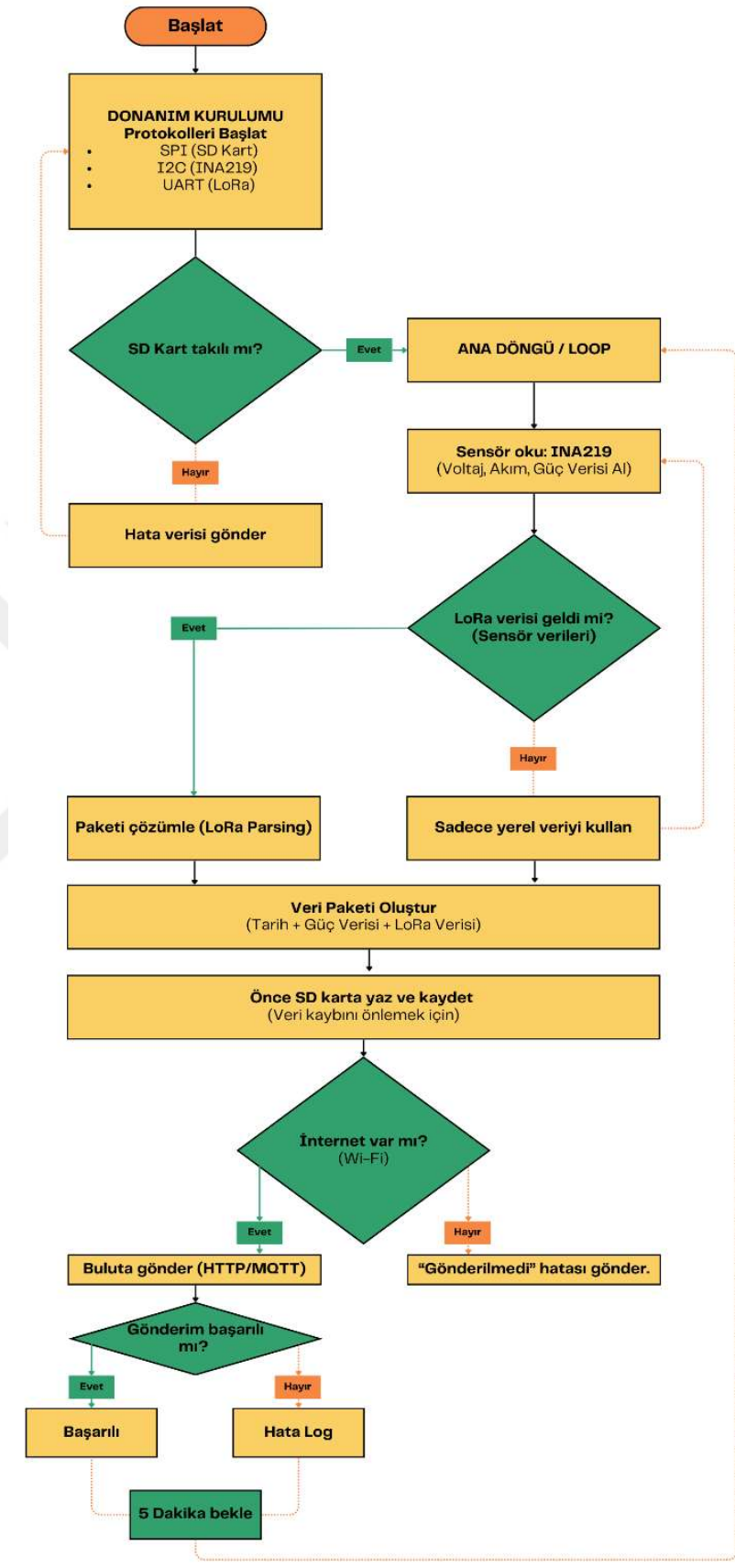
Bu mimariye ek olarak, sisteme entegre edilen RF Enerji Hasadı modülü, donanım altyapısının hibrit güç özelliğini destekleyen kritik bir bileşen olarak tasarımda yerini almıştır. Verilerin yerel olarak ve kalıcı bir şekilde saklanabilmesi için çevrimdışı depolama amacıyla SD kart modülü ile SPI protokolü üzerinden iletişim kurulmaktadır. Sistemin uzaktan telemetri ve veri aktarım durumu ise, UART arabirimi üzerinden bağlanan LoRa modülü aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu entegre iletişim mimarisi; sistemin enerji takibi, veri depolama ve kablosuz aktarım süreçlerini, birbirini aksatmadan eş zamanlı olarak yönetmesini sağlar.

Veri kaydedici topladığı bilgileri web platformuna ve Micro SD karta olmak üzere iki farklı yere göndermektedir. Bu şekilde, internete erişim olmadığı durumlarda veriler kaydedilmeye devam etmekte ve internet erişimi tekrar sağlandığında eksik olan veriler buluta aktarılmaktadır. ESP32 ile LoRa modülünün birlikte kullanılmasının sebebi verileri kablosuz şekilde buluta aktarmaktır. Ağ gitse bile kayıt durmayıp, bağlantı gelince otomatik senkronize olmaktadır.

Enerji yönetimi bu sistemde önemli bir konudur. Bu bağlamda sisteme kazandırılan RF enerji hasadı yeteneği, ortamdaki radyo frekanslarını toplayıp depolayarak, belirli periyotlarla devreye girmekte ve sisteme "can suyu" niteliğinde ek bir güç takviyesi sağlamaktadır. Batarya bloğu ile ana güç hattının arasına INA219 akım-gerilim sensörü yerleştirilmiştir. ESP32, az pinle stabil bir iletişim kurabilmesine imkan veren I2C üzerinden sensörle haberleşmektedir.

ESP32 düzenli aralıklarla sensörü sorgulayıp gerilim ve akım değerlerini okumaktadır. Bu değerlerden de $P=I \times V$ formülüyle anlık güç tüketimi hesaplanabilmektedir. Enerji verileri "Log Data" etiketiyle hem SD karta hem de telemetri verilerine eklenebilmektedir. Böylece sistemin kendi güç durumunu ve RF hasat biriminden gelen destekle oluşan enerji değişimlerini de uzaktan izlemek mümkün olmuştur. Dış ortamda çalışırken internetin kopması ciddi bir risk taşıdığından sensörlerden gelen veriler ve LoRa'dan alınan paketler doğrudan SPI arayüzüyle çalışan SD kart modülüne yazılmaktadır. SPI'nın tercih edilmesinin sebebi hem hızlı hem de çift yönlü iletişime izin vermesidir. I2C'ye göre daha stabil ve yüksek hızlı kayıt yapabilmektedir.

Yazılım mimarisi, çevresel sensörlerden ve kablosuz arayüzlerden gelen verilerin bütünlüğünü koruyacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.10). Başlangıç aşamasında SPI üzerinden SD kart, I2C üzerinden INA219 ve UART üzerinden LoRa modülü ile iletişim kurularak donanım doğrulaması yapılır. Akış diyagramında görüldüğü üzere, sistemin en kritik adımı verilerin yerel depolama birimine yazılmasıdır. Bu işlem, dış ortamda sıkça yaşanan ağ kopmalarında (Wi-Fi kaybı) veri kaybını önlerken; bağlantı sağlandığında bulut senkronizasyonuna olanak tanır. Ayrıca, LoRa üzerinden gelen verilerin ayrıştırılması (parsing) ve güç tüketim verileriyle harmanlanması işlemi de bu döngü içerisinde gerçekleştirilerek, sistemin hem iletişim hem de enerji durumu tek bir paket halinde izlenebilir hale getirilmiştir.



Şekil 2.10. Sistemin yazılım akış diyagramı

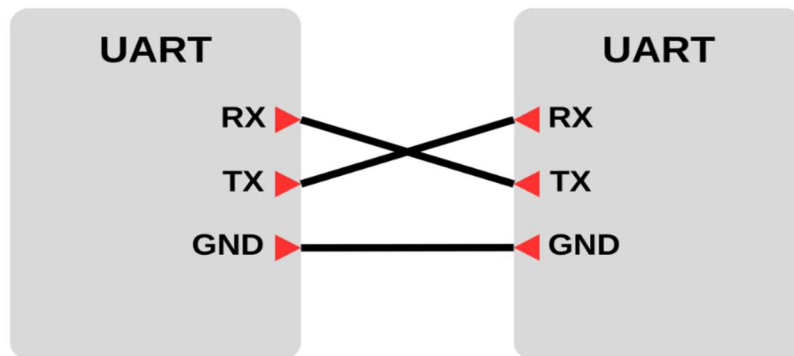
Bu haberleşme altyapısında LoRa modülü, sahadaki sensörlerden gelen verileri toplayan bir ağ geçidi rolü üstlenmektedir. ESP32 ise bu süreçte sadece veriyi aktaran pasif bir birim değil; UART üzerinden gelen ham veriyi çözümleyen, zaman damgası ekleyen ve yerelde işleyebilen akıllı bir uç cihaz olarak davranmaktadır. Özellikle verilerin SD karta öncelikli kaydedildiği bu yapı, sadece buluta bağımlı çalışan sistemlere kıyasla çok daha güvenilir ve esnek bir çözüm sunar. Böylece sistem, internet bağlantısı olsa da olmasa da veri bütünlüğünü koruyarak kesintisiz bir operasyonel yetenek kazanmış olur.

2.4. Uzun Menzilli Kablosuz Haberleşme

Dış ortam veri izleme sistemlerinde, sensörler ile ana toplama birimi arasındaki mesafenin uzun olması, geleneksel Wi-Fi veya Bluetooth teknolojilerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu sorunu aşmak için sistemde LoRa teknolojisi tercih edilmiştir. Bu tercihte LoRa modüllerinin uygun fiyatlı olması ve kolay elde edilebilmesi etkili olmuştur.

LoRa, düşük güç tüketimi ile çok uzun mesafelerde veri iletimi sağlayan bir modülasyon tekniğidir. RA-01 modülü, Semtech SX1278 çipi tabanlı olup, özellikle 433 MHz frekans bandında yüksek hassasiyet ve geniş kapsama alanı sunar. Düşük veri hızlarında çalışmasına rağmen, parazitlere karşı direnci ve engel arkasına sinyal ulaştırabilme yeteneği sayesinde kırsal ve endüstriyel alanlarda sıkça kullanılmaktadır.

Bu çalışmada LoRa RA-01 modülü, sahadaki sensörlerden gelen verileri toplayan bir "ağ geçidi" alıcısı olarak konumlandırılmıştır. Modül, ESP32 ana kontrol ünitesine UART arabirimi üzerinden bağlanmıştır. Sahadan kablosuz olarak gelen ham sensör verileri RA-01 modülü tarafından alınır ve işlenmek üzere seri port üzerinden ESP32'ye iletilir. Bu yapı, veri kaydedicinin sensörlere fiziksel olarak kablo ile bağlı olma zorunluluğunu ortadan kaldırarak kurulum esnekliği sağlar ve kablo maliyetlerini düşürür. Şekil 2.11'de UART bağlantı şeması gösterilmiştir.

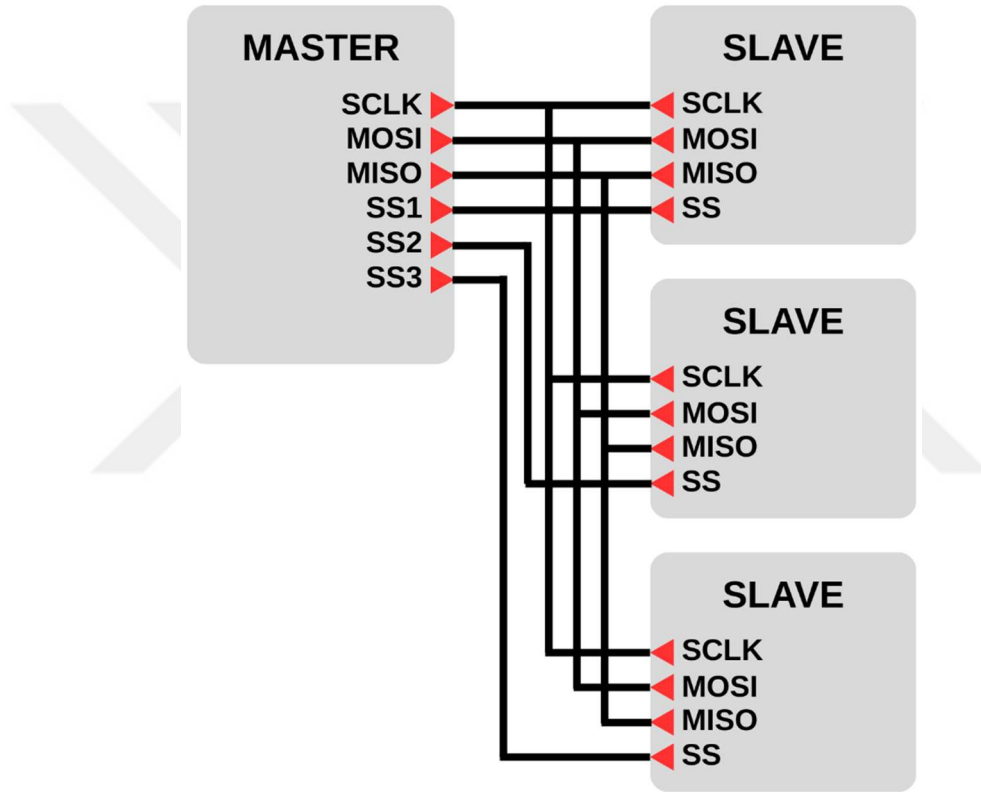


Şekil 2.11. UART bağlantı şeması

2.5. Veri Depolama ve Güvenlik Birimi

IoT sistemlerinde en büyük problemlerden biri, internet bağlantısının kesildiği durumlarda yaşanan veri kayıplarıdır. Bu çalışmada, veri bütünlüğünü %100 oranında korumak amacıyla hibrit bir depolama mimarisi benimsenmiş ve sisteme yerel bir depolama birimi entegre edilmiştir.

SD kart modülleri, mikrodenetleyicilerin büyük miktardaki verileri kalıcı hafızada saklamasına olanak tanır. SPI haberleşme protokolü sayesinde yüksek hızlarda veri yazma ve okuma işlemlerini desteklerler. Şekil 2.12’de SPI haberleşmesinin bağlantı şeması yer almaktadır. Sistemde kullanılan SD kart modülü, ESP32 ile SPI protokolü üzerinden haberleşmektedir.



Şekil 2.12. SPI Haberleşme protokolünün bağlantı şeması

Sistemin çalışma algoritmasına göre, LoRa'dan gelen veya sensörlerden okunan tüm veriler, buluta gönderilmeden önce "öncelikli" olarak SD karta yazılmaktadır. Bu yöntem, internet bağlantısının koptuğu veya Wi-Fi sinyalinin zayıfladığı durumlarda buluta veri aktarılamaz ise verilerin kaybolmasını engeller. Sistem çevrimdışı modda çalışsa bile veriler SD kartta depolanmaya devam eder; bağlantı sağlandığında ise eksik veriler senkronize edilebilir. Böylece sistem, sadece buluta bağımlı çalışan cihazlara göre çok daha güvenilir bir veri kayıt performansı sunmaktadır.

2.6. Güç Yönetim Sistemi ve Solar Enerji Hasadı

Dış ortamda şebeke elektriğinden bağımsız çalışan sistemler için sürdürülebilir enerji kaynağı en kritik bileşendir. Tasarlanan sistemde, güneş enerjisini toplayan, regüle eden ve depolayan gelişmiş bir güç yönetim katmanı oluşturulmuştur.

Güç yönetim sistemi üç ana yapıdan oluşmaktadır:

- Güneş panelleri,
- CH3791 şarj modülü
- Batarya grubu

2.6.1. Güneş panelleri

Sistemde enerji kaynağı olarak ZW-11069 model numaralı 5V 220mAh kapasiteli 3 adet güneş paneli paralel bağlanarak kullanılmıştır. Bu paralel bağlantı, akım kapasitesini artırarak düşük ışık koşullarında bile sistemin ihtiyaç duyduğu enerjinin toplanabilmesini sağlar. Panellerden elde edilen voltaj, bir regülatör aracılığıyla 4V-5V seviyelerine yükseltilerek şarj modülüne iletilir. Şekil 2.13'te gösterilen güneş panellerinden 3 adet paralel bağlanarak toplamda 5V 660mAh seviyesinde bir enerji hasadı hedeflenmiştir.

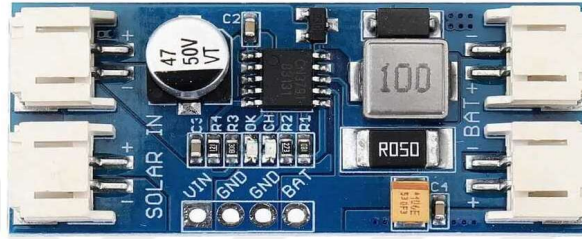


Şekil 2.13. ZW-11069 Model numaralı güneş paneli

Kaynak: (cnzhiwang, 2025)

2.6.2. Solar şarj modülü

Bu modül, sistemin enerji yönetim merkezidir. MPPT benzeri bir davranış sergileyerek, güneş panelinden alınan enerjiyi en verimli şekilde bataryalara aktarır. Deneysel sonuçlar, bu modülün sabit akım (CC) ve sabit gerilim (CV) şarj karakteristiklerine tam uyumlu çalıştığını doğrulamıştır. Modül, bir yandan bataryaları şarj ederken diğer yandan sisteme kesintisiz güç sağlar. Bu çalışmada güç yönetim birimi olarak Şekil 2.14'te görseli yer alan CN3791 entegresinin tercih edilmesinin temel nedeni, sunduğu yük paylaşımı özelliği sayesinde, batarya grubunun şarj işlemi devam ederken sistemin kesintisiz olarak beslenmesine olanak tanımasıdır.



