

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

UZAK UÇ BİRİM SENSÖR AĞLARINDA
LORA HABERLEŞME DESTEKLİ IOT SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak Suha YÜKSEL

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gökhan ATALI

Haziran 2025

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

UZAK UÇ BİRİM SENSÖR AĞLARINDA
LORA HABERLEŞME DESTEKLİ IOT SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak Suha YÜKSEL

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 12/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Doç. Dr. Gökhan ATALI	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Nur AY GÜL	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SEVİN	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Burak Suha YÜKSEL

12/06/2025

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Gökhan ATALI'ya,

Yüksek lisans eğitimde desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Doç. Dr. Kasım SERBEST, Prof. Dr. Betül USTA ve Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Nur AY GÜL hocalarıma,

Laboratuvar ve araştırma çalışmalarına olanak sağlayan Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Robot Teknolojileri ve Akıllı Sistemler Uygulama Araştırma Merkezi'ne, Yüksek lisans eğitimime vermiş oldukları maddi desteklerden ötürü T3 Vakfı'na,

Hayatım boyunca içerisinde bulunduğum her süreçte desteklerini esirgemeyen kıymetli babam Murat YÜKSEL ve annem Fatma YÜKSEL'e,

Teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR.....	iv
SİMGELER	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Literatür Araştırması	3
1.3. Araştırma Çalışmasının Yenilik ve Katkıları.....	15
1.4. Tezin Organizasyonu.....	16

BÖLÜM 2.

KABLOSUZ HABERLEŞME, IoT VE BULUT TEKNOLOJİLERİ	17
2.1. Bluetooth Teknolojisi	17
2.2. Wi-Fi Teknolojisi	18
2.3. NFC Teknolojisi	18
2.4. ZigBee Protokolü	19
2.5. NB-IoT Teknolojisi	19
2.6. GSM Teknolojisi	20
2.7. LoRa Teknolojisi	20
2.7.1. LoRa modülasyonu çalışma topolojisi	22
2.7.2. LoRa modüllerinde veri güvenliği	26
2.7.3. LoRa modüllerinin avantaj ve dezavantajları	28
2.8. IoT Teknolojisi ve Bulut Sistemleri	30
2.8.1. MQTT protokolü.....	33

BÖLÜM 3.	
SİSTEM TASARIMI.....	35
3.1. LoRa E22-900T22D Modülü	35
3.2. LoRa E22-900T30D Modülü	37
3.3. LoRa E22 Modülleri Parametre Ayarları	38
3.4. Arduino Nano	39
3.5. ESP32 Devkit Modülü	41
3.6. Fixaj 3in1 Nano PCB Shield.....	42
3.7. 5.0dB 900 MHz Anten	43
3.8. HDC 1080 Sıcaklık ve Nem Sensörü.....	44
3.9. DS3231 RTC Modülü	45
3.10. Bağlantı Şemaları	47
3.11. Gömülü Yazılım	48
3.12. Arduino IoT Cloud	49

BÖLÜM 4.	
SİSTEMİN UYGULANMASI	51
4.1. Mesafe Testleri ve Sensör Noktalarının Belirlenmesi.....	51
4.2. Alıcı – Verici Modüllerin Yerleştirilmesi ve Saha Çalışması	52
4.3. Saha Verilerinin Bulut Sistemine Aktarılması.....	54
4.4. Verilerin Yerel Olarak Kaydedilmesi	57
4.5. Verilerin Yorumlanması ve Tahmin Algoritması.....	59

BÖLÜM 5.	
BULGULAR VE SONUÇ.....	64

KAYNAKLAR.....	67
-----------------------	-----------

EKLER.....	72
-------------------	-----------

KISALTMALAR

ABE	: Attribute Based Encryption (Öznitelik Tabanlı Şifreleme)
ABP	: Activation by Personalisation (Kişiselleştirilmiş Etkinleştirme)
ADC	: Analog Digital Converter
AES	: Advanced Encryption Standard (Gelişmiş Şifreleme Standardı)
API	: Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arayüzü)
AppSKey	: Application Session Key (Uygulama Oturumu Anahtarı)
ASK	: Amplitude Shift Keying (Genlik Kaydırmalı Anahtarlama)
AUX	: Auxiliary (Yardımcı/İkincil/Ek)
BLE	: Bluetooth Low Energy (Bluetooth Düşük Enerji)
BPSK	: Binary Phase Shift Keying (İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
BW	: Bandwidth (Bant Genişliği)
CoAP	: Constrained Application Protocol (Kısıtlı Uygulama Protokolü)
CP-ABE	: Ciphertext Policy Attribute Based Encryption (Şifreli Veri Politikası Tabanlı Öznitelik Tabanlı Şifreleme)
CSS	: Chirp Spread Spectrum (Chirp Yayılım Spektrumu)
EIS	: Electrochemical Impedance Spectroscopy (Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi)
FRMPayload	: Frame Payload (Çerçeve Yüğü)
FSK	: Frequency Shift Keying (Frekans Kaydırmalı Anahtarlama)
GCSS	: Group Based Chirp Spread Spectrum (Grup Tabanlı Chirp Yayılım Spektrumu)
GN	: Group Number (Grup Sayısı)
GPRS	: General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Servisi)
GSM	: Global System for Mobile Communications (Küresel Mobil Haberleşme Sistemi)
GSM	: Global System for Mobile Communications (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem)
I ² C	: Inter-Integrated Circuit (Entegreler Arası İletişim Protokolü)

IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IIoT	: Industrial Internet of Things (Endüstriyel Nesnelerin İnterneti)
IoT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IP	: Internet Protocol (İnternet Protokolü)
ISM	: Industrial Scientific Medical (Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
KP-ABE	: Key-Policy Attribute-Based Encryption (Anahtar Politikası Tabanlı Öznitelik Tabanlı Şifreleme)
LBT	: Listen Before Talk (Konuşmadan Önce Dinle)
LED	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LoRa	: Long Range (Uzun Mesafe)
LoRaWAN	: Long Range Wide Area Network (Uzun Menzilli Geniş Alan Ağı)
LPWAN	: Low Power Wide Area Network (Düşük Güçlü Geniş Alan Ağı)
LRU	: Least Recently Used (Sayfa Yer Değiştirme Algoritması)
LTE	: Long Term Evolution (Uzun Süreli Evrim)
MCU	: Microcontroller Unit (Mikrodenetleyici Birimi)
MHz	: Megahertz
microSD	: Micro Secure Digital (Mikro Güvenli Dijital Bellek Kartı)
MQTT	: Message Queuing Telemetry Transport (Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşıma Protokolü)
NB-IoT	: Narrowband Internet of Things (Dar Bant Nesnelerin İnterneti)
NFC	: Near Field Communication (Yakın Alan İletişimi)
NwkSKey	: Network Session Key (Ağ Oturum Anahtarı)
OTAA	: Over The Radio Activation (Havadan Aktivasyon)
PMV	: Predicted Mean Vote (Tahmin Edilen Ortalama Oy)
PPD	: Predicted Percentage of Dissatisfied (Tahmin Edilen Memnuniyetsiz Yüzdesi)
PPM	: Parts Per Million (Milyonda Birim)
PSK	: Phase Shift Keying (Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
QoS	: Quality of Service (Hizmet Kalitesi)
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying (Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
RESTful API	: Representational State Transfer Application Programming Interface (Temsili Durum Transferi Tabanlı Uygulama Programlama Arayüzü)

RF	: Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RH	: Bağıl Nem
RTC	: Real Time Clock (Gerçek Zamanlı Saat)
SF	: Spreading Factor (Yayıma Faktörü)
SF	: Spreading Factor (Yayıma Faktörü)
SMA	: SubMiniature version A (Alt Minyatür Tip A Konnektör)
SNR	: Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SOAP	: Simple Object Acces Protocol (Basit Nesne Erişim Protokolü)
SPI	: Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arabirim)
SSL	: Secure Sockets Layer (Güvenli Soket Katmanı)
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protocol (İletim Denetim Protokolü / İnternet Protokolü)
TLS	: Transport Layer Security (Taşıma Katmanı Güvenliği)
TTN	: The Things Network (Şeyler Ağı)
UHF	: Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)
USB	: Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veriyolu)
WAVMCM	: Workload Aware Virtual Machine Consolidation Method (Yük Farkındalıklı Sanal Makine Yoğunlaştırma Yöntemi)
WiFi	: Wireless Fidelity (Kablosuz Doğruluk)
WOR	: Wake On Radio (Radyo Tetiklemeli Uyanma)
WSN	: Wireless Sensor Network (Kablosuz Sensör Ağları)

SİMGELER

W	: Watt (Güç)
Hz	: Hertz
GHz	: Gigahertz
Kbps	: Kilobit per second
dB	: Desibel
$c[k]$: k örnekleme anında üretilen chirp sinyali
k	: Örnekleme zaman indisi
j	: Sanal birim
π	: Pi sayısı
e	: Euler sayısı
A	: Genlik
f	: Frekans
μA	: Mikroamper
V	: Volt

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1: Bluetooth teknolojileri karşılaştırılması [33].	18
Tablo 2.2: ASK, FSK ve PSK yöntemlerinin karşılaştırılması	26
Tablo 2.3: LoRa modülasyonu çipleri teknik özellik karşılaştırma tablosu [49].	29
Tablo 2.4: LoRa modülleri teknik özellikler karşılaştırma tablosu.....	30
Tablo 2.5: Kablosuz haberleşme teknolojileri karşılaştırma tablosu [35].....	30
Tablo 3.1: LoRa E22-900T22D teknik özellikler tablosu [55].	36
Tablo 3.2: LoRa E22-900T30D teknik özellikler tablosu [56].	38
Tablo 3.3: Arduino Nano kartı teknik özellikleri [57].....	40
Tablo 3.4: ESP32- WROOM32 teknik özellikler tablosu [58].	41
Tablo 3.5: Fixaj 3in1 Nano PCB Shield kartı teknik özellikleri [59].....	43
Tablo 3.6: Antene ait teknik özellikler tablosu [60].....	44
Tablo 3.7: HDC 1080 sıcaklık ve nem sensörü teknik özellikler tablosu [61].	45
Tablo 3.8: DS3231 RTC modülü teknik özellikler tablosu [62].	46
Tablo 3.9: Verici modül sözde kod dizini.....	48
Tablo 3.10: Alıcı modül sözde kod dizini.	49
Tablo 3.11: Arduino IoT Cloud servisi özellik tablosu.	50
Tablo 4.1: Gelen verileri lokal olarak kaydeden programın kaynak kodları.....	57
Tablo 4.2: Lokal olarak kaydedilen veri kesiti tablosu.	58
Tablo 4.3: Sensör noktaları için sunulan tahmin algoritması veri çıktısı tablosu.	61
Tablo 5.1: Sistem kurgusu karşılaştırma tablosu.....	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: LoRaWAN yıldız topolojisi [11].....	5
Şekil 1.2: Erkan ve arkadaşlarının geliştirdikleri sistemin çalışma diyagramı [13]	7
Şekil 1.3: Koçak tarafından geliştirilen sistemin arayüzü [17].....	9
Şekil 1.4: Çalışmadaki sensör düğüm yapısı [29].....	13
Şekil 1.5: Sun ve arkadaşlarının çalışmada kullandıkları mimari şeması [31]	15
Şekil 2.1: LoRa modülasyonu sınıflandırılması [40].	21
Şekil 2.2: LoRa ağ mimarisi [43].	23
Şekil 2.3: Uçtan uca güvenlik anahtarları diyagramı [46].	27
Şekil 2.4: LoRa ağları için temsili veri şifreleme diyagramı.	28
Şekil 2.5: IoT bulut mimarisinde katmanların ifade edilmesi [50].	31
Şekil 2.6: Çalışmada belirtilen sistemin ağ mimarisi [50].	32
Şekil 2.7: MQTT için önerilen güvenlik mimarisi şeması [53].	34
Şekil 3.1: LoRa E22-900T22D modülü	35
Şekil 3.2: LoRa E22-900T30D modülü	37
Şekil 3.3: RF-Setting programı arayüzü.	39
Şekil 3.4: Arduino Nano kartı	40
Şekil 3.5: ESP32-WROOM32 modülü	41
Şekil 3.6: Fixaj 3in1 Nano PCB Shield kartı	42
Şekil 3.7: 5.0dB 900 MHz anten.	43
Şekil 3.8: HDC 1080 sıcaklık ve nem sensörü.....	44
Şekil 3.9: DS3231 RTC modülü.	46
Şekil 3.10: Verici sensör noktası bağlantı şeması.	47
Şekil 3.11: Alıcı noktası bağlantı şeması.	47
Şekil 4.1: LoRa modülleri menzül test görüntüsü.	51
Şekil 4.2: Çalışmada verici modüllerin yerleştirileceği konumlar.	52
Şekil 4.3: B ve C noktalarına yerleştirilen verici modül devresi.	53
Şekil 4.4: D ve E noktalarına yerleştirilen verici modül devresi.	53
Şekil 4.5: Alıcı modül devresi.	54
Şekil 4.6: Bulut sisteminin gösterge paneli arayüzü görseli.	56
Şekil 4.7: Bir sensör noktası için tahmini ve önerilen sıcaklık grafiği çıktısı.....	62
Şekil 4.8: Bir sensör noktası için tahmini ve önerilen nem grafiği çıktısı.	63
Şekil A.1: LoRa Verici Kodu	72
Şekil B.1: LoRa Alıcı Kodu	75
Şekil C.1: Veri Yorum Algoritması Kodları	78

UZAK UÇ BİRİM SENSÖR AĞLARINDA LORA HABERLEŞME DESTEKLİ IOT SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, farklı fiziksel noktalarda konumlandırılmış iç mekânlardan belirlenen verilerin (sıcaklık ve nem) toplanması, bu verilerin merkezi bir sistemde şifreli olarak güvenli ve düşük enerji tüketimiyle iletimi ve merkezdeki verilerin lokalde ve bulut verilerin lokalde elde edilen çıktılardan yola çıkılarak ISO 7730 standardına uygun termal konfor önerileri sunabilen çok katmanlı bir karar destek sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda düşük güçlü, uzun menzilli ve açık alanlarda yüksek iletişim kapasitesine sahip LoRa (Long Range) kablosuz iletişim teknolojisi kullanılarak, iç mekânlardan çevresel verilerin güvenli, kesintisiz ve enerji verimli bir şekilde toplanması sağlanmıştır. Sistem; sensör ve mikrodenetleyicilerden oluşan donanım yapısı, LoRa tabanlı haberleşme protokolü, bulut ortamında veri yönetimi, Python tabanlı analiz ve tahmin algoritmaları, dış ortam verisi entegrasyonu ve termal konfor hesaplamalarından oluşan çok katmanlı ve bütünleşik bir yapıda tasarlanmıştır.

Uygulama sürecinde, dört farklı iç mekâna yerleştirilen sıcaklık ve nem sensörlerinden elde edilen veriler, her biri LoRa modülleri ile donatılmış Arduino Nano mikrodenetleyicileri tarafından belirli zaman aralıklarıyla okunmuş ve şifreli olarak merkezi bir alıcı birime iletilmiştir. Bu alıcı birim, ESP32 geliştirme kartı aracılığıyla LoRa verilerini Arduino IoT Cloud platformuna gerçek zamanlı olarak aktarmıştır. Bulut platformunda görselleştirilen bu veriler, düzenli aralıklarla dışa aktarılmış ve analiz amacıyla Python ortamına entegre edilmiştir. Analiz sürecinde pandas, numpy, scikit-learn, matplotlib gibi açık kaynaklı kütüphaneler kullanılmış; her bir konum için ayrı ayrı Lineer Regresyon modelleri eğitilerek sıcaklık ve nem değerlerinin bir haftalık tahminleri yapılmıştır.