Şekil 2.14. CN3791 Solar şarj modülü
Kaynak: (Robotistan, 2023)

2.6.3. Batarya grubu

Enerji depolama birimi olarak Şekil 2.15'te görseli yer alan 4 adet 18650 tipinde ASPİLSAN'ın ürettiği INR18650A28 model numaralı Li-ion pil (her biri 2900mAh) paralel bağlanmıştır. Bu konfigürasyon, toplamda yaklaşık 11600mAh'lik bir kapasite sunarak, sistemin güneş enerjisi hasadı yapamadığı durumlarda bile uzun süre çalışabilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 2.15. Kullanılan Li-ion piller
Kaynak: (Aspilsan, 2025)

2.7. RF Enerji Hasadı

Tasarlanan hibrit enerji hasadı sisteminin RF bileşeni için, ortamdaki elektromanyetik dalgaların toplanması ve regüle edilmesi amacıyla e-peas firması tarafından geliştirilen, endüstriyel standartlarda yüksek verimlilik sunan AEM30940 entegresi tabanlı değerlendirme kiti (Evaluation Kit - EVK) tercih edilmiştir. Literatürde yer alan pasif devre elemanlarıyla oluşturulmuş temel RF hasat devreleri (Schottky diyot tabanlı voltaj katlayıcılar vb.), empedans uyumsuzlukları ve yüksek başlangıç gerilimi gereksinimleri nedeniyle mikrowatt seviyesindeki kaynaklardan verimli güç dönüşümü sağlayamamaktadır. Bu kısıtları aşmak ve sistemin 2.4 GHz bandındaki Wi-Fi/BLE sinyallerinden maksimum düzeyde faydalanabilmesini sağlamak adına, ultra düşük güç (Ultra-Low Power) yönetim mimarisine sahip AEM30940 modülünün kullanımı stratejik bir tasarım kararı olarak belirlenmiştir.

AEM30940 modülünün en ayırt edici teknik özelliği, bünyesinde barındırdığı gelişmiş "Soğuk Başlatma" mekanizmasıdır. RF kaynaklarının doğası gereği oldukça düşük enerji yoğunluğuna sahip olması, standart güç yönetim entegrelerinin uyanmasını imkansız kılmaktadır. Ancak sisteme entegre edilen bu modül, giriş terminalinde yalnızca 380 mV gibi son derece düşük bir gerilim ve 3 μ W mertebesinde bir giriş gücü olduğu anda aktif hale gelebilmektedir. Bu hassasiyet, sistemin güçlü bir RF kaynağına ihtiyaç duymadan, ortamdaki zayıf sinyallerle dahi kendi kendini başlatabilmesine olanak tanımaktadır. Soğuk başlatma fazının ardından, sistemin çalışma gerilimi aktif moda geçtiğinde, modülün giriş hassasiyeti 50 mV seviyelerine kadar düşmekte, böylece hasat sürekliliği en zorlu koşullarda dahi korunmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan modül Resim 2.1'de yer almaktadır.



Resim 2.1. AEM30940 EVK modülü

Modülün RF performansını maksimize eden bir diğer kritik faktör, entegre üzerindeki dinamik empedans eşleştirme devresidir. RF kaynağından maksimum güç transferi yapılabilmesi için kaynak empedansı ile yük empedansının karmaşık eşlenik olması gerekmektedir. AEM30940, 2.45 GHz frekans bandı için optimize edilmiş eşleştirme ağı sayesinde, antenden gelen yüksek frekanslı AC sinyali minimum yansıma kaybıyla DC gerilime dönüştürmektedir. Modül üzerindeki doğrultucu katı, bu frekans bandında %20 ile %30 arasında değişen yüksek bir RF-DC dönüşüm verimliliği sunmaktadır.

Enerji depolama ve yük yönetimi açısından incelendiğinde, AEM30940 esnek ve yapılandırılabilir bir mimari sunmaktadır. Modül, topladığı enerjiyi depolama elemanına (Batarya veya Süperkapasitör) aktarırken, aşırı şarj ve derin deşarj durumlarını donanımsal olarak kontrol altında tutmaktadır. Bu tezde kullanılan Lityum-iyon batarya kimyasına uygun olarak, modül üzerindeki konfigürasyon pinleri (CFG[2:0]) aracılığıyla aşırı şarj koruma gerilimi 4.12V, deşarj koruma gerilimi ise 3.0V seviyelerine ayarlanmıştır. Bu sayede, RF enerji hasat birimi sadece bir enerji kaynağı olarak değil, aynı zamanda ikincil bir batarya yönetim sistemi (battery management system, BMS) gibi davranarak pil sağlığını koruma altına almaktadır.

Sistemin hibrit yapısına "can suyu" niteliğinde destek sağlayan özellik ise modülün LDO (Low Dropout) regülatör çıkışlarıdır. AEM30940, ana depolama biriminden bağımsız olarak, sensör düğümlerini veya mikrodenetleyiciyi besleyebilecek 1.8V ve 1.2V gibi regüle edilmiş yardımcı gerilim çıkışlarına (HVOUT / LVOUT) sahiptir. Güneş enerjisinin yetersiz olduğu veya bataryanın kritik seviyenin altına düştüğü senaryolarda, RF enerji hasadından elde edilen anlık enerji, sistemin uyku modundaki temel fonksiyonlarını sürdürebilmesi veya acil durum veri paketini gönderebilmesi için gerekli olan minimum gücü sağlamaktadır.

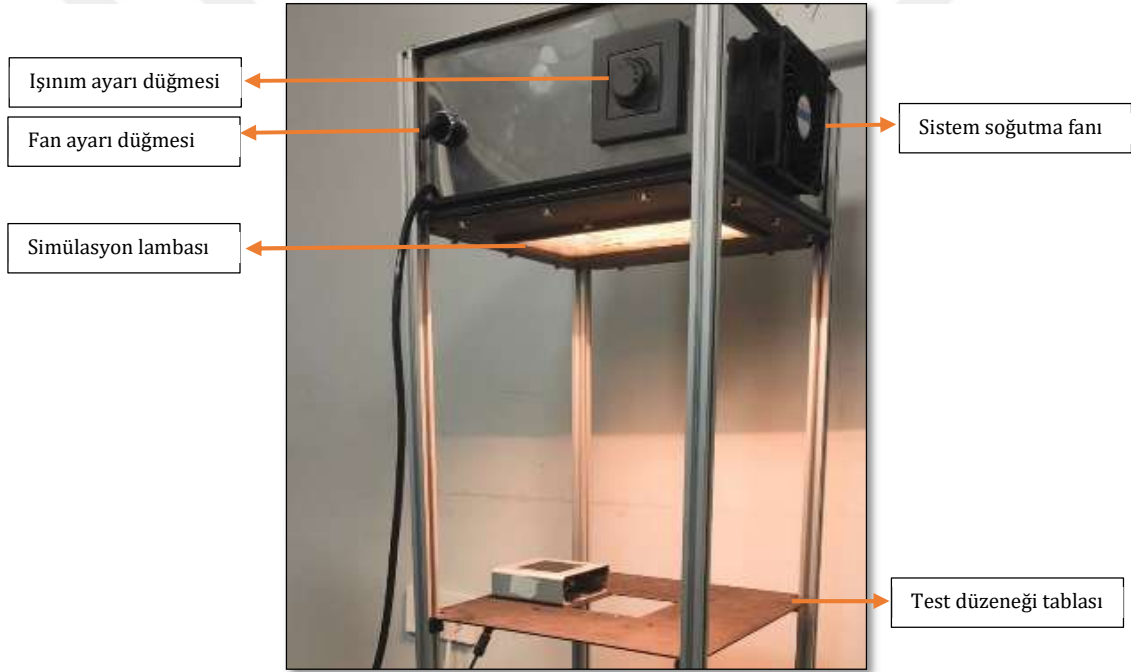
AEM30940 modülünün sisteme entegrasyonu, basit bir pasif hasat devresinin ötesine geçerek, empedans uyumu, MPPT yeteneği ve akıllı batarya yönetimi fonksiyonlarını tek bir pakette sunan bütünleşik ve gelişmiş bir güç yönetim mimarisi ortaya koymuştur. Modülün sunduğu ultra düşük güç tüketimi ve yüksek dönüşüm verimliliği, tasarlanan hibrit sistemin enerji darboğazını aşmasında ve IoT düğümünün operasyonel ömrünün uzatılmasında kilit rol oynamaktadır.

3. BÖLÜM

YAPILAN TESTLER VE ANALİZLERİ

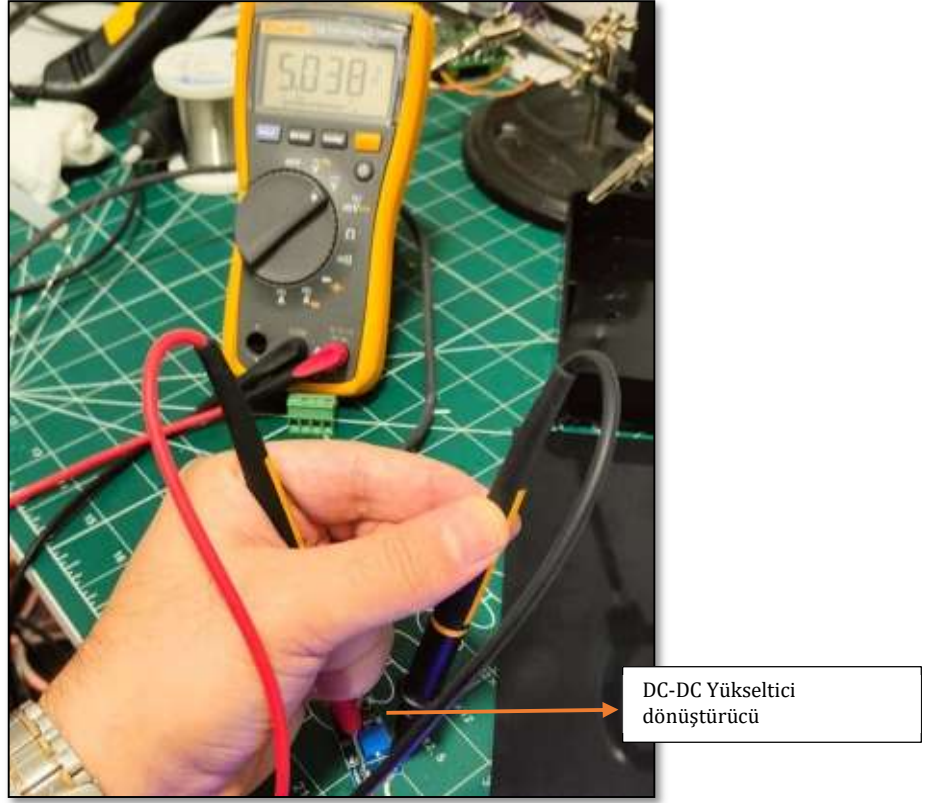
3.1. Kurulan Sistemin İlk Testleri

Güneş panellerinin ön test aşamalarının gerçekleştirildiği deney düzeneği Resim 3.1'de sunulmuştur. Kurulan bu sistem aracılığıyla, dış ortam koşullarında panellerin farklı ışınım şiddetlerine karşı gösterdikleri performans karakteristikleri analiz edilmiştir. Ayrıca, düzenekte yer alan termal simülasyon altyapısı kullanılarak, ışınımına bağlı ısıl etkiler değerlendirilmiş ve panellerin yüksek sıcaklık koşulları altındaki davranışları detaylıca irdelenmiştir. Şekilde görülebileceği üzere, paralel konfigürasyonda bağlanan panellerden tek bir hat üzerinden çıkış alınmıştır. Geliştirilen donanımsal sistem sayesinde, enerji üretim parametreleri hassasiyetle izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır.



Resim 3.1. Güneş ışınımı simülasyonu için test düzeneği

Simülasyon ortamındaki güneş panellerinin pozitif ve negatif terminallerinden alınan gerilim, bir DC-DC yükseltici konvertör aracılığıyla regüle edilmiş 5V seviyesine yükseltilmektedir. Resim 3.2'de görüldüğü gibi tercih edilen yükseltici konvertör, kaynak geriliminin 2V seviyelerine düştüğü durumlarda dahi kararlı bir 5V çıkış sağlayarak sistemin sürekliliğini sağlamaktadır.



Resim 3.2. DC-DC Yükseltici dönüştürücü

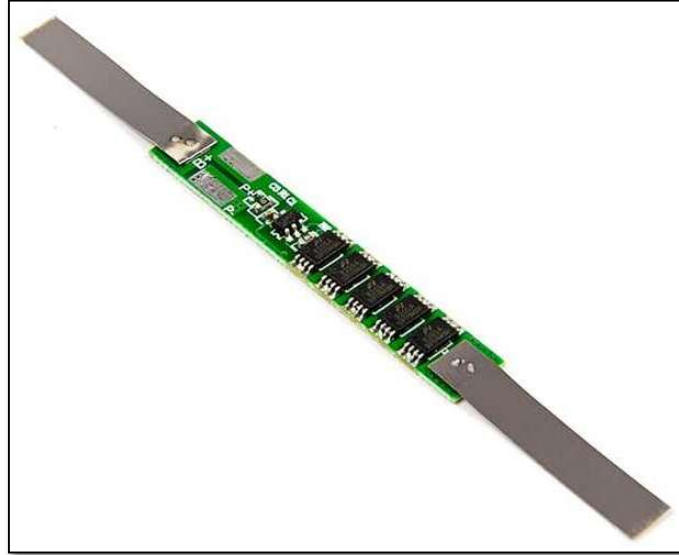
Regüle edilen enerji, CN3791 tabanlı güneş paneli şarj modülüne aktarılmaktadır. Şarj ünitesi, toplam 11.600 mAh kapasiteye sahip dört adet 18650 tipi Li-ion pil bloğunun yönetimini sağlamaktadır. Ayrıca sistem, yük paylaşımı özelliği sayesinde, bataryalar şarj olma sürecindeyken eş zamanlı olarak yükü besleyebilmekte ve kesintisiz çalışma özelliği sunmaktadır. Multimetre ile yapılan anlık ölçümlerde bu sonuçlar pratik olarak test edilmiştir. 5,001V ile 5,052V arasında değişen değerlerin sisteme herhangi bir zararı bulunmamaktadır.

DC-DC konvertör devresinin kararlılık testlerinin başarıyla sonuçlanmasının ardından, entegre sistemin bir sonraki yapı taşı olan CN3791 güneş paneli şarj kontrolcüsünün performans testleri gerçekleştirilmiştir. Resim 3.3'te görülen deney düzeneği üzerinde yapılan voltaj ölçümlerinde, şarj modülünün batarya bağlantı arayüzünde (BAT+ ve BAT-) hedeflenen gerilim değerleri incelenmiştir. Yapılan hassas ölçümler sonucunda, modülün çıkış geriliminin, kullanılan batarya grubunun şarj karakteristiklerine uygun olarak 4.2V seviyesine ayarlandığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu bulgu, şarj devresinin gerilim regülasyonunu hatasız bir şekilde sağladığını ortaya koymaktadır.



Resim 3.3. Güneş paneli şarj devresi testi

Güneş panellerinden elde edilen ve regüle edilen enerjinin depolanması amacıyla oluşturulan batarya bloğunun, şarj kontrol ünitesi ile olan etkileşimi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu aşamada, sistemin enerji deposunu oluşturan paralel bağlı dört adet 18650 lityum iyon pil hücresinin güvenliğini ve kararlılığını sağlamak üzere Resim 3.4'te yer alan bir BMS kullanılmıştır.



Resim 3.4. Kullanılan batarya yönetim sistemi devresi

Kaynak: (Robotistan, 2024)

BMS, şarj ünitesi (CN3791) ile elektrokimyasal hücreler arasında bir güvenlik katmanı olarak konumlandırılmıştır. Gerçekleştirilen şarj testlerinde, CN3791 modülünün "BAT+" ve "BAT-" çıkış terminalleri, BMS üzerinden batarya grubuna bağlanmıştır. Test sürecinde, şarj modülünün lityum iyon şarj karakteristiği olan CC/CV (Sabit Akım/Sabit Voltaj) prensibine uygun olarak çalıştığı gözlemlenmiştir. BMS devresinin giriş terminallerinde yapılan ölçümlerde, şarj geriliminin beklendiği üzere 4.2V seviyesinde regüle edildiği ve akımın batarya iç direncine uygun olarak hücrelere aktarıldığı teyit edilmiştir. Bu süreçte BMS'nin iletim hattında herhangi bir gerilim düşümüne veya kesintiye neden olmadan enerjiyi pillerin anoduna ilettiği gözlemlenmiştir.

Sistemin güvenilirliğini doğrulayan en kritik parametre, BMS'nin koruma fonksiyonlarının test edilmesidir. Oluşturulan yapı sayesinde, pillerin aşırı şarj riskine karşı korunması donanımsal olarak güvenliği sağlanmıştır. Testler esnasında batarya voltajı doygunluk seviyesine ulaştığında, CN3791 modülünün şarj akımını kestiği, BMS'nin ise hücre voltajlarını sürekli izleyerek olası bir voltaj sapmasında hattı izole etmeye hazır durumda beklediği gözlemlenmiştir. Bu ikili koruma mekanizması, batarya ömrünü ve sistem güvenliğini maksimize etmektedir. Hibrit enerji hasadı kaynaklarının (Güneş + RF) doğası gereği sergilediği kararsız gerilim profillerine ve kesintili enerji girişlerine rağmen, güç depolama biriminin şarj sürekliliğini koruduğu testlerle doğrulanmıştır. Sistemin, giriş gücündeki bu anlık dalgalanmalara maruz kaldığında dahi kararlı çalışma yapısını bozmadığı, batarya güvenliğini tehlikeye atmadan şarj işlemini sürdürdüğü gözlemlenmiştir. Tasarım aşamasında hedeflenen minimum şarj akımı (örneğin 50mA) kriterlerine ulaşılarak, sistemin değişken giriş koşulları altında dahi performans gereksinimlerini başarıyla karşıladığı gözlemlenmiştir.

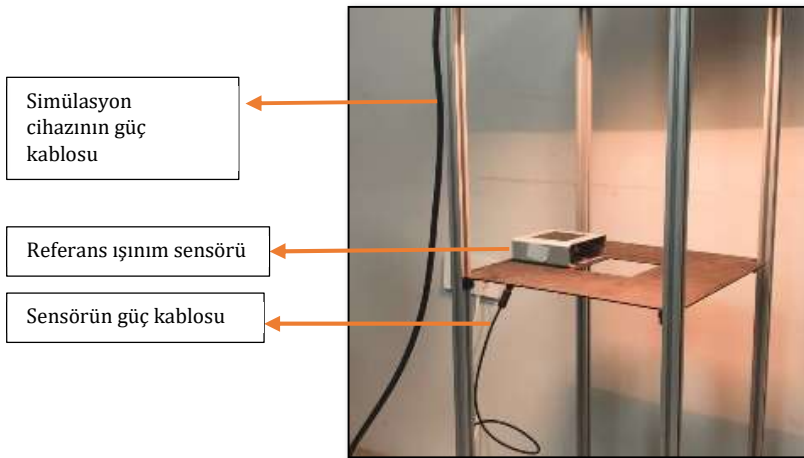
CN3791 modülünden alınan 3.7V bir regülasyon devresi sayesinde 3.3V seviyelerinde sabit hale getirilip sistemin çalışması sağlanmaktadır. Sistemin güç bütünlüğünü ve regülasyon kalitesini doğrulamak amacıyla, ESP32 modülünün 3.3V besleme girişinde osiloskop ile AC kuplaj modunda hassas ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, besleme hattındaki toplam gürültü ve dalgalanma gerilimi (V_{pp}), 17.956 mV gibi oldukça düşük bir seviyede tutulmuştur. Bu değer, 3.3V nominal gerilimin %1'inden bile daha az bir sapmaya işaret etmektedir. Osiloskop görüntüsündeki periyodik testere dişi formundaki dalgalanmalar, regülatörün anahtarlama karakteristiğini yansıtmakla birlikte; genliğin bu denli düşük olması, filtreleme katmanının başarısını ve ESP32 gibi hassas dijital yüklerin kararsızlık yaşamadan (resetlenmeden) temiz bir enerjiyle beslendiğini göstermektedir.



Şekil 3.1. ESP32 modülünün 3.3V girişinin osiloskop görüntüsü

3.2. Işınım Testleri ve Veri Doğrulama Metodolojisi

Resim 3.5'te sunulan deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilen elektriksel ve termal ön kontrollerin başarıyla tamamlanmasının ardından, sistemin çevresel değişkenlere karşı duyarlılığını ölçmek üzere ışıınım testlerine geçilmiştir. Tasarlanan veri kaydedici sistem üzerinde dahili bir ışıınım ölçüm donanımı bulunmadığından, deney sonuçlarının bilimsel geçerliliğini sağlamak amacıyla kalibre edilmiş harici bir referansa ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda, endüstriyel ölçüm standartlarını karşılayan Seven Sensor marka ışıınım sensörü, sistemin referans doğrulama birimi olarak test sürecine entegre edilmiştir.



Resim 3.5. Referans sensör olarak kullanılan ışıınım sensörü

Ölçüm hassasiyetini maksimize etmek ve gölgeleme kaynaklı veri sapmalarını önlemek adına geometrik konumlandırmaya büyük önem verilmiştir. Referans ışınım sensörü ve fotovoltaik paneller Resim 3.6'da görüldüğü gibi, ışık kaynağına göre aynı açıda ve eş düzlemlilikte olarak yerleştirilmiştir.



Resim 3.6. Referans ışınım sensörü ve panellerin eş düzlemlilikte konumlandırılması

Bu hizalama stratejisi sayesinde, sensörün algıladığı ışınım şiddeti ile panellerin yüzeyine düşen foton yoğunluğunun özdeş olması sağlanmış; böylece referans sensörden okunan değerlerin, panellerin ürettiği enerjiyle tam korelasyon içinde olması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen test prosedüründe, sistemin farklı atmosferik koşullardaki enerji üretim karakteristiği geniş bir spektrumda incelenmiştir. Ölçümler, düşük ışık koşullarını simüle eden 100 W/m^2 seviyesinden başlatılarak, tam güneşlenme şartlarına karşılık gelen 1092 W/m^2 tepe değerine kadar kademeli olarak artırılmıştır. Bu aralıkta yapılan tarama testleri neticesinde, artan ışınım değerlerinin (W/m^2) panellerin çıkış gerilimi üzerindeki etkisi anlık olarak izlenmiş ve sistemin verimlilik eğrileri referans sensör verileri ışığında kayıt altına alınmış ve bu veriler Tablo 3.1'de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.1. Tarama testlerinde elde edilen ışınım ve ölçülen voltaj değerleri

Zaman	Işınım Değeri (W/m^2)	Ölçülen Voltaj (V)
13:05:13	0,3	0
13:05:14	0	0
13:05:15	0	0
13:05:16	0	0
13:05:17	0	0
13:05:18	56,1	0
13:05:19	60	0
13:05:20	58,1	0

13:05:21	57,7	0
13:05:22	51,9	0
13:05:23	52,3	0
13:05:24	88,3	0
13:05:25	52,3	0
13:05:26	59,6	0
13:05:27	58,9	0
13:05:28	58,9	0
13:05:29	67,8	0
13:05:30	70,5	0
13:05:31	76,7	0
13:05:32	84	0
13:05:33	89,1	0
13:05:34	92,6	0
13:05:35	94,9	0
13:05:36	95,3	0
13:05:37	98,8	0
13:05:38	101,9	3,95
13:05:39	101,9	3,95
13:05:40	101,1	3,95
13:05:41	100,7	3,95
13:05:42	102,3	3,95
13:05:43	101,9	3,95
13:05:44	101,9	3,96
13:05:45	102,3	3,95
13:05:46	102,3	3,95
13:05:47	101,1	3,95
13:05:48	100,7	3,95
13:05:49	101,1	3,95
13:05:50	100,3	3,95
13:05:51	99,9	3,97
13:05:52	100,7	3,97
13:05:53	100,7	3,96
13:05:54	101,9	3,95
13:05:55	101,9	3,95
13:05:56	101,5	3,95
13:05:57	100,3	3,95
13:05:58	100,3	3,95

13:05:59	99,1	3,95
13:06:00	99,5	3,97
13:06:01	101,1	3,97
13:06:02	100,3	3,97
13:06:03	99,9	3,96
13:06:04	139	4,01
13:06:05	158,4	4,04
13:06:06	170	4,04
13:06:07	178,2	4,01
13:06:08	185,5	4,12
13:06:09	185,5	4,12
13:06:10	192,1	4,13
13:06:11	205,7	4,22
13:06:12	205,7	4,22
13:06:13	206,1	4,22
13:06:14	204,9	4,22
13:06:15	206,8	4,22
13:06:16	204,9	4,22
13:06:17	204,9	4,22
13:06:18	203,7	4,22
13:06:19	205,3	4,22
13:06:20	205,3	4,22
13:06:21	206,4	4,22
13:06:22	206,8	4,22
13:06:23	208,4	4,23
13:06:24	207,2	4,23
13:06:25	206,8	4,23
13:06:26	204,9	4,23
13:06:27	205,6	4,23
13:06:28	205,3	4,23
13:06:29	206,4	4,23
13:06:30	207,2	4,23
13:06:31	207,6	4,23
13:06:32	208	4,23
13:06:33	205,2	4,23
13:06:34	203,7	4,23
13:06:35	206,8	4,23
13:06:36	207,6	4,23

13:06:37	208,7	4,23
13:06:38	206	4,23
13:06:39	204,8	4,23
13:06:40	205,2	4,23
13:06:41	204,4	4,23
13:06:42	207,2	4,23
13:06:43	208,3	4,23
13:06:44	208,3	4,23
13:06:45	205,2	4,23
13:06:46	205,2	4,23
13:06:47	207,5	4,23
13:06:48	209,1	4,24
13:06:49	207,5	4,24
13:06:50	206	4,24
13:06:51	208,3	4,24
13:06:52	207,1	4,24
13:06:53	205,2	4,24
13:06:54	205,6	4,24
13:06:55	204,8	4,24
13:06:56	207,1	4,24
13:06:57	207,9	4,24
13:06:58	207,9	4,24
13:06:59	203,6	4,24
13:07:00	204,8	4,24
13:07:01	206,7	4,24
13:07:02	207,9	4,24
13:07:03	207,5	4,24
13:07:04	204,8	4,24
13:07:05	204,4	4,24
13:07:06	205,2	4,24
13:07:07	208,2	4,24
13:07:08	207,9	4,24
13:07:09	207,5	4,24
13:07:10	204,4	4,24
13:07:11	205,9	4,24
13:07:12	207,1	4,24
13:07:13	207,8	4,24
13:07:14	208,2	4,24

13:07:15	254,3	4,31
13:07:16	261,6	4,34
13:07:17	272,5	4,36
13:07:18	284,5	4,38
13:07:19	294,5	4,38
13:07:20	295,3	4,38
13:07:21	300,7	4,38
13:07:22	301,5	4,38
13:07:23	301,9	4,39
13:07:24	301,1	4,39
13:07:25	304,2	4,41
13:07:26	304,2	4,41
13:07:27	300,3	4,41
13:07:28	299,9	4,41
13:07:29	304,9	4,41
13:07:30	304,9	4,41
13:07:31	305,7	4,41
13:07:32	301,8	4,41
13:07:33	303	4,41
13:07:34	302,6	4,41
13:07:35	305,3	4,41
13:07:36	300,7	4,41
13:07:37	301,4	4,41
13:07:38	301,8	4,41
13:07:39	305,3	4,41
13:07:40	304,5	4,41
13:07:41	303,3	4,41
13:07:42	303,3	4,41
13:07:43	302,9	4,43
13:07:44	306,8	4,44
13:07:45	412	4,54
13:07:46	515,4	4,67
13:07:47	468,1	4,64
13:07:48	427,5	4,61
13:07:49	409,7	4,58
13:07:50	388,8	4,58
13:07:51	409,7	4,58
13:07:52	412,8	4,58

13:07:53	403,1	4,58
13:07:54	401,5	4,58
13:07:55	389,1	4,58
13:07:56	383,3	4,56
13:07:57	391,5	4,58
13:07:58	389,1	4,56
13:07:59	317,9	4,44
13:08:00	293,6	4,41
13:08:01	320,6	4,42
13:08:02	434,4	4,49
13:08:03	356,6	4,47
13:08:04	339,9	4,47
13:08:05	362,8	4,48
13:08:06	381,3	4,49
13:08:07	387,9	4,49
13:08:08	391,4	4,5
13:08:09	393,7	4,51
13:08:10	399,5	4,51
13:08:11	402,6	4,51
13:08:12	407,2	4,51
13:08:13	402,2	4,51
13:08:14	400,2	4,51
13:08:15	400,6	4,51
13:08:16	404,1	4,51
13:08:17	405,6	4,51
13:08:18	402,9	4,52
13:08:19	445,4	4,58
13:08:20	450	4,58
13:08:21	460,1	4,59
13:08:22	481	4,61
13:08:23	500,7	4,62
13:08:24	504,9	4,62
13:08:25	506,4	4,63
13:08:26	501,8	4,62
13:08:27	496,4	4,62
13:08:28	504,5	4,64
13:08:29	506,8	4,61
13:08:30	503,3	4,62

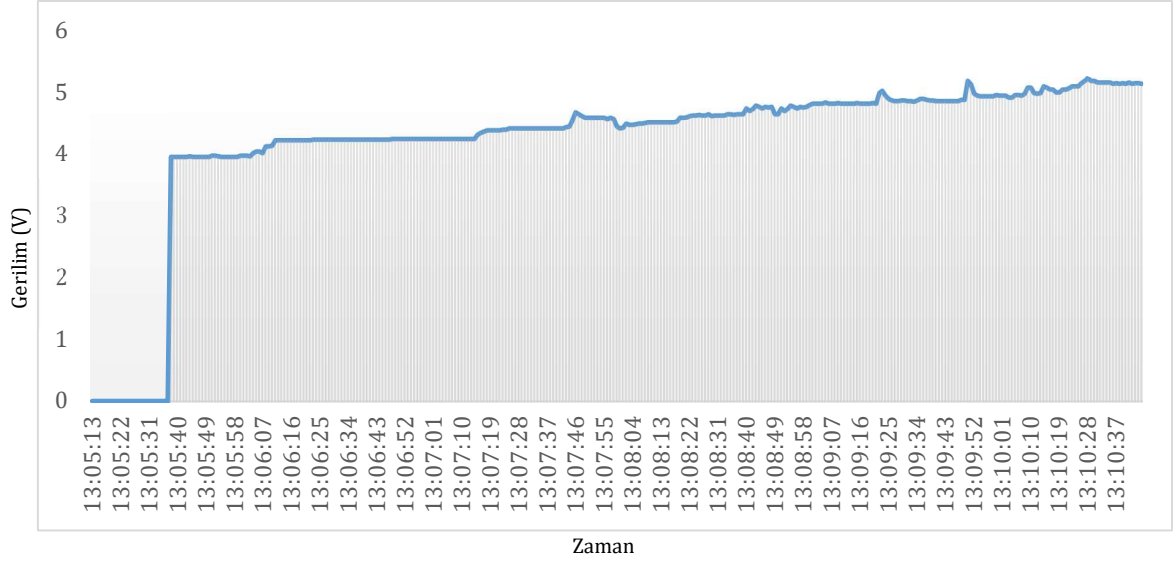
13:08:31	507,9	4,62
13:08:32	501	4,62
13:08:33	501,7	4,62
13:08:34	505,6	4,64
13:08:35	509	4,64
13:08:36	502,1	4,63
13:08:37	507,1	4,64
13:08:38	507,1	4,64
13:08:39	506,7	4,64
13:08:40	604,1	4,73
13:08:41	586,6	4,69
13:08:42	586,2	4,72
13:08:43	619,5	4,78
13:08:44	606,7	4,76
13:08:45	595,1	4,73
13:08:46	602	4,76
13:08:47	609,3	4,75
13:08:48	602	4,76
13:08:49	595,8	4,64
13:08:50	601,2	4,64
13:08:51	605,8	4,73
13:08:52	595,7	4,69
13:08:53	610,4	4,72
13:08:54	601,9	4,78
13:08:55	599,5	4,76
13:08:56	603,4	4,73
13:08:57	603,4	4,76
13:08:58	605,7	4,75
13:08:59	600,3	4,76
13:09:00	648,9	4,79
13:09:01	702,2	4,81
13:09:02	687,9	4,81
13:09:03	696	4,81
13:09:04	704,8	4,81
13:09:05	708,7	4,83
13:09:06	711,7	4,81
13:09:07	699,4	4,81
13:09:08	699,8	4,81

13:09:09	707,8	4,82
13:09:10	716,3	4,81
13:09:11	714,4	4,81
13:09:12	705,4	4,81
13:09:13	702,3	4,81
13:09:14	701,9	4,81
13:09:15	711,9	4,82
13:09:16	706,5	4,81
13:09:17	703,8	4,81
13:09:18	704,1	4,81
13:09:19	704,9	4,81
13:09:20	707,2	4,82
13:09:21	704,1	4,81
13:09:22	951,5	4,98
13:09:23	1019,8	5,02
13:09:24	915,2	4,94
13:09:25	836	4,89
13:09:26	813,6	4,86
13:09:27	785,8	4,85
13:09:28	788,1	4,85
13:09:29	819,6	4,86
13:09:30	810,4	4,86
13:09:31	796,4	4,85
13:09:32	796,4	4,85
13:09:33	808	4,84
13:09:34	826	4,86
13:09:35	860,4	4,89
13:09:36	849,9	4,89
13:09:37	835,2	4,87
13:09:38	812,8	4,86
13:09:39	814	4,86
13:09:40	808,9	4,85
13:09:41	803,9	4,85
13:09:42	799,5	4,85
13:09:43	799,5	4,85
13:09:44	806,9	4,85
13:09:45	814,1	4,85
13:09:46	795,2	4,85

13:09:47	797,9	4,85
13:09:48	815,9	4,87
13:09:49	826,4	4,87
13:09:50	1078,9	5,18
13:09:51	1017,9	5,12
13:09:52	963,9	4,97
13:09:53	925	4,94
13:09:54	911	4,93
13:09:55	887,5	4,93
13:09:56	882,4	4,93
13:09:57	878,9	4,93
13:09:58	898,6	4,93
13:09:59	915,8	4,95
13:10:00	892,3	4,94
13:10:01	878	4,94
13:10:02	910,3	4,94
13:10:03	884,5	4,91
13:10:04	871,4	4,91
13:10:05	902,5	4,95
13:10:06	904,4	4,95
13:10:07	891,6	4,94
13:10:08	960,9	4,97
13:10:09	1000,2	5,07
13:10:10	1001,3	5,07
13:10:11	986,2	4,98
13:10:12	977,8	4,97
13:10:13	999,6	4,98
13:10:14	1013,5	5,09
13:10:15	1007,7	5,07
13:10:16	999,9	5,04
13:10:17	995,6	5,04
13:10:18	975,9	4,99
13:10:19	991,6	4,99
13:10:20	1003,2	5,04
13:10:21	999,6	5,04
13:10:22	1000,4	5,06
13:10:23	1022,7	5,09
13:10:24	1010,3	5,09