Tahminlerin doğruluğunu artırmak amacıyla, temin edilen dış ortam sıcaklık ve nem verileri modele entegre edilmiştir. İç ortam koşulları, bu dış verilerle ilişkilendirilerek dinamik olarak değerlendirilmiş ve ISO 7730 standardının önerdiği konfor aralıkları çerçevesinde, her bir iç mekân noktası için özelleştirilmiş öneriler üretilmiştir. Sistem, yalnızca mevcut koşulları izleyen bir yapıdan öteye geçerek geleceğe dönük tahmin yapabilme ve kullanıcıya konfor odaklı karar destek sağlayabilme yeteneği ile öne çıkmaktadır. Ayrıca çalışmada kurgulanan sistemin iletişim teknolojisi diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında sağladığı avantajlar ile bu çalışmanın, özellikle akıllı binalar, kampüsler ve endüstriyel alanlar gibi geniş ölçekli ortamlarda yaygın olarak uygulanabilir bir model sunduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LoRa, IoT, Kablosuz Sensör Ağı, Şifreli RF Haberleşme, Gömülü Sistem Yazılım Geliştirme

DESIGN OF LORA COMMUNICATION SUPPORTED IOT SYSTEM IN REMOTE END SENSOR NETWORKS

ABSTRACT

In this thesis study, a multi-layered decision support system has been developed with the aim of collecting temperature and humidity data from indoor environments located at various physical points, processing these data within a centralized system, and providing thermal comfort recommendations in accordance with the ISO 7730 standard. In this context, environmental data from indoor spaces were collected in a secure, uninterrupted, and energy-efficient manner using LoRa wireless communication technology, which is characterized by low power consumption, long-range transmission, and high communication capacity in open areas. The system was designed with a multi-layered and integrated architecture consisting of a hardware layer composed of sensors and microcontrollers, a LoRa-based communication protocol, cloud-based data management, Python-based analytical and forecasting algorithms, external weather data integration, and thermal comfort evaluation mechanisms.

During the implementation phase, temperature and humidity data obtained from sensors installed in four different indoor locations were periodically read by Arduino Nano microcontrollers equipped with LoRa modules and securely transmitted to a centralized receiver unit. This receiver unit, through an ESP32 development board, parsed the LoRa data and transferred them in real-time to the Arduino IoT Cloud platform. The data visualized on the cloud platform were periodically exported in .xlsx format and imported into the Python environment for further analysis. During the analytical process, open-source libraries such as pandas, numpy, scikit-learn, and matplotlib were utilized, and separate Linear Regression models were trained for each location to forecast one-week temperature and humidity trends.

To enhance the accuracy of predictions, external ambient temperature and humidity values were incorporated into the model. Indoor environmental conditions were dynamically evaluated in relation to these external variables, and customized thermal comfort recommendations were generated for each monitored location in accordance with the comfort ranges defined by the ISO 7730 standard. The developed system not only monitors existing environmental conditions but also possesses the capability to produce future-oriented predictions and provide comfort-focused decision support to users. Furthermore, due to its low-cost hardware infrastructure, scalable system architecture, and energy efficiency, the proposed system is considered a viable and applicable model, particularly for smart buildings, campus facilities, and industrial environments at a larger scale.

Keywords: LoRa, IoT, Wireless Sensor Network, Encrypted RF Communication, Embedded Systems Software Development

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek bir ivmeyle gelişmekte olan teknolojinin etkisi, endüstriyel otomasyon, akıllı şehirler, tarım, sağlık, üretim, hizmet ve birçok sektörde köklü bir dönüşüm yaratmıştır. Bu dönüşümün temel yapı taşlarından biri olan IoT (Internet of Things – Nesnelerin İnterneti), fiziksel nesnelerin birbirleriyle ve merkezi sistemlerle internet üzerinden bağlantı kurarak veri alışverişi yapmasını mümkün kılan bir kavram olarak öne çıkmaktadır.

IoT kavramı, fiziksel dünyanın dijital ortama entegre edilmesini sağlayarak; gerçek zamanlı izleme, otomatik kontrol, büyük veri analizi ve karar destek sistemlerinin uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Böylece, sistemlerin yalnızca reaktif değil, proaktif biçimde çalışmasını mümkün kılan yeni nesil mühendislik çözümleri gelişmektedir [1].

IoT sistemlerinin temelinde, belirli fiziksel büyüklükleri ölçen sensör bileşenleri ve bu sensörlerden gelen verilerin merkezi ya da dağıtık yapılara iletimini sağlayan haberleşme altyapıları yer almaktadır.

Bu altyapılar kablolu iletişimle gerçekleştirilebildiği gibi WSN (Wireless Sensor Network - Kablosuz Sensör Ağları), Bluetooth, LTE (Long Term Evolution - Uzun Süreli Evrim), ve benzeri kablosuz teknolojilerle de sağlanabilmektedir [2].