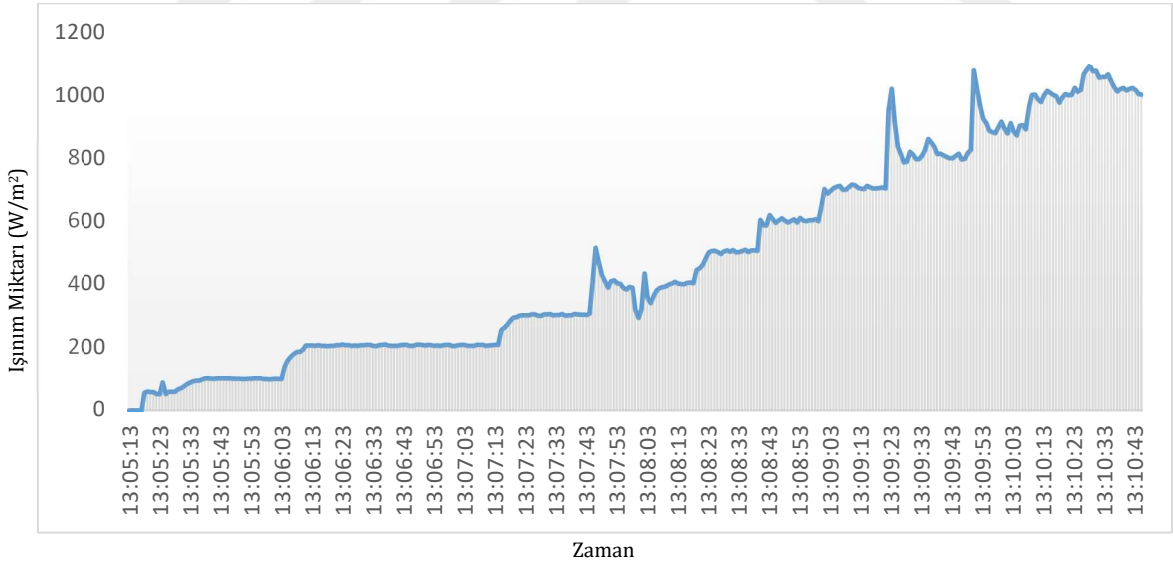
13:10:25	1016,8	5,09
13:10:26	1066,1	5,14
13:10:27	1081,7	5,18
13:10:28	1092,5	5,22
13:10:29	1075	5,18
13:10:30	1077,7	5,18
13:10:31	1055,4	5,15
13:10:32	1056,8	5,15
13:10:33	1057,2	5,15
13:10:34	1065,7	5,15
13:10:35	1042,8	5,15
13:10:36	1024,7	5,13
13:10:37	1011,6	5,14
13:10:38	1018	5,13
13:10:39	1023	5,14
13:10:40	1014,2	5,13
13:10:41	1019,1	5,15
13:10:42	1022,1	5,13
13:10:43	1015,4	5,14
13:10:44	1002,8	5,14
13:10:45	1000,8	5,13

Bu ışınım değişimine karşılık panelin ürettiği potansiyel fark ise Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Voltaj grafiği analiz edildiğinde, fotovoltaik hücrelerin beklenen karakteristiği gösterdiği görülmektedir. Işınım şiddeti henüz 100 W/m^2 (parçalı bulutlu/gölge) seviyelerine ulaştığında dahi panel geriliminin hızla 3.95 V seviyesine tırmandığı tespit edilmiştir. Işınım 1092 W/m^2 seviyesine ulaştığında ise gerilim, doyum noktasına yaklaşarak 5.22 V maksimum değerine ulaşmıştır. Şekil 3.2'deki bu ani yükseliş ve ardından gelen durağan seyir, panelin düşük ışık koşullarında dahi regülatör devresini tetikleyebilecek gerilimi üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.2. Tarama testi esnasında ölçülen voltajın zamana bağlı değişimi

Şekil 3.3 incelendiğinde, test ortamındaki ışık kaynağının şiddetinin 0 W/m^2 seviyesinden başlatılarak, kontrollü bir şekilde 1092 W/m^2 tepe değerine kadar kademeli olarak artırıldığı görülmektedir. Grafikteki bu lineer yükseliş (ramp-up), sistemin sadece tek bir noktada değil, bulutlu havadan tam güneşli havaya kadar olan tüm atmosferik koşullarda nasıl bir giriş enerjisine maruz kaldığını göstermektedir. Işınım şiddetindeki bu kararlı artış, panelin performans limitlerinin belirlenmesi için ideal bir test zemini oluşturmuştur.



Şekil 3.3. Tarama testi esnasında ışınım değerinin zamana bağlı değişimi

3.3. RF Enerji Hasadı Testleri ve Analizleri

Bu bölümde, 2.45 GHz frekansında çalışan Wi-Fi sinyallerinden AEM30940 enerji hasadı entegresi kullanılarak elde edilen enerji için veriler sunulmuştur. Yapılan testlerde, kaynak ile alıcı arasındaki mesafe, anten kazancı ve depolama birimi kapasitesi değişken olarak ele

alınmıştır. Ayrıca AEM30940 teknik dokümanında belirtilen RF giriş hassasiyet seviyeleri (P_{in}) dikkate alınarak, giriş portları (Low Power / High Power) dinamik olarak seçilmiş ve sistem verimliliği optimize edilmiştir.

3.3.1. Test metodolojisi ve deney kurulumu

Test düzeneği, sabit bir RF kaynağı (Wi-Fi Modem) ve AEM30940 tabanlı alıcı devresinden oluşturulmuştur. Deneylerde aşağıda yer alan prosedürler uygulanmıştır:

- ✓ AEM30940 teknik dokümanlarına göre; giriş gücünün -10 dBm seviyesinin üzerinde olduğu yakın mesafe ölçümlerinde "High Power (High)" portu, bu seviyenin altına düştüğü uzak mesafe ölçümlerinde ise "Low Power (Low)" portu kullanılarak empedans uygunluğu sağlanmıştır.
- ✓ Sisteme sırasıyla elektrolitik kapasitörler (470 μ F, 1000 μ F) ve süperkapasitörler (0.1F, 1F) entegre edilerek şarj süreleri kayıt altına alınmıştır.
- ✓ Elde edilen enerjinin kullanılabilirliğini test etmek amacıyla ESP32 mikrodenetleyicisi HVOUT çıkışına bağlanarak sistemin başlatma (boot) davranışı incelenmiştir.

3.3.2. Anten kazancı ve mesafe bazlı güç analizi

İlk aşamada, 3 farklı anten tipi (3 dBi, 7 dBi, 12 dBi) kullanılarak AEM30940 girişine ulaşan RF gücü deneysel olarak test edilmiştir ve uygun port seçimi belirlenmiştir.

Tablo 3.2 incelendiğinde, yapılan ölçümlerde 12 dBi kazançlı anten kullanıldığında 300 cm mesafede dahi -18 dBm seviyesinde güç elde edildiği ve sistemin düşük güç modunda çalışmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Ancak 3 dBi standart anten ile 100 cm sonrasında sinyal seviyesinin AEM30940'nın "Soğuk Başlama" eşiği olan -19 dBm'in altına düştüğü ve enerji hasadının durduğu tespit edilmiştir. Bu durum, RF enerji hasadı uygulamalarında yüksek kazançlı yönlü antenlerin gerekliliğini ortaya koymuştur. Tabloda ölü bölge olarak bahsedilen kısımlarda enerji hasadının olmadığı kastedilmektedir.

Tablo 3.2. Mesafeye göre giriş gücü ve port konfigürasyonu

Mesafe	3 dBi Anten	7 dBi Anten	12 dBi Anten
10 cm	-3 dBm (Yüksek)	+7 dBm (Yüksek)	+12 dBm (Yüksek)
50 cm	-11 dBm (Düşük)	-7 dBm (Düşük)	-2 dBm (Düşük)
100 cm	-17 dBm (Düşük)	-13 dBm (Düşük)	-8 dBm (Yüksek)
200 cm	-23 dBm (Ölü Bölge)	-19 dBm (Düşük)	-14 dBm (Düşük)
300 cm	-27 dBm (Ölü Bölge)	-23 dBm (Ölü Bölge)	-18 dBm (Düşük)

3.4. RF Depolama Birimi Şarj Testleri

Bu bölümde, farklı kapasite değerlerine sahip depolama elemanlarının dolum süreleri karşılaştırılmıştır.

3.4.1. Hızlı şarj testi (elektrolitik kapasitör)

Sistemin anlık tepkisini ölçmek amacıyla 470 μ F kapasitör kullanılmıştır. 470 μ F gibi düşük kapasiteli bir birim kullanıldığında, modemın yakın alanında saniyeler mertebesinde voltaj regülasyonunun sağlandığı görülmüştür. Bu konfigürasyonun test çalışmasında sistem için yeterli olduğu anlaşılmıştır. Tablo 3.3 verileri incelendiğinde, anten kazancındaki artışın şarj sürelerini önemli ölçüde kısalttığı ve mesafeye bağlı kayıpları kompanse ettiği görülmektedir. Özellikle 100 cm ve üzeri mesafelerde standart 3 dBi anten ile şarj süresi kabul edilemez seviyelere (8 dk 30 sn) çıkarken veya sistem tamamen ölü bölgeye girerken; 12 dBi yüksek kazançlı anten ile bu sürenin 1-5 dakika aralığında tutulabildiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, RF enerji hasadı uygulamalarında sadece kaynağa yakınlığın değil, yönlü ve yüksek kazançlı anten tercihinin de sistemin şarj hızını ve operasyonel sürekliliğini doğrudan belirlediğini kanıtlamaktadır.

Tablo 3.3. 470 μ F kapasitör dolum süreleri (0V -> 3.3V)

Mesafe	3 dBi Anten	7 dBi Anten	12 dBi Anten
10 cm	32 sn	25 sn	18 sn
50 cm	1 dk 40 sn	55 sn	35 sn
100 cm	8 dk 30 sn	3 dk 20 sn	1 dk 15 sn
200 cm	Ölü bölge	25 dk	4 dk 50 sn

3.4.2. Sürdürülebilir IoT testi (süperkapasitör)

Gerçek bir IoT düğümünü beslemek için gerekli enerji yoğunluğunu sağlamak adına süperkapasitör testleri uygulanmıştır. Testlerde "Can Suyu" (Kickstart) yöntemi ile başlangıç voltajı 3.0V'a getirilmiş ve 3.5V'a ulaşma süreleri incelenmiştir.

Tablo 3.4'te elde edilen veriler, 0.1F kapasiteli ve düşük sızıntı akımlı (Low Leakage) süperkapasitörlerin bu uygulama için en verimli depolama birimi olduğunu göstermiştir. 12 dBi anten ile 1 metre mesafede 1 saatin altında dolum süresi elde edilmiştir. Buna karşın, yapılan ek testlerde 1F kapasiteli süperkapasitörlerin yüksek sızıntı akımı ($I_{leakage} > 20\mu A$) nedeniyle, 50 cm mesafeden sonra şarj olamadığı ve voltajın sabit kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 3.4. 0.1F (5.5V) Süperkapasitör Dolum Süreleri (3.0V -> 3.5V)

Mesafe	3 dBi Anten	7 dBi Anten	12 dBi Anten
10 cm	18 dk	12 dk	8 dk

50 cm	1 saat 10 dk	45 dk	25 dk
100 cm	5 saat	2 saat 15 dk	55 dk
200 cm	ŞARJ YOK	18 saat	3 saat 20 dk

3.5. Yük Entegrasyonu ve Kesintili Hesaplama (ESP32 Testi)

Elde edilen enerjinin kullanılabilirliğini doğrulamak amacıyla AEM30940'ın HVOUT çıkışına ESP32 modülü bağlanmış ve sistem davranışı analiz edilmiştir.

3.5.1. 470µF kapasitör ile sürekli yeniden başlatma döngüsü problemi

Sistemde sadece 470µF kapasitör kullanıldığında, HVOUT çıkışı aktif olduğu anda (3.3V) ESP32'nin çektiği anlık kalkış akımının (~250mA), kapasitördeki enerjiyi milisaniyeler içinde tükettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, voltajın aniden çökmesine ve ESP32'nin "Düşük Gerilim Sıfırlaması" döngüsüne girmesine neden olmuştur. Dolayısıyla, sadece elektrolitik kapasitör ile Wi-Fi/LoRa iletişimi sağlanamamıştır.

3.5.2. Histerezis ve 0.1F süperkapasitör çözümü

470µF kapasitörün kullanımı ile yaşanan sorun, 0.1F süperkapasitör ve AEM30940'ın konfigüre edilebilir histerezis özelliği kullanılarak çözülmüştür. Sistem şu şekilde optimize edilmiştir:

- V_{CHRDY} (Açılış Voltajı): 3.5V olarak ayarlanmıştır.
- V_{OVD} (Kapanma Voltajı): 3.0V olarak ayarlanmıştır.

Bu konfigürasyon; düşük güçlü RF enerjisinin belirli bir voltaj aralığında biriktirilip paketler halinde kullanılması prensibine dayanan kararlı bir 'depola ve çalıştır' döngüsü oluşturmuştur.

Yürütülen kapsamlı testler sonucunda; 2.45 GHz Wi-Fi bandında RF enerji hasadı için en optimum sistem bileşenlerinin 12 dBi Yönlü Anten ve 0.1F (5.5V) süperkapasitör olduğu belirlenmiştir. Mesafeye bağlı olarak AEM30940 giriş portlarının (High/Low) doğru seçilmesi durumunda, 2-3 metre mesafeye kadar pasif bir sensör düğümünün süperkapasitörler sayesinde çalıştırılabileceği deneysel olarak görülmüştür.

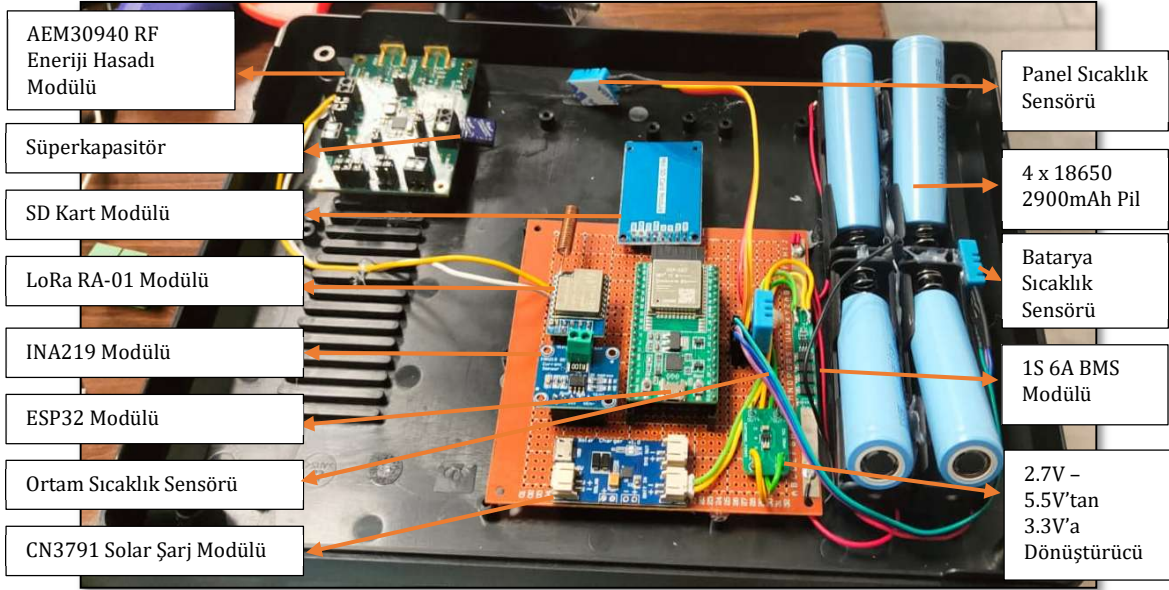
3.6. Tasarlanan Sistemin Sadece Güneş Enerjisiyle Yapılan Uzun Süreli Testleri

Güneş enerji hasadı için yapılan testler, güneş enerji santrallerine yönelik sensörler üreten Argesim Teknoloji adlı firmanın çatı sahasında yapılmıştır. Resim 3.7'de görüldüğü gibi sistem meteorolojik verilerin alındığı bir ortamda test edilmiştir. 18.09.2025 ile 7.10.2025 tarihleri arasında her 5 dakikada bir veri alınarak testler yapılmıştır.



Resim 3.7. Veri kaydedici sistemin test edildiği dış ortam görüntüsü

Resim 3.8'de tasarlanan sistemin nihai olarak hazırlanmış hali bulunmaktadır. Testler başlamadan önce tüm modüllerin bağlantısı başarıyla sağlanmıştır. Piller yerlerine testler tam olarak başladığı anda takılmıştır. Böylelikle güç tasarrufuna dikkat edilmiştir.



Resim 3.8. Tasarlanan sistemin nihai devre yapısı

Gerçekleştirilen testlerde sistemin batarya doluluk oranı (State of Charge, SoC) zaman içerisinde izlenmiş ve CN3791 şarj entegresinin performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, sistemin gün boyunca güneş ışığı koşullarına uyumlu bir şekilde enerji hasadı yaptığını göstermektedir. Günün erken saatlerinde düşük akım koşullarında başlayan şarj süreci, güneş panellerinin maksimum güç noktalarına ulaşmasıyla birlikte sabit akım (CC) moduna geçmiştir. Bu evrede doluluk oranında belirgin bir artış gözlenmiştir. Gün ortasında panel

geriliminin nominal seviyeye ulaşmasıyla birlikte şarj işlemi sabit gerilim (CV) moduna geçmiştir. Bu durum, CN3791'in CC-CV şarj karakteristiği ile tamamen uyumludur. Bu uyum, sistemin gün içi enerji üretimi ve depolama sürecinin verimli bir şekilde işlediğini göstermektedir. Özellikle 25-32 °C aralığındaki ortam sıcaklığı koşullarında pillerin kararlı bir dolunum profili sergilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler, güneş panellerinin sağladığı ortalama akımın 220 mA mertebesinde olduğu durumda sistemin 4 × 2900 mAh kapasiteli bataryaları tam şarja yaklaştırabildiğini göstermektedir. Şarjın son evresinde doluluk oranı artış hızının azalması, hücre başına gerilimin 4.2V'a yaklaşmasıyla akım sınırlamasına geçildiğini göstermektedir. Dolayısıyla sistemin tasarımında kullanılan CN3791 entegresi, hem şarj güvenliği hem de hücre ömrü açısından istenen şekilde çalışmaktadır. Veri kaydı sürecinde, ölçüm noktaları arasında görülen küçük genlikli salınımlar güneş ışınımındaki anlık değişimlerle ilişkilidir. Bu dalgalanmalar, MPPT benzeri enerji dengeleme etkisinin doğal sonucu olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar sistemin enerji dönüşüm veriminin sabit akım fazında yüksek, sabit gerilim fazında ise kontrollü olarak azaldığını göstermektedir. Yapılan testlerde, sistemin hem enerji toplama hem de depolama aşamalarında stabil bir çalışma performansı sergilediği ortaya konulmuştur. Doluluk oranı verileri, tasarlanan devre topolojisinin sürdürülebilir enerji hasadı için uygun olduğunu ve batarya yönetiminde CN3791'in beklenen regülasyon davranışını doğru biçimde yerine getirdiğini doğrulamaktadır. Bir sonraki alt bölümde elde edilen sonuçlar detaylı olarak verilmiştir.

3.7. Uzun Süreli Testlerin Analizi

Yapılan testler, 20 gün boyunca verilerin Google Sheet üzerinden izlenmesi yöntemiyle takip edilmiştir. Bu testler de yer alan ortam sıcaklığı verisi, panel sıcaklığı verisiyle karşılaştırma yapmak için alınmıştır. Panel sıcaklığı verisinin takip edilmesinin sebebi, kullanılan güneş panellerinin hangi sıcaklıklarda ne kadar enerji üretebildiğine yönelik değerlendirme yapılması içindir. Nitekim, güneş panellerinin yüksek sıcaklıklarda düşük verimlilik ortaya koyduğu bilinmektedir. Şekil 3.4'te IoT tabanlı olarak tasarlanan sistemin sağladığı verilerin kaydedildiği web ortamının görseli yer almaktadır. Takip edilen verilerde yer alan Işınım Değeri verisi, Çorum'un Organize Sanayi Bölgesinde yer alan Argesim Teknoloji firmasının Seven Sensor Solutions markalı Işınım Sensörünün verileridir.

Tarih	Saat	Ortam Sıcaklığı	Panel Sıcaklığı	Işınım Değeri (W/m2)	Batarya Temp_C	Batarya Voltage_V	Batarya SOC_%	Humidity_%
07.10.2025	11:00:00	2,00	1,80	298,50	3,01	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:05:00	1,90	1,80	283,80	2,91	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:10:00	1,90	1,60	302,50	2,91	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:15:00	1,80	1,80	254,40	2,81	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:20:00	27,40	27,20	368,50	28,25	3,67	47,67	63,91
07.10.2025	11:25:00	1,80	1,90	1,80	2,81	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:30:00	6,30	6,60	53,30	7,23	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:35:00	1,80	1,20	53,30	2,81	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:40:00	8,50	8,30	98,40	9,35	3,67	47,67	85
07.10.2025	11:45:00	7,30	7,20	85,40	8,17	3,67	47,67	84,95
07.10.2025	11:50:00	23,30	22,70	317,50	24,05	3,67	47,67	65,96
07.10.2025	11:55:00	20,40	20,20	298,50	21,12	3,67	47,67	71,57
07.10.2025	12:00:00	18,70	18,70	283,80	19,39	3,67	47,67	73,38
07.10.2025	12:05:00	17,30	17,20	302,50	18,03	3,67	47,67	73,93
07.10.2025	12:10:00	16,20	16,40	254,40	16,84	3,67	47,67	77,19
07.10.2025	12:15:00	15,70	15,60	234,60	16,30	3,67	47,67	74,33
07.10.2025	12:20:00	24,80	25,40	334,20	25,58	3,67	47,67	66,87

Şekil 3.4. Verilerin IoT tabanlı olarak aktarıldığı web sayfası görüntüsü

Işınım verileri ayrıntılı olarak incelendiğinde çok fazla iniş-çıkışların olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi bulutlu günlerde testlerin yapılmasıdır. Batarya sıcaklık verileri incelendiğinde ise farkların fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi ise bataryaların üzerine konulan sıcaklık sensörünün 2 cm uzaklığa bırakılmasıdır. Daha önceden yapılan testlerde bataryaya yakın bırakılan sıcaklık sensörlerinin bataryalara bitişik olarak konumlandırıldığında montaj açısından sorun çıkardığı tespit edilmiştir.

Sıcaklık ve ışınım parametrelerinin yeterli seviyede olduğu durumlarda, enerji hasadının verimli gerçekleştiği ve buna bağlı olarak batarya doluluk oranının yüksek seyrettiği görülmüştür. Çok bulutlu olan günlerde güneş enerji hasadı yapılamadığı için doluluk oranı oldukça düşmüştür. Tablo 3.5'te test yapılan 20 gün için ortalama, en küçük ve en büyük değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.5. Uzun süreli testlere ait takip edilen veriler için günlük ortalama, en büyük ve en küçük değerler

Tarih	Değer Türü	Ortam Sıcaklığı	Panel Sıcaklığı	Işınım Değeri (W/m2)	Batarya Sıcaklığı	Batarya Voltajı	Batarya Doluluk Oranı	Ortam Nem Oranı
18.09.2025	Ortalama Değer	14,98	15,45	97,24	16,00	4,12	90,00	76,64
	En Küçük Değer	5,00	5,40	0,00	6,01	4,12	90,00	57,40
	En Büyük Değer	31,40	30,90	798,10	32,03	4,12	90,00	85,00
19.09.2025	Ortalama Değer	18,33	20,69	220,11	19,05	4,13	94,55	69,24
	En Küçük Değer	8,00	7,80	0,00	9,01	4,12	90,00	35,00
	En Büyük Değer	33,60	32,90	1065,50	33,60	4,15	100,00	85,00
20.09.2025	Ortalama Değer	16,72	22,56	211,07	17,28	4,15	100,00	70,98
	En Küçük Değer	3,20	4,10	0,00	4,01	4,15	100,00	35,00
	En Büyük Değer	33,90	33,50	1053,90	33,90	4,15	100,00	85,00
21.09.2025	Ortalama Değer	18,00	19,44	212,84	18,63	4,15	100,00	69,26
	En Küçük Değer	7,80	7,60	0,00	8,81	4,15	100,00	35,00
	En Büyük Değer	33,70	33,90	985,10	33,70	4,15	100,00	85,00
22.09.2025	Ortalama Değer	16,55	23,39	209,56	17,13	4,15	100,00	67,65

	En Küçük Değer	3,20	6,60	0,00	4,21	4,15	100,00	35,00
	En Büyük Değer	33,80	33,60	820,70	33,90	4,15	100,00	85,00
23.09.2025	Ortalama Değer	15,85	16,79	233,14	16,43	4,15	100,00	66,61
	En Küçük Değer	0,70	0,10	0,00	1,71	4,15	100,00	35,00
	En Büyük Değer	33,90	33,50	819,00	33,70	4,15	100,00	85,00
24.09.2025	Ortalama Değer	16,40	16,43	232,42	17,00	4,15	100,00	65,52
	En Küçük Değer	0,80	0,50	0,00	1,79	4,15	100,00	35,00
	En Büyük Değer	33,40	33,80	810,90	33,38	4,15	100,00	85,00
25.09.2025	Ortalama Değer	16,94	23,45	206,07	17,56	4,15	100,00	65,92
	En Küçük Değer	2,50	3,80	0,00	3,51	4,15	100,00	35,00
	En Büyük Değer	33,70	33,40	796,20	33,50	4,15	100,00	85,00
26.09.2025	Ortalama Değer	16,86	19,03	174,67	17,50	4,13	93,73	69,69
	En Küçük Değer	3,30	2,70	0,00	4,30	4,10	86,27	35,00
	En Büyük Değer	33,80	32,80	1002,90	33,92	4,15	100,00	85,00
27.09.2025	Ortalama Değer	16,21	19,95	240,27	16,92	4,10	86,37	70,81
	En Küçük Değer	3,60	3,70	0,00	4,61	4,10	86,27	35,55
	En Büyük Değer	32,90	33,90	742,00	33,84	4,10	86,49	85,00
28.09.2025	Ortalama Değer	17,62	20,33	220,98	18,25	4,12	90,87	68,65
	En Küçük Değer	8,80	8,90	0,00	9,81	4,10	86,49	35,00
	En Büyük Değer	33,80	33,80	873,00	33,76	4,14	96,07	85,00
29.09.2025	Ortalama Değer	15,00	15,77	99,33	15,80	4,11	90,13	72,74
	En Küçük Değer	-0,70	0,70	0,00	0,31	4,08	83,05	38,05
	En Büyük Değer	33,10	33,90	413,30	33,78	4,14	96,07	85,00
30.09.2025	Ortalama Değer	16,23	16,02	167,18	17,07	4,01	75,58	74,50
	En Küçük Değer	9,30	9,50	0,00	10,31	3,93	66,69	35,00
	En Büyük Değer	33,90	32,60	913,30	32,43	4,08	83,05	85,00
1.10.2025	Ortalama Değer	17,15	17,00	210,78	17,92	3,83	59,17	71,36
	En Küçük Değer	8,20	8,40	0,00	9,21	3,70	50,22	35,00
	En Büyük Değer	33,20	33,60	911,60	33,45	3,93	66,69	85,00
2.10.2025	Ortalama Değer	16,54	16,37	147,50	17,33	3,59	42,02	73,05
	En Küçük Değer	3,90	3,60	0,00	4,91	3,46	32,27	39,75
	En Büyük Değer	33,70	33,80	1105,30	33,35	3,70	50,22	85,00
3.10.2025	Ortalama Değer	17,52	17,42	192,69	18,27	3,55	39,00	69,70
	En Küçük Değer	8,60	8,40	0,00	9,61	3,46	32,27	35,00
	En Büyük Değer	33,80	33,90	748,70	33,80	3,66	47,00	85,00
4.10.2025	Ortalama Değer	16,23	16,04	154,63	16,79	3,52	35,87	68,61
	En Küçük Değer	0,90	0,80	0,00	1,91	3,36	22,62	36,40
	En Büyük Değer	33,80	33,80	850,60	33,76	3,66	47,00	85,00
5.10.2025	Ortalama Değer	17,59	17,59	153,43	18,25	3,42	28,31	67,90
	En Küçük Değer	8,20	8,00	0,00	9,20	3,36	22,62	35,00
	En Büyük Değer	33,70	33,80	765,70	33,83	3,49	35,08	85,00
6.10.2025	Ortalama Değer	17,59	17,41	153,08	18,24	3,57	40,83	68,34
	En Küçük Değer	6,50	6,40	0,00	7,51	3,49	35,08	35,00
	En Büyük Değer	33,70	33,60	737,70	33,83	3,67	47,67	85,00
7.10.2025	Ortalama Değer	11,99	11,92	64,02	12,71	3,67	47,67	73,86
	En Küçük Değer	1,60	1,20	0,00	2,60	3,67	47,67	35,00
	En Büyük Değer	33,20	33,40	368,50	33,49	3,67	47,67	85,00

Uzun süreli testler için alınan 20 günlük verilerin tamamı incelenmiştir. Buna göre, verilerin bulutlu günlerde alınmasından ötürü ışınım değerlerinde büyük sapmalar yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu durum enerji hasadını doğrudan etkilediği için en kötü senaryolarda yaşanabilecek durumların gözlemlenmesi açısından önemlidir. Tablo 3.6'da sunulan rastgele bir güne ait 24 saatlik veriler incelendiğinde, sistemin dinamik ve değişken bir çevresel profilde test edildiği görülmektedir. Güneş ışınımı verileri, gün doğumunun yaklaşık 07:40 sularında başladığı görülmektedir.

Gün içerisinde ölçülen ışıınım değerlerindeki sert dalgalanmalar (Örneğin; 11:50'de 980,2 W/m² tepe değerine ulaşırken, 13:35'te 62,1 W/m² seviyesine ani düşüş), testin gerçekleştirildiği günün parçalı bulutlu bir hava karakteristiğine sahip olduğunu doğrulamaktadır. Panel sıcaklığı verileri, bu ışıınım değişimleriyle güçlü bir pozitif korelasyon göstermiş; ışıınımın arttığı anlarda panel sıcaklığı ortam sıcaklığının üzerine çıkarak termal ısınma etkisi gözlemlenmiştir.

Tablo 3.6. Örnek bir günlük (24 saatlik) veriler

Tarih	Saat	Ortam Sıcaklığı	Panel Sıcaklığı	ışıınım Değeri (W/m ²)	Batarya Sıcaklığı	Batarya Voltajı (V)	Batarya Doluluk Yüzdesi (%)	Nem Oranı (%)
30.09.2025	00:00:00	13,60	13,40	0,00	14,61	4,08	83,05	83,08
30.09.2025	00:05:00	13,70	13,40	0,00	14,71	4,08	83,05	79,40
30.09.2025	00:10:00	13,40	13,40	0,00	14,41	4,08	83,05	78,85
30.09.2025	00:15:00	14,00	13,60	0,00	15,01	4,08	83,05	80,21
30.09.2025	00:20:00	14,00	14,20	0,00	15,01	4,08	83,05	74,61
30.09.2025	00:25:00	15,10	14,90	0,00	16,11	4,08	83,05	77,54
30.09.2025	00:30:00	15,30	15,50	0,00	16,31	4,08	83,05	74,78
30.09.2025	00:35:00	15,50	15,40	0,00	16,51	4,08	83,05	76,68
30.09.2025	00:40:00	15,20	15,20	0,00	16,21	4,08	83,05	75,76
30.09.2025	00:45:00	15,50	15,90	0,00	16,51	4,08	83,05	77,29
30.09.2025	00:50:00	19,80	19,40	0,00	20,81	4,08	83,05	71,01
30.09.2025	00:55:00	31,00	32,00	0,00	31,73	4,08	83,05	59,72
30.09.2025	01:00:00	29,90	30,00	0,00	30,62	4,08	83,05	55,28
30.09.2025	01:05:00	31,60	32,00	0,00	32,38	4,08	83,05	57,62
30.09.2025	01:10:00	11,50	11,40	0,00	12,51	4,08	83,05	81,05
30.09.2025	01:15:00	11,50	11,80	0,00	12,51	4,08	83,05	80,06
30.09.2025	01:20:00	11,80	11,80	0,00	12,81	4,08	83,05	81,65
30.09.2025	01:25:00	12,10	11,60	0,00	13,11	4,08	83,05	85,00
30.09.2025	01:30:00	11,80	11,90	0,00	12,81	4,08	83,05	81,26
30.09.2025	01:35:00	11,80	11,50	0,00	12,81	4,08	83,05	81,28
30.09.2025	01:40:00	11,60	11,20	0,00	12,61	4,08	83,05	81,04
30.09.2025	01:45:00	11,60	12,00	0,00	12,61	4,08	83,05	82,56
30.09.2025	01:50:00	11,80	12,00	0,00	12,81	4,08	83,05	81,01
30.09.2025	01:55:00	11,80	12,10	0,00	12,81	4,08	83,05	79,96
30.09.2025	02:00:00	12,20	12,00	0,00	13,21	4,08	83,05	81,84
30.09.2025	02:05:00	12,20	11,90	0,00	13,21	4,08	83,05	79,61
30.09.2025	02:10:00	12,50	12,20	0,00	13,51	4,08	83,05	85,00
30.09.2025	02:15:00	12,40	12,20	0,00	13,41	4,08	83,05	80,26
30.09.2025	02:20:00	11,80	11,70	0,00	12,81	4,08	83,05	77,52
30.09.2025	02:25:00	12,10	12,30	0,00	13,11	4,08	83,05	78,22
30.09.2025	02:30:00	11,60	11,50	0,00	12,61	4,08	83,05	82,71
30.09.2025	02:35:00	11,60	11,50	0,00	12,61	4,08	83,05	81,71
30.09.2025	02:40:00	12,90	12,80	0,00	13,91	4,08	83,05	80,90
30.09.2025	02:45:00	12,80	12,60	0,00	13,81	4,08	83,05	81,44
30.09.2025	02:50:00	13,10	12,90	0,00	14,11	4,08	83,05	78,53
30.09.2025	02:55:00	12,90	13,00	0,00	13,91	4,08	83,05	77,43
30.09.2025	03:00:00	12,60	12,90	0,00	13,61	4,08	83,05	78,88
30.09.2025	03:05:00	12,60	12,60	0,00	13,61	4,08	83,05	78,24
30.09.2025	03:10:00	11,40	11,50	0,00	12,41	4,08	83,05	76,83
30.09.2025	03:15:00	12,50	12,60	0,00	13,51	4,08	83,05	81,66
30.09.2025	03:20:00	12,20	11,70	0,00	13,21	4,08	83,05	77,40
30.09.2025	03:25:00	11,90	12,10	0,00	12,91	4,08	83,05	78,58
30.09.2025	03:30:00	11,60	11,60	0,00	12,61	4,08	83,05	82,00
30.09.2025	03:35:00	11,40	11,30	0,00	12,41	4,08	83,05	78,04