Bu noktada, özellikle geniş alanlara yayılmış kampüsler, çok binalı fabrika sahaları ve açık hava tesisleri gibi ortamlarda, kablosuz haberleşme çözümleri kaçınılmaz hâle gelmektedir. Kablolu sistemlerin maliyet, kurulum zorluğu ve esneklik eksikliği gibi dezavantajları dikkate alındığında, LPWAN (Low Power Wide Area Network - Düşük Güçlü Geniş Alan Ağı) teknolojileri, IoT altyapılarının en uygun alternatiflerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, LoRa (Long Range) teknolojisi; düşük enerji tüketimi, uzun menzil, düşük veri hızı gereksinimi ve yüksek sinyal dayanıklılığı ile ön plana çıkan, lisanssız ISM (Industrial Scientific Medical – Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi) frekans bandında çalışan bir kablosuz haberleşme protokolüdür [3].

Günümüz teknolojisinin öne çıkan unsurlarından biri olan yapay zekâ, IoT sistemleriyle entegre edilerek veri analizi ve öngörü süreçlerinin etkinliğini artırmakta, sistemlerin otonom davranış kabiliyetini güçlendirmektedir [4].

Bu entegrasyon sayesinde, geçmiş verilerden öğrenen algoritmalar geliştirilerek, yalnızca mevcut durumun analizi değil, aynı zamanda gelecekteki koşulların tahmini de mümkün hâle gelmektedir. Özellikle iklimlendirme gibi çevresel kontrol sistemlerinde bu tür yaklaşımlar hem kullanıcı konforunu artırmakta hem de enerji kullanımını optimize ederek sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sunmaktadır.

Bulut bilişim teknolojileri ise, dağıtık sistemlerde veri saklama, işleme ve erişim süreçlerini merkezi bir yapıda yürüterek yüksek esneklik ve ölçeklenebilirlik sunmaktadır. IoT tabanlı sistemlerin ürettiği büyük hacimli verilerin işlenmesi, saklanması ve analiz edilmesi açısından bulut platformları, fiziksel cihazların sınırlı işlem gücünü ve depolama kapasitesini aşan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, sensör düğümlerinden merkezi alıcıya iletilen çevresel veriler, burada ön işlemden geçirilerek internet üzerinden bulut ortamına aktarılmaktadır. Bulut sistemi, verilerin merkezi bir sunucuda depolanmasının ötesinde; kullanıcıya gerçek zamanlı izleme, grafiksel analiz, geçmişe dönük sorgulama ve algoritmik işlem imkânı tanımaktadır. Ayrıca bulut üzerinden uzaktan erişim sağlanarak, sistem yöneticileri ya da karar vericiler coğrafi bağımsızlıkla veriye ulaşabilmekte ve analiz sonuçlarına göre gerekli aksiyonları alabilmektedir. Bu yapı hem sistem sürdürülebilirliğini hem de kullanıcı deneyimini artırmakta, IoT tabanlı çözümlerin kurumsal düzeyde uygulanabilirliğini güçlendirmektedir [5].

LoRa tabanlı dağıtık IoT sensör ağlarının kurumsal ölçekli ortamlarda çevresel veri toplama, bulut platformları üzerinden analiz ve karar önerme süreçlerine entegre edilmesi, mühendislik açısından çok boyutlu bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada da, sıcaklık ve nem verilerini izleyerek, bu veriler üzerinden ofis konforuna yönelik akıllı analizler gerçekleştiren, düşük maliyetli, ölçeklenebilir, güvenli ve enerji verimli bir sistemin tasarım ve uygulamasını ortaya koyulması bağlamında gerçekleştirilmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı; geniş fiziksel alanlara yayılmış çok noktalı yapılarda çevresel verilerin (sıcaklık ve bağıl nem) düşük enerji tüketimiyle toplanabilmesi, bu verilerin

güvenilir şekilde iletilebilmesi, merkezi bir platformda depolanarak işlenebilmesi ve son olarak karar destek mekanizmaları aracılığıyla ofis içi konfor koşullarına yönelik öneriler sunabilen bütünleşik bir sistemin tasarlanması, geliştirilmesi ve uygulanmasıdır.

Bu bağlamda çalışma, üç temel mühendislik problemi üzerine odaklanmaktadır. İlk madde enerji verimli uzun menzilli ve güvenli kablosuz haberleşme altyapısının kurulması, ikinci madde gerçek zamanlı ve merkezi veri yönetiminin sağlanması ve üçüncü madde toplanan veriler üzerinden anlamlı sonuçlar üretebilecek bir tahmin modelinin geliştirilmesidir. Geliştirilen sistemin, bir kampüs yerleşkesi ya da sanayi tesisi gibi farklı binalardan oluşan ortamlarda çevresel izleme faaliyetlerine hizmet etmesi, ISO 7730 gibi standartlara uygun şekilde termal konfor düzeylerinin analiz edilmesi ve gelecek günler için öneri niteliğinde sıcaklık ve nem değerlerinin öngörülmesi hedeflenmektedir.