30.09.2025	03:40:00	11,00	10,90	0,00	12,01	4,08	83,05	84,00
30.09.2025	03:45:00	11,60	11,10	0,00	12,61	4,08	83,05	80,50
30.09.2025	03:50:00	12,50	12,10	0,00	13,51	4,08	83,05	78,94
30.09.2025	03:55:00	12,10	11,80	0,00	13,11	4,08	83,05	82,02
30.09.2025	04:00:00	11,30	11,40	0,00	12,31	4,08	83,05	79,81
30.09.2025	04:05:00	11,60	11,70	0,00	12,61	4,08	83,05	82,63
30.09.2025	04:10:00	11,20	11,30	0,00	12,21	4,08	83,05	81,14
30.09.2025	04:15:00	11,00	11,20	0,00	12,01	4,08	83,05	84,97
30.09.2025	04:20:00	11,10	11,20	0,00	12,11	4,08	83,05	82,40
30.09.2025	04:25:00	10,70	10,90	0,00	11,71	4,08	83,05	81,52
30.09.2025	04:30:00	10,40	10,30	0,00	11,41	4,08	83,05	78,37
30.09.2025	04:35:00	10,30	10,40	0,00	11,31	4,08	83,05	83,52
30.09.2025	04:40:00	11,50	11,10	0,00	12,51	4,08	83,05	78,27
30.09.2025	04:45:00	10,40	10,30	0,00	11,41	4,08	83,05	82,11
30.09.2025	04:50:00	9,90	9,70	0,00	10,91	4,08	83,05	84,30
30.09.2025	04:55:00	9,70	9,80	0,00	10,71	4,08	83,05	85,00
30.09.2025	05:00:00	9,90	9,50	0,00	10,91	4,08	83,05	80,61
30.09.2025	05:05:00	9,30	9,60	0,00	10,31	4,08	83,05	83,58
30.09.2025	05:10:00	9,70	9,80	0,00	10,71	4,08	83,05	83,58
30.09.2025	05:15:00	10,20	9,80	0,00	11,21	4,08	83,05	81,73
30.09.2025	05:20:00	9,90	10,10	0,00	10,91	4,08	83,05	83,81
30.09.2025	05:25:00	11,20	11,10	0,00	12,21	4,08	83,05	79,59
30.09.2025	05:30:00	11,10	10,70	0,00	12,11	4,08	83,05	80,89
30.09.2025	05:35:00	10,90	10,80	0,00	11,91	4,08	83,05	82,67
30.09.2025	05:40:00	11,50	12,00	0,00	12,51	4,08	83,05	81,48
30.09.2025	05:45:00	12,00	11,50	0,00	13,01	4,08	83,05	78,78
30.09.2025	05:50:00	12,10	11,60	0,00	13,11	4,08	83,05	78,66
30.09.2025	05:55:00	12,30	12,20	0,00	13,31	4,08	83,05	79,94
30.09.2025	06:00:00	12,00	12,00	0,00	13,01	4,08	83,05	83,09
30.09.2025	06:05:00	11,70	12,30	0,00	12,71	4,08	83,05	75,08
30.09.2025	06:10:00	12,30	12,10	0,00	13,31	4,08	83,05	83,18
30.09.2025	06:15:00	12,40	12,30	0,00	13,41	4,08	83,05	76,52
30.09.2025	06:20:00	12,20	11,80	0,00	13,21	4,08	83,05	85,00
30.09.2025	06:25:00	11,80	12,00	0,00	12,81	4,08	83,05	85,00
30.09.2025	06:30:00	12,00	11,70	0,00	13,01	4,08	83,05	82,33
30.09.2025	06:35:00	11,60	11,80	0,00	12,61	4,08	83,05	81,41
30.09.2025	06:40:00	11,80	11,70	0,00	12,81	4,08	83,05	79,73
30.09.2025	06:45:00	11,20	11,30	0,00	12,21	4,08	83,05	79,85
30.09.2025	06:50:00	11,00	11,50	0,00	12,01	4,08	83,05	83,08
30.09.2025	06:55:00	13,00	13,40	0,00	14,01	4,08	83,05	79,30
30.09.2025	07:00:00	12,90	12,80	0,00	13,91	4,08	83,05	80,93
30.09.2025	07:05:00	31,60	32,10	0,00	32,27	4,08	83,05	56,61
30.09.2025	07:10:00	13,30	13,10	0,00	14,31	4,08	83,05	81,61
30.09.2025	07:15:00	13,00	12,90	0,00	14,01	4,08	83,05	78,63
30.09.2025	07:20:00	21,70	19,60	0,00	22,36	4,08	83,05	71,16
30.09.2025	07:25:00	19,50	17,90	0,00	20,15	4,08	83,05	74,15
30.09.2025	07:30:00	18,80	16,70	0,00	19,57	4,08	83,05	68,31
30.09.2025	07:35:00	18,30	16,10	0,00	19,08	4,08	83,05	73,51
30.09.2025	07:40:00	17,60	16,20	161,00	18,39	4,08	83,05	72,17
30.09.2025	07:45:00	21,90	19,90	190,50	22,67	4,08	83,05	70,30
30.09.2025	07:50:00	18,10	16,00	219,50	18,93	4,08	83,05	72,10
30.09.2025	07:55:00	18,20	15,70	231,90	19,12	4,08	83,05	70,36
30.09.2025	08:00:00	18,60	16,00	144,40	19,49	4,08	83,05	73,32
30.09.2025	08:05:00	18,90	17,70	137,20	19,80	4,08	83,05	71,58
30.09.2025	08:10:00	18,30	18,80	134,00	19,22	4,08	83,05	74,50
30.09.2025	08:15:00	19,00	19,50	120,50	19,89	4,08	83,05	75,08
30.09.2025	08:20:00	19,40	19,60	139,60	20,25	4,08	83,05	69,49
30.09.2025	08:25:00	18,10	15,50	189,80	18,97	4,08	83,05	76,90
30.09.2025	08:30:00	18,90	19,30	245,40	19,71	4,08	83,05	76,31
30.09.2025	08:35:00	22,10	19,90	842,10	22,73	4,08	83,05	68,68

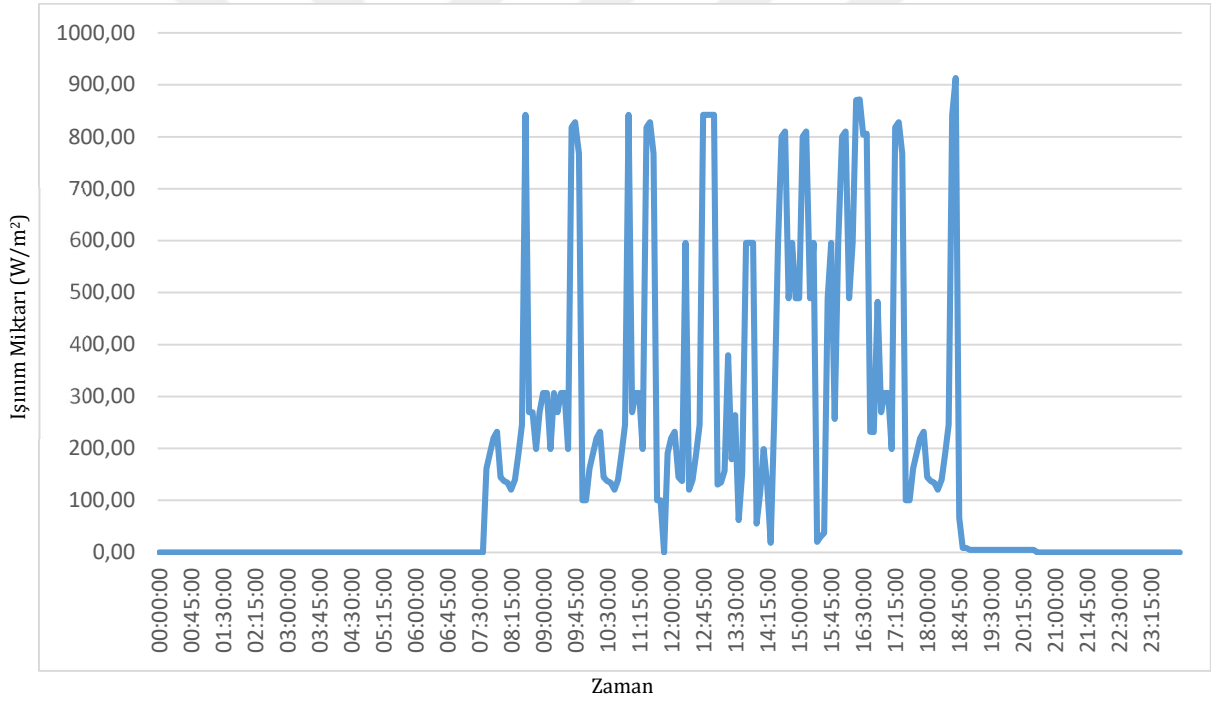
30.09.2025	08:40:00	25,80	24,20	269,80	26,59	4,08	83,05	67,29
30.09.2025	08:45:00	30,80	31,10	269,80	31,57	4,08	83,05	54,67
30.09.2025	08:50:00	29,60	28,90	198,80	30,30	4,08	83,05	56,78
30.09.2025	08:55:00	29,50	28,70	269,80	30,17	4,08	83,05	62,74
30.09.2025	09:00:00	28,80	28,00	306,40	29,45	4,08	83,05	61,80
30.09.2025	09:05:00	28,30	27,00	306,40	29,05	4,08	83,05	60,96
30.09.2025	09:10:00	28,00	26,80	198,80	28,65	4,08	83,05	62,47
30.09.2025	09:15:00	23,10	21,30	306,40	23,80	4,08	83,05	68,76
30.09.2025	09:20:00	29,80	27,30	269,80	30,50	4,08	83,05	59,35
30.09.2025	09:25:00	33,90	31,10	306,40	25,50	4,08	83,05	55,94
30.09.2025	09:30:00	25,50	31,00	306,40	25,70	4,08	83,05	55,60
30.09.2025	09:35:00	32,70	31,30	198,80	28,20	4,08	83,05	55,16
30.09.2025	09:40:00	28,20	25,80	818,20	29,18	4,08	83,05	58,45
30.09.2025	09:45:00	26,10	24,00	828,20	26,77	4,08	83,05	58,58
30.09.2025	09:50:00	26,80	24,80	767,60	27,41	4,08	83,05	63,30
30.09.2025	09:55:00	31,20	29,00	100,10	31,82	4,08	83,05	61,73
30.09.2025	10:00:00	18,70	18,70	100,10	19,54	4,08	83,05	72,73
30.09.2025	10:05:00	22,40	20,30	161,00	23,12	4,08	83,05	68,58
30.09.2025	10:10:00	17,60	17,50	190,50	18,47	4,08	83,05	78,94
30.09.2025	10:15:00	13,00	13,20	219,50	14,00	4,08	83,05	78,97
30.09.2025	10:20:00	13,10	12,80	231,90	14,11	4,08	83,05	75,64
30.09.2025	10:25:00	12,80	12,70	144,40	13,81	4,08	83,05	78,51
30.09.2025	10:30:00	12,60	12,50	137,20	13,61	4,08	83,05	78,10
30.09.2025	10:35:00	12,40	12,30	134,00	13,41	4,08	83,05	82,01
30.09.2025	10:40:00	12,60	12,50	120,50	13,61	4,08	83,05	81,13
30.09.2025	10:45:00	13,10	13,20	139,60	14,10	4,08	83,05	78,11
30.09.2025	10:50:00	12,30	12,80	189,80	13,31	4,08	83,05	78,84
30.09.2025	10:55:00	12,80	12,40	245,40	13,81	4,08	83,05	78,02
30.09.2025	11:00:00	12,60	12,80	842,10	13,61	4,08	83,05	80,11
30.09.2025	11:05:00	12,70	12,50	269,80	13,71	4,08	83,05	81,16
30.09.2025	11:10:00	13,10	13,00	306,40	14,11	4,08	83,05	81,14
30.09.2025	11:15:00	13,00	13,00	306,40	14,01	4,08	83,05	81,90
30.09.2025	11:20:00	17,90	18,10	198,80	18,76	4,08	83,05	74,65
30.09.2025	11:25:00	12,60	12,10	818,20	13,61	4,08	83,05	83,21
30.09.2025	11:30:00	13,50	12,90	828,20	14,50	4,08	83,05	79,07
30.09.2025	11:35:00	13,10	13,10	767,60	14,11	4,08	83,05	76,53
30.09.2025	11:40:00	13,70	13,60	100,10	14,70	4,08	83,05	80,18
30.09.2025	11:45:00	13,50	13,50	100,10	14,50	4,08	83,05	78,64
30.09.2025	11:50:00	16,90	16,40	980,20	17,78	4,08	83,05	75,57
30.09.2025	11:55:00	15,90	16,10	190,50	16,79	4,08	83,05	77,17
30.09.2025	12:00:00	15,50	15,50	219,50	16,42	4,08	83,05	72,83
30.09.2025	12:05:00	15,60	15,20	231,90	16,53	4,08	83,05	72,70
30.09.2025	12:10:00	15,20	15,30	144,40	16,13	4,08	83,05	77,47
30.09.2025	12:15:00	15,30	15,20	137,20	16,23	4,08	83,05	76,36
30.09.2025	12:20:00	17,30	17,10	595,90	18,17	4,08	83,05	69,72
30.09.2025	12:25:00	14,30	14,80	120,50	15,26	4,08	83,05	75,34
30.09.2025	12:30:00	14,30	14,50	139,60	15,28	4,08	83,05	76,56
30.09.2025	12:35:00	14,10	14,00	189,80	15,09	4,08	83,05	78,66
30.09.2025	12:40:00	14,20	14,20	245,40	15,18	4,08	83,05	79,79
30.09.2025	12:45:00	13,70	13,50	842,10	14,68	4,08	83,05	79,68
30.09.2025	12:50:00	13,60	13,60	842,10	14,58	4,08	83,05	78,88
30.09.2025	12:55:00	14,90	14,60	842,10	15,85	4,08	83,05	79,16
30.09.2025	13:00:00	13,40	13,60	842,10	14,38	4,08	83,05	76,79
30.09.2025	13:05:00	17,50	17,20	130,10	18,29	3,93	66,69	71,03
30.09.2025	13:10:00	17,90	17,50	135,00	18,68	3,93	66,69	75,44
30.09.2025	13:15:00	17,60	17,50	156,60	18,34	3,93	66,69	73,95
30.09.2025	13:20:00	17,40	17,60	379,30	18,26	3,93	66,69	71,91
30.09.2025	13:25:00	18,00	18,00	179,10	18,70	3,93	66,69	73,15
30.09.2025	13:30:00	16,80	17,10	264,20	17,46	3,93	66,69	71,63
30.09.2025	13:35:00	14,60	15,30	62,10	15,51	3,93	66,69	76,43

30.09.2025	13:40:00	15,70	15,60	153,10	16,45	3,93	66,69	75,83
30.09.2025	13:45:00	14,80	14,90	595,90	15,75	3,93	66,69	74,68
30.09.2025	13:50:00	14,70	14,80	595,90	15,65	3,93	66,69	76,57
30.09.2025	13:55:00	14,50	14,80	595,90	15,44	3,93	66,69	73,60
30.09.2025	14:00:00	15,20	15,00	54,90	16,12	3,93	66,69	78,68
30.09.2025	14:05:00	17,50	17,10	114,30	18,32	3,93	66,69	73,67
30.09.2025	14:10:00	16,40	16,90	199,00	17,07	3,93	66,69	77,06
30.09.2025	14:15:00	17,50	17,30	130,10	18,32	3,93	66,69	76,59
30.09.2025	14:20:00	15,10	14,40	18,40	16,08	3,93	66,69	79,14
30.09.2025	14:25:00	17,10	16,80	257,00	18,04	3,93	66,69	71,25
30.09.2025	14:30:00	13,60	13,50	595,90	14,59	3,93	66,69	79,52
30.09.2025	14:35:00	14,20	13,80	800,60	15,19	3,93	66,69	77,52
30.09.2025	14:40:00	14,20	13,60	810,30	15,19	3,93	66,69	79,86
30.09.2025	14:45:00	15,00	14,50	488,80	15,97	3,93	66,69	74,61
30.09.2025	14:50:00	15,90	15,50	595,90	16,84	3,93	66,69	74,34
30.09.2025	14:55:00	15,60	15,20	488,80	16,53	3,93	66,69	77,02
30.09.2025	15:00:00	17,60	17,50	488,80	18,50	3,93	66,69	76,35
30.09.2025	15:05:00	15,50	14,90	800,60	16,44	3,93	66,69	78,98
30.09.2025	15:10:00	15,50	14,90	810,30	16,49	3,93	66,69	76,99
30.09.2025	15:15:00	15,40	15,10	488,80	16,39	3,93	66,69	75,87
30.09.2025	15:20:00	16,00	15,60	595,90	16,99	3,93	66,69	73,69
30.09.2025	15:25:00	16,10	16,00	19,80	17,08	3,93	66,69	78,56
30.09.2025	15:30:00	16,50	15,80	30,10	17,46	3,93	66,69	78,16
30.09.2025	15:35:00	16,60	16,10	37,30	17,55	3,93	66,69	76,53
30.09.2025	15:40:00	14,90	15,10	488,80	15,86	3,93	66,69	76,62
30.09.2025	15:45:00	15,40	15,10	595,90	16,32	3,93	66,69	80,04
30.09.2025	15:50:00	29,50	30,10	257,00	30,14	3,93	66,69	56,57
30.09.2025	15:55:00	19,80	19,90	595,90	20,71	3,93	66,69	74,35
30.09.2025	16:00:00	25,70	28,20	800,60	25,50	3,93	66,69	39,36
30.09.2025	16:05:00	28,20	25,50	810,30	25,70	3,93	66,69	46,97
30.09.2025	16:10:00	25,50	25,70	488,80	28,20	3,93	66,69	47,34
30.09.2025	16:15:00	25,70	28,20	595,90	25,50	3,93	66,69	45,29
30.09.2025	16:20:00	28,20	25,50	870,40	25,70	3,93	66,69	45,05
30.09.2025	16:25:00	25,50	25,70	872,00	28,20	3,93	66,69	50,61
30.09.2025	16:30:00	25,70	28,20	804,20	25,50	3,93	66,69	36,21
30.09.2025	16:35:00	28,60	28,90	806,00	29,99	3,93	66,69	64,95
30.09.2025	16:40:00	30,00	30,40	231,90	30,60	3,93	66,69	58,60
30.09.2025	16:45:00	31,50	31,80	231,30	32,11	3,93	66,69	55,69
30.09.2025	16:50:00	31,30	31,90	482,40	32,33	3,93	66,69	60,58
30.09.2025	16:55:00	31,50	32,50	269,80	32,17	3,93	66,69	56,16
30.09.2025	17:00:00	31,70	32,60	306,40	32,43	3,93	66,69	53,82
30.09.2025	17:05:00	13,60	13,20	306,40	14,60	3,93	66,69	81,01
30.09.2025	17:10:00	29,40	30,20	198,80	30,07	3,93	66,69	59,78
30.09.2025	17:15:00	28,20	25,50	818,20	25,70	3,93	66,69	36,21
30.09.2025	17:20:00	25,50	25,70	828,20	28,20	3,93	66,69	37,99
30.09.2025	17:25:00	25,70	28,20	767,60	25,50	3,93	66,69	35,00
30.09.2025	17:30:00	21,60	21,30	100,10	22,49	3,93	66,69	68,95
30.09.2025	17:35:00	23,40	23,30	100,10	24,25	3,93	66,69	70,50
30.09.2025	17:40:00	25,30	25,40	161,00	26,04	3,93	66,69	64,46
30.09.2025	17:45:00	27,10	27,40	190,50	27,78	3,93	66,69	63,80
30.09.2025	17:50:00	28,80	29,00	219,50	29,43	3,93	66,69	62,02
30.09.2025	17:55:00	25,80	26,20	231,90	26,40	3,93	66,69	67,42
30.09.2025	18:00:00	25,50	25,80	144,40	26,27	3,93	66,69	64,43
30.09.2025	18:05:00	26,00	26,70	137,20	26,78	3,93	66,69	62,19
30.09.2025	18:10:00	27,50	27,30	134,00	28,29	3,93	66,69	62,37
30.09.2025	18:15:00	28,20	29,30	120,50	29,01	3,93	66,69	59,08
30.09.2025	18:20:00	31,20	31,90	139,60	31,98	3,93	66,69	55,31
30.09.2025	18:25:00	28,20	25,50	189,80	25,70	3,93	66,69	54,50
30.09.2025	18:30:00	25,50	25,70	245,40	28,20	3,93	66,69	45,41
30.09.2025	18:35:00	25,70	28,20	842,10	25,50	3,93	66,69	42,81