Bu amaç doğrultusunda, dört farklı fiziksel noktaya yerleştirilen sıcaklık ve nem sensörlerinden elde edilen veriler, LoRa protokolü kullanılarak merkezi bir alıcı modüle şifrelenerek iletilmekte, buradan bulut tabanlı bir platforma aktarılmakta ve son aşamada tahmin algoritması ile analiz edilmektedir. Geliştirilen sistemin; düşük maliyetli, enerji verimli, ölçeklenebilir, uzaktan erişilebilir ve veri odaklı karar destek sağlayan bir yapı ortaya koyması hedeflenmektedir.

1.2. Literatür Araştırması

Pagano ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmalarında LoRa ve LoRaWAN teknolojilerinin akıllı tarım uygulamalarındaki eğilimlerini ve gelecekteki potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, tarımın günümüzde artan nüfus, iklim değişikliği, sınırlı doğal kaynaklar ve azalan ekilebilir arazi gibi sorunlarla karşı karşıya olduğunu vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, akıllı tarıma geçişin, bilgi ve iletişim teknolojileri ile desteklenmiş üretim süreçleri sayesinde mümkün olabileceğini ileri sürmektedirler [6] [7] [8].

Çalışmanın temel odağı, LoRa tabanlı sistemlerin sulama, bitki ve ürün izleme, ağaç sağlığı takibi ve hayvancılık gibi dört ana akıllı tarım uygulamasındaki rolleridir. Bu sistemler, düşük enerji tüketimi, uzun menzil, düşük maliyet ve lisanssız frekans kullanımı gibi avantajlar sunmaktadır. Böylelikle kırsal alanlarda internet erişimi sınırlı yerlerde etkili çözümler üretilebilmektedir [8].

Sulama sistemleri özelinde, LoRa tabanlı uygulamaların geleneksel yöntemlere kıyasla %90'a kadar su tasarrufu sağlayabildiği ve enerji maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğü aktarılmaktadır [9].

Yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarının, çevresel sensörlerden elde edilen verilerle sulama süreçlerini daha hassas ve otomatik hâle getirdiği belirtilmektedir. Örneğin, bazı çalışmalarda rastgele orman sınıflandırıcıları ve doğrusal regresyon modelleri kullanılarak toprak nemi tahmin edilmekte ve sulama buna göre planlanmaktadır [8].

Bitki ve ürün izleme alanında ise LoRa, farklı sensörlerin (toprak pH, nem, sıcaklık, ışık vb.) entegre edilmesine olanak sağlayarak pestisit ve gübre kullanımını optimize etmektedir. Geliştirilen üç farklı düğümle yapılan çalışmada, toprak ve hava parametrelerinin ölçümü gerçekleştirilmiş ve bu veriler Thingspeak gibi platformlarda görselleştirilmiştir.

Ağaç izleme sistemleri, özellikle gövde içi su taşınımı (sap akışı), biyolojik stres düzeyi ve fiziksel eğilme gibi verilerin ölçümünde kullanılmaktadır. Örneğin TreeTalker sistemi, LoRa ile bütünleşmiş biçimde ağaçlarda sap akışı, gövde büyümesi, hareketler ve mikroklima verilerini toplayarak, bu bilgileri uzak bir sunucuya iletmektedir. Ayrıca, EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy - Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi) yöntemi ile hastalıklı ve stres altındaki ağaçların tanınması da mümkün kılınmaktadır [10].

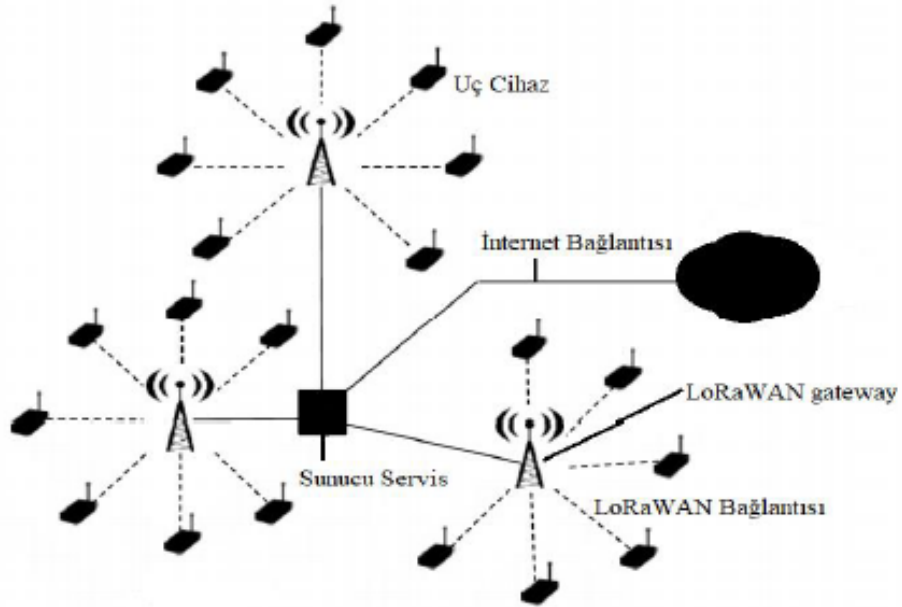
Hayvancılık izleme sistemlerinde ise, LoRa teknolojisi giyilebilir sensörlerle entegre edilerek hayvanların sağlık durumu, hareketliliği ve konum bilgileri vb. veriler izlenmektedir. Büyük sürülerde, veri iletiminde çakışmaları azaltmak amacıyla dinlemeden önce konuş mekanizması gibi gelişmiş protokoller önerilmiştir. Ayrıca, New Mexico çöllerinde binlerce hektarlık alanlarda kullanılan LoRaWAN çözümleri, cep telefonu şebekelerinin kapsama sağlayamadığı alanlarda hayvan izlemeyi mümkün kılmıştır [8].