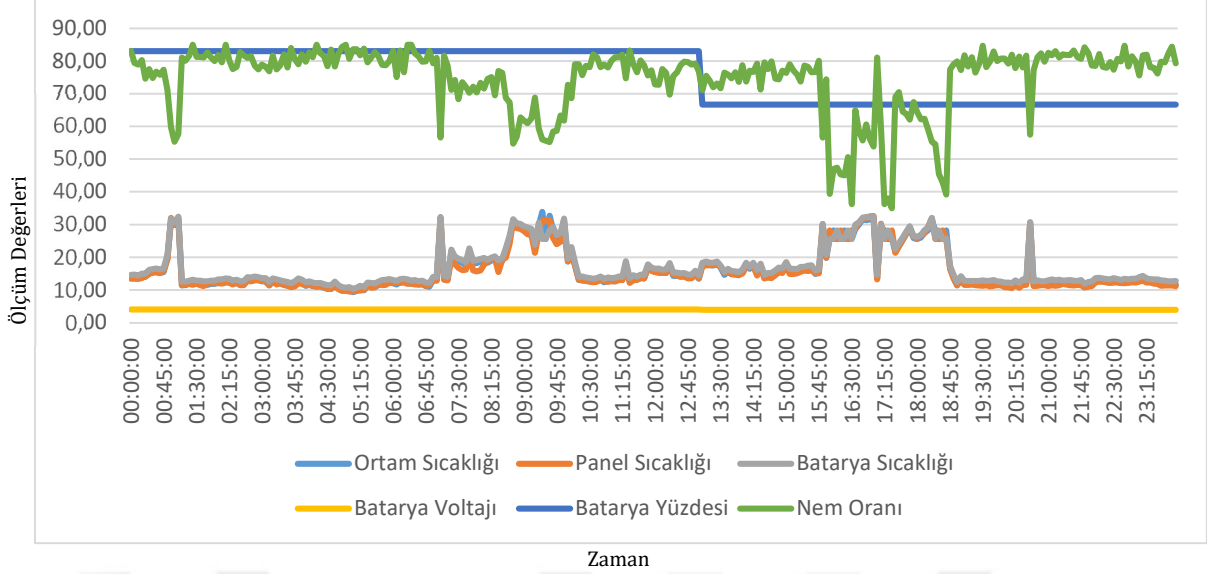
30.09.2025	18:40:00	28,20	25,50	913,30	25,70	3,93	66,69	39,18
30.09.2025	18:45:00	16,40	16,50	66,10	17,30	3,93	66,69	77,46
30.09.2025	18:50:00	13,60	13,50	8,10	14,60	3,93	66,69	79,00
30.09.2025	18:55:00	11,40	11,50	8,10	12,41	3,93	66,69	79,91
30.09.2025	19:00:00	13,20	13,10	4,50	14,21	3,93	66,69	77,23
30.09.2025	19:05:00	11,70	11,60	4,50	12,71	3,93	66,69	81,70
30.09.2025	19:10:00	11,70	11,60	4,50	12,71	3,93	66,69	78,27
30.09.2025	19:15:00	11,70	11,80	4,50	12,71	3,93	66,69	81,18
30.09.2025	19:20:00	11,70	11,50	4,50	12,71	3,93	66,69	76,45
30.09.2025	19:25:00	11,70	11,40	4,50	12,71	3,93	66,69	79,17
30.09.2025	19:30:00	11,90	11,30	4,50	12,91	3,93	66,69	84,68
30.09.2025	19:35:00	11,70	11,50	4,50	12,71	3,93	66,69	78,10
30.09.2025	19:40:00	11,80	11,10	4,50	12,81	3,93	66,69	79,85
30.09.2025	19:45:00	12,00	11,30	4,50	13,01	3,93	66,69	82,86
30.09.2025	19:50:00	11,60	11,50	4,50	12,61	3,93	66,69	79,99
30.09.2025	19:55:00	11,50	11,50	4,50	12,51	3,93	66,69	80,79
30.09.2025	20:00:00	11,20	10,90	4,50	12,21	3,93	66,69	80,79
30.09.2025	20:05:00	11,20	10,80	4,50	12,21	3,93	66,69	79,15
30.09.2025	20:10:00	11,00	10,60	4,50	12,01	3,93	66,69	81,89
30.09.2025	20:15:00	11,90	11,50	4,50	12,91	3,93	66,69	77,85
30.09.2025	20:20:00	11,10	10,70	4,50	12,11	3,93	66,69	81,32
30.09.2025	20:25:00	12,20	11,60	4,50	13,21	3,93	66,69	78,05
30.09.2025	20:30:00	11,90	11,60	4,50	12,91	3,93	66,69	81,61
30.09.2025	20:35:00	30,10	30,50	0,00	30,73	3,93	66,69	57,46
30.09.2025	20:40:00	11,50	11,20	0,00	12,51	3,93	66,69	77,17
30.09.2025	20:45:00	11,90	11,30	0,00	12,91	3,93	66,69	81,14
30.09.2025	20:50:00	11,60	11,50	0,00	12,61	3,93	66,69	82,36
30.09.2025	20:55:00	11,60	11,50	0,00	12,61	3,93	66,69	79,77
30.09.2025	21:00:00	11,90	11,20	0,00	12,91	3,93	66,69	82,47
30.09.2025	21:05:00	12,20	11,50	0,00	13,21	3,93	66,69	81,73
30.09.2025	21:10:00	11,90	11,30	0,00	12,91	3,93	66,69	83,02
30.09.2025	21:15:00	12,10	11,50	0,00	13,11	3,93	66,69	81,01
30.09.2025	21:20:00	11,80	11,80	0,00	12,81	3,93	66,69	82,02
30.09.2025	21:25:00	11,90	11,70	0,00	12,91	3,93	66,69	81,84
30.09.2025	21:30:00	12,00	11,50	0,00	13,01	3,93	66,69	81,81
30.09.2025	21:35:00	11,80	11,40	0,00	12,81	3,93	66,69	83,16
30.09.2025	21:40:00	11,70	11,60	0,00	12,71	3,93	66,69	81,14
30.09.2025	21:45:00	12,00	11,50	0,00	13,01	3,93	66,69	80,62
30.09.2025	21:50:00	10,80	10,80	0,00	11,81	3,93	66,69	84,18
30.09.2025	21:55:00	11,40	11,00	0,00	12,41	3,93	66,69	82,38
30.09.2025	22:00:00	11,50	11,20	0,00	12,51	3,93	66,69	78,60
30.09.2025	22:05:00	12,60	12,30	0,00	13,61	3,93	66,69	78,47
30.09.2025	22:10:00	12,70	12,50	0,00	13,71	3,93	66,69	82,07
30.09.2025	22:15:00	12,50	12,50	0,00	13,51	3,93	66,69	78,22
30.09.2025	22:20:00	12,30	12,30	0,00	13,31	3,93	66,69	77,95
30.09.2025	22:25:00	12,20	12,10	0,00	13,21	3,93	66,69	79,64
30.09.2025	22:30:00	12,60	12,20	0,00	13,61	3,93	66,69	77,34
30.09.2025	22:35:00	12,30	12,30	0,00	13,31	3,93	66,69	80,63
30.09.2025	22:40:00	12,00	12,10	0,00	13,01	3,93	66,69	79,83
30.09.2025	22:45:00	12,40	12,00	0,00	13,41	3,93	66,69	84,63
30.09.2025	22:50:00	12,20	12,20	0,00	13,21	3,93	66,69	78,28
30.09.2025	22:55:00	12,40	12,30	0,00	13,41	3,93	66,69	81,44
30.09.2025	23:00:00	12,40	12,20	0,00	13,41	3,93	66,69	79,73
30.09.2025	23:05:00	12,90	12,50	0,00	13,91	3,93	66,69	75,52
30.09.2025	23:10:00	13,30	12,80	0,00	14,31	3,93	66,69	81,75
30.09.2025	23:15:00	12,50	12,20	0,00	13,51	3,93	66,69	81,94
30.09.2025	23:20:00	12,30	12,30	0,00	13,31	3,93	66,69	78,14
30.09.2025	23:25:00	12,20	11,90	0,00	13,21	3,93	66,69	77,93
30.09.2025	23:30:00	12,20	11,80	0,00	13,21	3,93	66,69	76,17
30.09.2025	23:35:00	11,90	11,30	0,00	12,91	3,93	66,69	79,81

30.09.2025	23:40:00	11,80	11,40	0,00	12,81	3,93	66,69	79,59
30.09.2025	23:45:00	11,60	11,40	0,00	12,61	3,93	66,69	82,32
30.09.2025	23:50:00	11,60	11,40	0,00	12,61	3,93	66,69	84,39
30.09.2025	23:55:00	11,70	11,20	0,00	12,71	3,93	66,69	79,25

5 dakika aralıklarla ile takip edilen veriler için örnek bir günlük (24 saatlik) verilerin ışı nım değ erleri Ş ekil 3.5'te gösterilmektedir. Ş ekil 3.5 incelendiğ inde, test gününde güneş ışı nım ş iddetinin 100 W/m^2 ile 900 W/m^2 arasında sert dalgalanmalar gösterdiğ i görülmektedir. Bu durum, havanın parç alı bulutlu olduğ unu ve güneş paneline ulaş an enerjinin kesintili bir profile sahip olduğ unu göstermektedir. Ş ekil 3.6'daki ortam ve panel sıcaklık verileri de bu ışı nım profiliyle tam bir uyum içerisindedir; ışı nımın arttı ğ ı anlarda sıcaklıklar yüks elirken, bulut geç iş lerinde ani düş üş ler kaydedilmiştir. Nem oranı ise beklendiğ i üzere sıcaklık ile ters orantılı bir seyir izlemiştir. Ş ekil 3.6'da ise bir günlük takip edilen diğ er parametre verileri yer almaktadır.



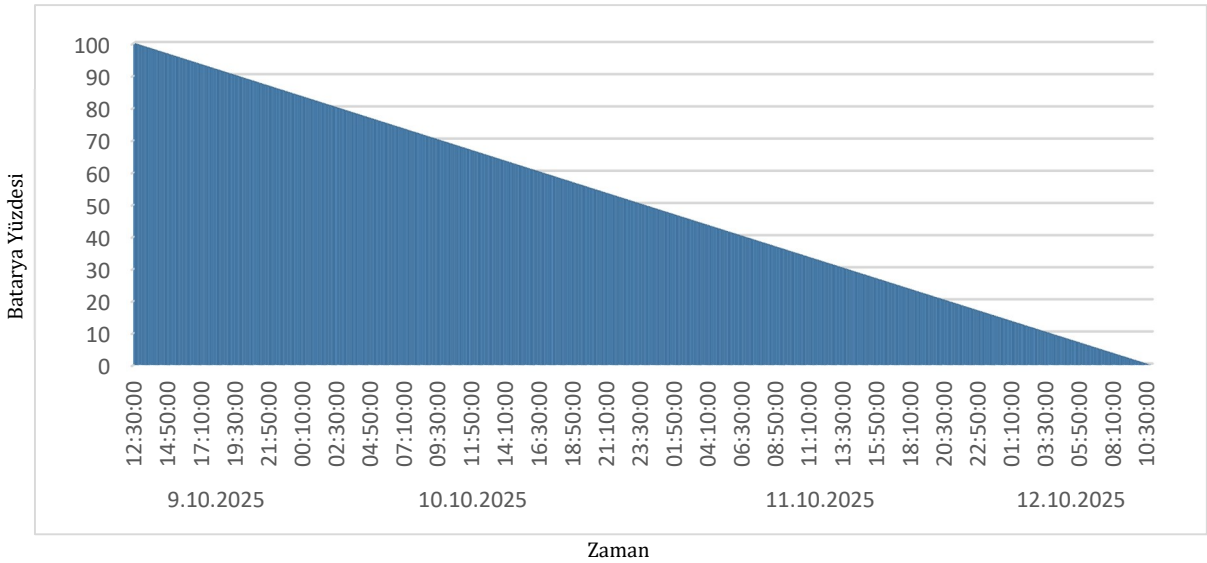
Ş ekil 3.5. Takip edilen veriler için örnek bir günlük ışı nım verileri



Şekil 3.6. Takip edilen veriler için örnek bir günlük farklı verilerin değişimi

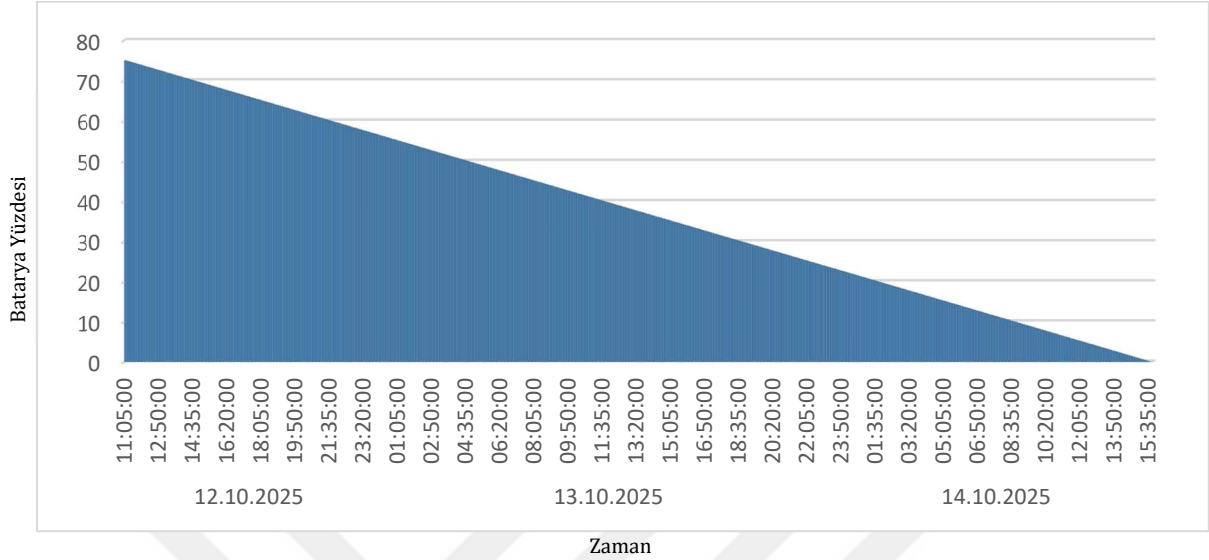
3.8. Batarya Kapasitesine Göre Çalışma Analizi

Gerçekleştirilen testler ile pil setinin belirli şarj seviyelerinde (%100, %75, %50 ve %25) iken sistemin enerji hasadı yapmadan bağımsız çalışma süresi analiz edilmiştir. Bu testler esnasında ortam, panel, batarya sıcaklıkları, batarya voltajı ve ortam nem oranı gibi parametreler için 5 farklı sensör üzerinden veri takibi yapılmıştır. Sistemin çalışma süresi takip edilen veri sayısına yani çalışan sensör sayısına göre değişiklik gösterebilir. Şekil 3.7'de %100 şarj durumunda çalıştırılan sistemin solar enerji hasadı yapmadan tam kapasite ile test şartlarında toplamda 70,1 saat boyunca çalıştığı gösterilmiştir.



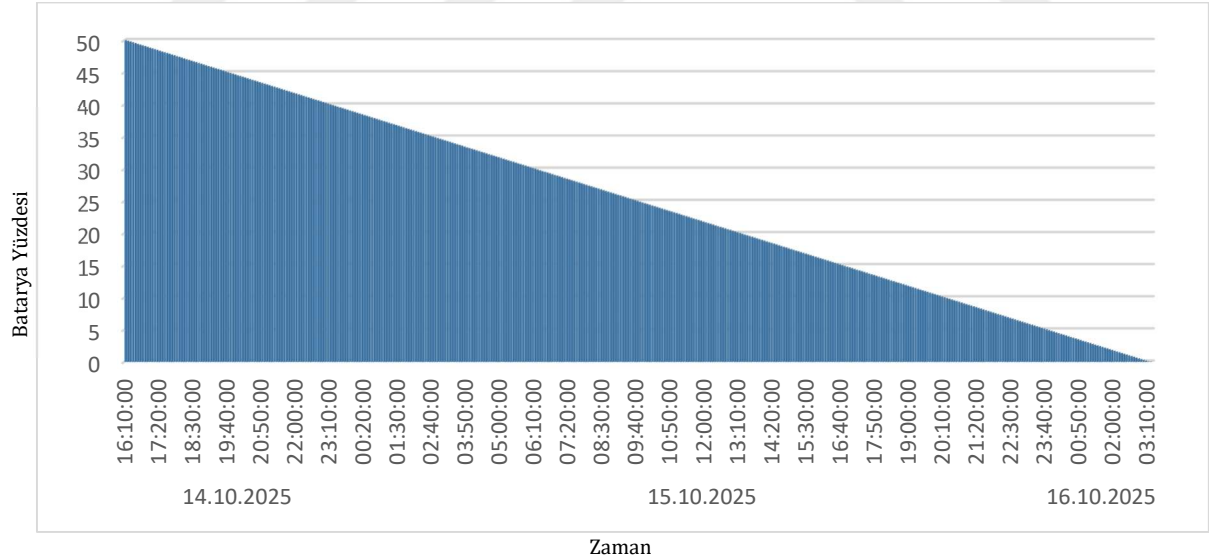
Şekil 3.7. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %100 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Şekil 3.8’de yer alan grafiğe göre batarya %75 dolu iken sistem enerji hasadı yapmadan 52,6 saat boyunca çalışmıştır ve kesintisiz olarak veri takibi yapılmıştır.