Çalışma sonucunda ise, araştırmacılar LoRa teknolojisinin güçlü yönlerinin yanı sıra, mevcutta çözülmesi gereken önemli zorlukları da vurgulamaktadır. Bu zorluklar bağlantı gecikmeleri, enerji yönetimi, cihaz heterojenliği, veri bütünlüğü ve sistem ölçeklenebilirliğidir. Belirtilen sorunlara çözüm önerisi olarak kenar bilişim, yapay

zekâ ve çoklu geçit mimarileri gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu önerilmektedir [8].

Tırfarılıgil gerçekleştirdiği yüksek lisans tezi çalışmasında, düşük maliyetli ve enerji verimli bir LoRaWAN tabanlı kablosuz haberleşme sistemi tasarlayarak, tarımsal sulama uygulamaları için uygulanabilirliği değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen sistem, LoRaWAN protokolüne dayalı olarak hem donanımsal hem de yazılımsal bileşenleri içeren modüler bir test platformu olarak yapılandırılmıştır. Bu sistemde, LoRa teknolojisinin uzun menzil ve düşük bant genişliği avantajları, akıllı tarım ihtiyaçlarına göre yeniden şekillendirilmiş; ağ geçidi, uç cihazlar, sensörler ve bulut tabanlı platformlar arasında veri alışverişi gerçekleştirilmiştir.

LoRaWAN mimarisi, yıldız topolojisinde yapılandırılmış ve ABP (Activation by Personalisation - Kişiselleştirilmiş Etkinleştirme) ile haberleşme sağlanmıştır. Ağ geçidi, Bitlis-Tatvan ve Ahlat ilçeleri arasında dış mekâna yerleştirilmiş, dört farklı noktada test cihazları ile veri alışverişi gerçekleştirilmiştir. Node cihazlarından gelen veriler, yayılma faktörlerine (Spreading Factor - SF) bağlı olarak farklı iletim hızlarında ve sinyal güçlerinde gönderilmiştir ve analiz edilmiştir.



Şekil 1.1: LoRaWAN yıldız topolojisi [11]

Elde edilen sonuçlara göre, SF değeri arttıkça iletim mesafesinin arttığı, ancak veri hızının azaldığı ve enerji tüketiminin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yayılma

faktörü arttıkça alıcı hassasiyetinin arttığını ve sinyalin uzak mesafelere daha başarılı bir şekilde iletilebildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, pil ömrü analizleri, SF12 gibi yüksek yayılma faktörlerinde cihazların daha fazla enerji tükettiğini göstermiştir. Bu bağlamda, enerji verimliliği ile iletişim menzili arasında bir denge kurulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır ve LoRaWAN mimarisinin sağladığı avantajlar sayesinde, özellikle kırsal alanlarda geleneksel sulama sistemlerinin dijitalleştirilmesi mümkün hale gelmiş ve gelecekteki akıllı tarım uygulamaları için güçlü bir altyapı sunulmuştur [11].

Erkan ve arkadaşları ise, futbol sahalarının aydınlatma sistemlerinde karşılaşılan kablolu zorluklarını ve maliyetlerini ortadan kaldırmaya yönelik olarak, LoRa modülasyon tekniğine dayalı bir kablosuz haberleşme sistemi tasarlamış ve geliştirmiştir.

Çalışmada önerilen sistemin temel amacı, futbol sahalarında kullanılan LED (Light Emitting Diode – Işık Yayan Diyot) projektör sürücülerinin ışık seviyelerinin uzaktan ve kablosuz olarak kontrol edilmesini sağlamaktır. Bu bağlamda, LoRa protokolü kullanılarak LED projektör kontrol kartları ve merkezi kontrol birimi geliştirilmiş, veri paketleri 433 MHz frekansında iletilmiştir.

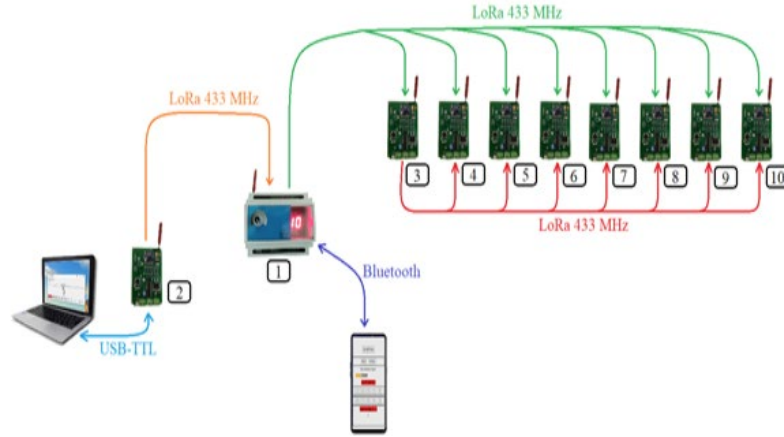
LoRa teknolojisi, CSS (Chirp Spread Spectrum – Chirp Yayılım Spektrumu) modülasyon yöntemi sayesinde düşük bant genişliğinde bile uzun mesafelerde güvenilir veri iletimi sağlamaktadır [12]. Sistemde kullanılan mimari, ağ geçitleri ve uç düğümler arasında yıldız topolojisiyle yapılandırılmış olup, ağ geçitleri RF (Radio Frequency – Radyo Frekansı) sinyallerini merkez sunuculara iletmektedir.