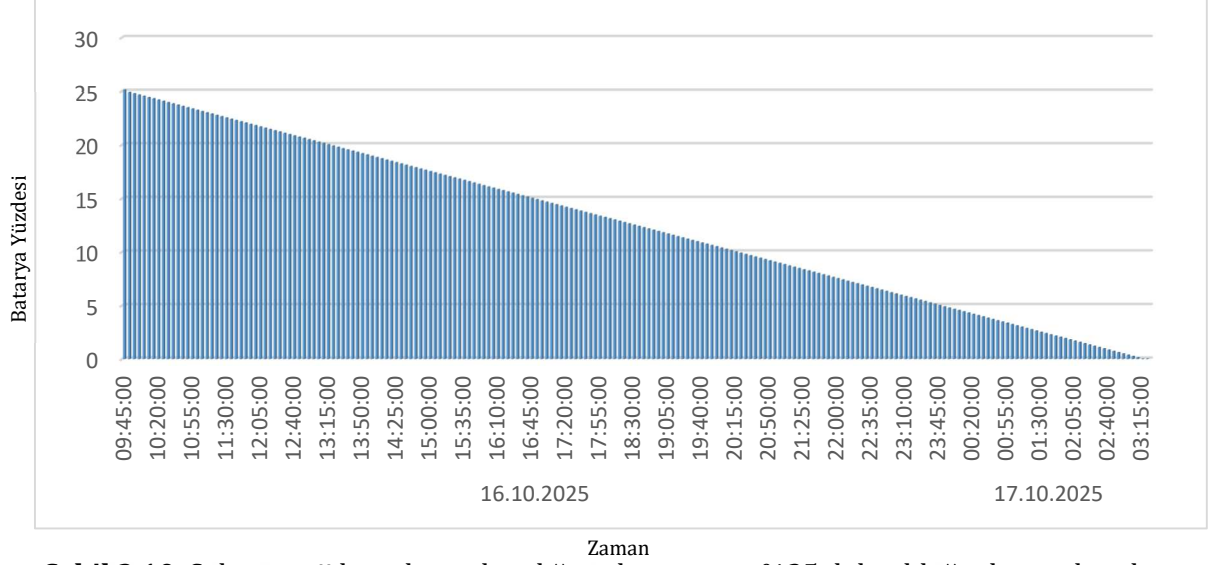
Şekil 3.8. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %75 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Şekil 3.9’da yer alan grafiğe göre batarya %50 doluluk oranına sahip iken sistem enerji hasadı yapmadan mevcut test şartlarında (5 sensör çalışırken) 35,1 saat boyunca çalışmıştır ve kesintisiz olarak veri alınmıştır.



Şekil 3.9. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %50 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Şekil 3.10’da ise batarya kapasitesi %25 seviyesinde iken enerji hasadı yapmadan sistem çalışmaya başlamış ve kesintisiz olarak 17,6 saat boyunca veri takibi mevcut test koşullarında yapılmıştır.



Şekil 3.10. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %25 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Tablo 3.7’de ise özet halinde tasarlanan veri kaydedici sistemin 4 farklı batarya kapasitesi ile enerji hasadı yapmadan kesintisiz olarak ne kadar süre ile çalışabildiği elde edilen test sonuçlarına göre verilmiştir. Tablo 3.6’da bu verilerin 30.09.2025 tarihinde 24 saatlik takibi yer almaktadır. Batarya kapasitesi azaldıkça çalışma süresi beklendiği gibi azalmıştır. Yine de %25 gibi kritik bir seviye ile yaklaşık 0,75 gün çalışabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3.7. Batarya kapasitesine göre sistemin enerji hasadı yapmadan toplam çalışma süresi

Başlangıç Batarya Kapasitesi	Toplam Çalışma Süresi (Gün + Saat)	Toplam Çalışma Süresi (Sadece Saat)
100%	2 gün ve 22,1 saat	70,1 saat
75%	2 gün ve 4,6 saat	52,6 saat
50%	1 gün ve 11,1 saat	35,1 saat
25%	0 gün ve 17,6 saat	17,6 saat

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, IoT tabanlı sensör düğümlerinin en temel kısıtı olan enerji sürekliliği problemine yönelik, çoklu kaynaklı (hibrit) bir enerji hasadı çözümü geliştirilmiş ve performansı deneysel olarak analiz edilmiştir. Tasarlanan sistem, donanım tasarımı, PCB üretimi, gömülü yazılım geliştirme ve saha testleri ile uçtan uca çalışan bir prototip olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ve sistemin genel performansı aşağıda özetlenmiştir:

- Güneş ve RF enerjisinin birlikte kullanılması, sistemin güvenilirliğini artırmıştır. Güneş enerjisi, sistemin ana güç kaynağı olarak yüksek akım gerektiren LoRa iletimi ve sensör okuma işlemlerini beslerken; AEM30940 tabanlı RF enerji hasat birimi, güneşsiz zaman dilimlerinde veya derin uyku modunda bataryanın deşarj akımını kompanse eden kritik bir yardımcı kaynak olarak işlev görmüştür. Özellikle RF modülünün düşük giriş gerilimlerinde dahi "Soğuk Başlama" yeteneği ile sistemi ayağa kaldırabilmesi, tam otonomi hedefine ulaşılmasında belirleyici olmuştur.
- Işınım testlerinde, sistemin 100 W/m^2 gibi düşük aydınlanma koşullarında dahi fotovoltaik panellerden kayda değer bir gerilim üretebildiği ve DC-DC yükseltici katı sayesinde bu enerjiyi depolanabilir 4.2V seviyesine regüle edebildiği görülmüştür. Bu durum, sistemin sadece güneşli günlerde değil, kapalı hava koşullarında da operasyonel kalabileceğini göstermiştir.
- ESP32, LoRa ve SD kart modüllerinin entegre çalışması, veri kaybı riskini ortadan kaldırmıştır. İnternet erişiminin veya LoRa ağ geçidi bağlantısının koptuğu senaryolarda verilerin yerel belleğe (SD Kart) yazılması ve bağlantı sağlandığında senkronize edilmesi, sistemin "Çevrimdışı Öncelikli" yaklaşımıyla kararlı çalıştığını göstermiştir.
- Hazır modüller yerine, endüstriyel komponentler ve empedans uyumu gözetilerek tasarlanan özgün PCB mimarisi; parazitik gürültüleri azaltmış, RF sinyal kalitesini artırmış ve gereksiz güç tüketimini minimize etmiştir.

Sonuç olarak; geliştirilen "RF ve Güneş Enerjisi ile Hibrit IoT Tabanlı Veri Kaydedici", enerji hasadı teknolojilerinin pratik uygulamalara entegrasyonu konusunda başarılı bir örnek teşkil etmektedir. Tasarlanan veri kaydedici, bakım maliyetlerini düşürebilen ve operasyonel ömrü uzatabilen yapısıyla, akıllı tarım, çevre izleme ve yapı sağlığı izleme gibi alanlarda kullanılmaya aday olarak görülebilir.

Tez çalışması süresince elde edilen deneyimler ve test sonuçları ışığında, sistemin performansını daha da ileriye taşıyabilecek ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini artıracak öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Mevcut çalışmada 2.4 GHz bandı (Wi-Fi/BLE) üzerinden RF enerji hasadı gerçekleştirilmiştir. Ancak kentsel ve yarı-kentsel alanlarda GSM (900 MHz / 1800 MHz), LTE ve 5G gibi farklı frekans bantlarında da yoğun bir elektromanyetik enerji

kirliliği bulunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, tek bir frekans bandına odaklanmak yerine, geniş bantlı veya çok bantlı anten tasarımları ve bunlara uygun çok kanallı RF güç yönetim entegreleri kullanılması önerilmektedir. Bu sayede, ortamdaki toplam hasat edilebilir RF güç yoğunluğu artırılabilir.

- Prototipte kullanılan polikristal veya standart monokristal paneller yerine, özellikle düşük ışık verimliliği daha yüksek olan ETFE kaplamalı esnek paneller veya yarı kesim hücre teknolojisine sahip panellerin kullanılması önerilir. Ayrıca, sistemin anlık yüksek akım çekimlerinde voltaj çökmesi yaşamaması için, panel voltajı ve akım kapasitesinin artırılması, daha büyük yüzey alanına sahip panellerin sisteme entegre edilmesi, özellikle kış aylarındaki enerji dengesi için faydalı olacaktır.
- Mevcut tasarımda enerji depolama birimi olarak Lityum-iyon bataryalar kullanılmıştır. Ancak kimyasal bataryaların şarj döngü ömürleri sınırlıdır ve anlık yüksek akım taleplerine) verdikleri tepki yavaştır. Sistemin batarya bloğuna paralel olarak bir süperkapasitör bankası eklenmesi önerilmektedir. Bu hibrit depolama yapısında; süperkapasitörler anlık LoRa iletimleri için gerekli olan yüksek akımı karşılarken, Li-ion bataryalar uzun vadeli enerji rezervini sağlayacaktır. Böylelikle, bataryanın üzerindeki stresi azaltarak sistemin toplam ömrünü yıllar mertebesinde uzatması mümkün olabilir.
- Sistemin otonomi süresini artırmak için mevcut 18650 hücre yapısının, 21700 gibi daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip hücrelerle değiştirilmesi veya paralel bağlı hücre sayısının artırılması (Örn: 1S4P yerine 1S8P) önerilmektedir. Ayrıca, aşırı sıcak ve soğuk dış ortam koşullarında çalışılacaksa, Li-ion yerine daha geniş çalışma sıcaklık aralığına ve güvenliğe sahip LiFePO₄ (Lityum Demir Fosfat) batarya teknolojisine geçiş yapılması sistemin termal kararlılığını artıracaktır.
- İlerleyen aşamalarda, mikrodenetleyici üzerine gömülecek hafif sıklet yapay zeka algoritmaları ile "Akıllı Güç Yönetimi" yapılması önerilmektedir. Sistem, batarya doluluk oranına ve o anki enerji hasat potansiyeline (örneğin hava durumuna) göre veri gönderme sıklığını otonom olarak ayarlayabilir. Enerjinin kritik olduğu durumlarda sadece hayati verileri gönderip, enerjinin bol olduğu durumlarda tüm telemetri verilerini iletmek, sistem verimliliğini optimize edecektir.

Bu tez çalışması kapsamında güneş enerji hasadı ile çalışan IoT tabanlı veri kaydedici sistem ile ilgili elde edilen sonuçlar kullanılarak üretilen çalışma yayın için kabul edilmiştir (Burkuz ve Kapucu, Kabul edildi/Baskıda).

KAYNAKÇA

- Al-Ali, A. R., Zualkernan, I. A., Rashid, M., Gupta, R., & Alikarar, M. (2017). IoT-based energy management system for smart homes. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 6(4), 57–64.
- Ali, A. S., & Ali, Z. H. (2019). Design of a data logger for photovoltaic system performance monitoring based on Arduino. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(2), 1079.
- Alippi, C., Camplani, R., Galperti, C., & Roveri, M. (2011). A lossy compression algorithm for energy-constrained wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(3), 963–971.
- Amorim, M. L. M., Lima, J. G., Torres, N. N. S., Afonso, J. A., Lopes, S. F., Carmo, J. P. P., ... & Ando Junior, O. H. (2024). Open-Source Data Logger System for Real-Time Monitoring and Fault Detection in Bench Testing. *Inventions*, 9(6), 120.
- Bandyopadhyay, S., & Chandrakasan, A. P. (2012). Platform architecture for solar, thermal, and vibration energy combining with MPPT and single inductor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 47(9), 2199–2215.
- Brunelli, C., Benini, L., & Manoli, Y. (2008). A low-power PMU for energy harvesting applications. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1260–1263.
- Brunelli, D., Moser, C., Thiele, L., & Benini, L. (2009). Energy neutral operation of wireless sensor networks: Solar vs. thermal gradients. *IEEE Sensors Journal*, 9(11), 1438–1447.
- Burkaz, U., Kapucu, N. (t.y). Solar Enerji Hasadı ile Çalışan IoT Tabanlı Dış Ortam Veri İzleme Sistemi Tasarımı ve Uygulaması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67.
- Chalasanani, S., & Conrad, J. M. (2008). A survey of energy harvesting sources for embedded systems. *IEEE SoutheastCon*, 442–447.
- Chen, M., Miao, Y., & Hao, Y. (2018). A smart agriculture system based on fog computing and LoRa. *Global Internet of Things Summit (GloTS)*, 1–6.
- Elgendy, M. A., Zahawi, B., & Atkinson, D. J. (2012). Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(1), 21–33.
- Ferdoush, S., & Li, X. (2014). Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Computer Science*, 34, 103–110.
- Frustaci, M., Pace, P., Aloï, G., & Fortino, G. (2018). Evaluating critical security issues of the IoT world: Present and future challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(4), 2483–2495.
- Gamage, K. A. A., et al. (2020). Design and development of a low-cost, high-precision IoT-based data logger for PV monitoring. *Energies*, 13(9), 2374.
- Gaspar, G., Budjac, R., Sedivy, S., Stremy, M., Benka, D., Nemlaha, E., & Elias, R. (2025). Innovative Grouting Process Monitoring: Design and Implementation of a Measurement Device With Datalogger Function. *IEEE Access*, 13, 19340–19352.
- Gorlatova, M., Sarik, J., Grebla, G., Cong, M., Kymissis, I., & Zussman, G. (2015). Movers and shakers: Kinetic energy harvesting for the internet of things. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(8), 1624–1639.
- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. P. (2011). Smart grid technologies: Communication technologies and standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529–539.

- Hou, X., Xu, C., Li, C., Liu, J., Tang, X., Cheng, K., & Guo, M. (2024). Improving Efficiency in Multi-Modal Autonomous Embedded Systems Through Adaptive Gating. *IEEE Transactions on Computers*, 73(1), 1–14.
- Islam, S. M. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2015). The internet of things for health care: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 3, 678–708.
- Kansal, A., Hsu, J., Zahedi, S., & Srivastava, M. B. (2007). Power management in energy harvesting sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 6(4), 32.
- Khan, M. W., Martin, J. E., & Lim, M. (2024). Instrumentation of Low-Cost IoT-Agnostic Data-Capturing Platform With Enhanced Sampling and Bandwidth Capabilities for Subsurface Characterization. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1–11.
- Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A., & Tentzeris, M. M. (2021). Ambient RF energy harvesting technologies for self-sustainable IoT devices. *IEEE Access*, 9, 760–774.
- Kodali, R. K., & Sahu, S. (2016). MQTT based smart agriculture. *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 1–6.
- Li, X., Wang, Y., Hong, D., & Zhang, H. (2011). Maximum power point tracking for photovoltaic system using adaptive neuro-fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(2), 523–535.
- Liu, H., Zhang, Z., Xie, X., & Wu, D. (2018). Hybrid energy harvesting for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(5), 1834–1843.
- Magno, M., Aoudia, F. A., Gautier, M., Berder, O., & Benini, L. (2016). Design, implementation, and performance evaluation of a wireless power meter for IoT applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(11), 2411–2420.
- Motlagh, N. H., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IoT) and the energy sector. *Energies*, 13(2), 494.
- Mukaro, R., & Carelse, X. F. (1999). A microcontroller-based data acquisition system for solar radiation and local weather measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(6), 1232–1238.
- Ntabeni, U., Basutli, B., Alves, H., & Chuma, J. (2024). Device-Level Energy Efficient Strategies in Machine Type Communications: Power, Processing, Sensing, and RF Perspectives. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5, 4801–4823.
- Olgun, U., Chen, C. C., & Volakis, J. L. (2012). Design of an efficient ambient WiFi energy harvesting system. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 6(11), 1200–1206.
- Oliveira, L. M. L., & Rodrigues, J. J. P. C. (2011). Wireless sensor networks: A survey on environmental monitoring. *Journal of Communications*, 6(2), 143–151.
- Popovic, Z., Falkenstein, E. A., Costinett, D., & Zane, R. (2013). Rectennas and arrays for wireless power transmission. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 1–2.
- Raghunathan, S. S., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J., & Srivastava, M. (2005). Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. *Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 457–462.
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873.
- Saraswat, J., et al. (2018). Power gating techniques for low power VLSI circuits: A review. *International Journal of Computer Applications*, 179(25), 1–6.
- Shaikh, F. K., & Zeadally, S. (2016). Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1041–1054.

- Shao, H., Tseng, C. Y., Liu, W., & Chau, L. P. (2013). A novel solar energy harvesting system for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(9), 4160–4168.
- Sharif, G. M., Li, C., & Jensen, T. (2021). Low-power data logger for remote environmental monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 6825–6834.
- Soyata, T., Copeland, L., & Heinzelman, W. (2018). Combating aging in wireless sensor networks via energy harvesting. *IEEE Sensors Journal*, 18(8), 3020–3028.
- Valenta, C. R., & Durgin, G. D. (2014). Harvesting wireless power: Survey of energy-harvesting techniques, RFID, and rectennas. *IEEE Microwave Magazine*, 15(4), 108–120.
- Vigorito, C. M., Ganesan, D., & Barto, A. G. (2007). Adaptive control of duty cycling in energy-harvesting wireless sensor networks. *IEEE Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, 21–30.
- Visconti, P., Primiceri P., Orlando C. (2016). Solar-powered wireless monitoring system of environmental conditions for photobioreactor applications. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 9(3), 1269–1294.
- Vishwakarma, S. K., Upadhyaya, P., Kumari, B., & Mishra, A. K. (2019). Smart energy efficient data logger system. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2092–2101.
- Visser, H. J., & Vullers, R. J. M. (2013). RF energy harvesting and transport for wireless sensor networks: Foundations and outlook. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1410–1423.
- Vullers, R. J. M., van Schaijk, R., Visser, H. J., Penders, J., & Van Hoof, C. (2009). Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics*, 53(7), 684–693.
- Wang, W., Wang, N., Jafer, E., Hayes, M., & O'Flynn, B. (2010). Indoor light energy harvesting for wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–5.
- Weddell, A. S., Magno, M., Merrett, G. V., Benini, L., Al-Hashimi, B. M., & Ros, P. M. (2013). Survey of multi-source energy harvesting systems for wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1267–1281.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32.
- Zanjal, S. V., & Talmale, G. R. (2016). Medicine reminder and monitoring system for secure health using IoT. *Procedia Computer Science*, 78, 471–476.