Geliştirilen kontrol sisteminde, ana kontrol ünitesi ile projektör sürücüsü arasındaki haberleşme, mini antenli alıcı-verici modüller aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sinyal zayıflamasına bağlı olarak oluşan iletim problemleri, araya yerleştirilen sinyal tekrarlayıcı cihazlarla çözüme ulaştırılmıştır.

Çalışmada ayrıca, mevcut kablolu sistem ile önerilen kablosuz sistemin maliyet karşılaştırması yapılmıştır ve LoRa tabanlı sistemde bu maliyetin yaklaşık %43 oranında daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışma sonucunda, önerilen sistemin kurulum kolaylığı, düşük enerji tüketimi, uzaktan erişim desteği ve elektromanyetik parazitlerden etkilenmeme gibi avantajlar sunduğu gösterilmiştir. Ayrıca sistem, Diyarbakır'daki bir futbol tesisinde 8 ay

boyunca aralıksız ve sorunsuz bir şekilde çalıştırılmış, böylelikle pratikte uygulanabilirliği test edilmiştir [13].



Şekil 1.2: Erkan ve arkadaşlarının geliştirdikleri sistemin çalışma diyagramı [13]

Akıllı şehirler kapsamında gerçekleştirdikleri LoRa kablosuz haberleşme prensibi temelli çalışmalarında Tankut ve arkadaşları, geleneksel sayaç okuma yöntemlerinin artan kentleşme ve abone yoğunluğu karşısında yetersiz kaldığını belirterek, LoRa altyapısı kullanılarak bir uzaktan sayaç okuma sistemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında geliştirilen sistem, çift yönlü iletişim kurabilen, düşük güç tüketimli ve uzun menzilli bir altyapı sunarak, sayaç verilerinin uzaktan okunmasını ve çeşitli komutların su sayaçlarına gönderilmesini mümkün kılmaktadır.

Araştırmacılar, klasik yöntemlerle sayaç okumanın fiziksel erişim gerektirdiğini, kablolu protokollerin ise altyapı karmaşıklığı ve cihaz sınırları nedeniyle yaygın kullanıma uygun olmadığını vurgulamaktadırlar.

Sistem, EU868 MHz bandında çalışmakta olup, üç ana kanal (868.1, 868.3, 868.5 MHz) ve beş yan kanal (867.1–867.9 MHz) üzerinden toplam sekiz frekansta eşzamanlı veri iletimine olanak tanımaktadır. Aynı anda altı farklı veri hızında çalışabilen sistem, coğrafi koşullara bağlı olarak teoride 10 km, pratikte ise 4–5 km menzile ulaşabilmektedir.

Çalışmada kullanılan sayaçlar sunucuya ABP yöntemiyle tanıtılmaktadır. Bu yöntemde, AES (Advanced Encryption Standard – Gelişmiş Şifreleme Standardı) anahtarları kullanılarak güvenli ağ ve uygulama oturum anahtarları oluşturulmakta; alternatif olarak manuel anahtar girişine de izin verilmektedir. Kayıt işlemleri sonrası,

sayaçlardan gelen tüm veriler sunucu arayüzü üzerinden izlenebilirken, sunucudan da çeşitli iş emirleri gönderilebilmektedir. Bu emirler, gateway üzerinden parametrik veri paketleri şeklinde iletilmekte ve sayaç tarafından işlenmektedir. Bu yapının, haberleşme süresini kısaltmakta olduğu ve enerji tüketimini azaltmakta olduğu saptanmıştır.

Özellikle parametrik komutların kullanımı sayesinde sayaçlar daha kısa süre "uyanık" kalabilmekte ve uzun batarya ömrüne sahip olabilmektedirler. Aynı zamanda, bir pakette birden fazla iş emri gönderilerek hem işlem sayısı artırılmakta hem de gateway başına daha fazla cihaz bağlanmasına imkân sağlanmaktadır. Bu da gateway maliyetlerini azaltan bir avantaj olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmanın sonucunda, LoRa teknolojisinin akıllı su sayaçlarında kullanımının yalnızca veri toplama değil, uzaktan kontrol, güvenli iletişim ve enerji verimliliği açısından da büyük faydalar sağladığını belirtilmiştir. Geliştirilen sistem, sürdürülebilir, düşük maliyetli ve genişletilebilir bir çözüm olarak, belediye altyapıları ve akıllı şehir uygulamaları için önemli bir örnek teşkil etmektedir [14].

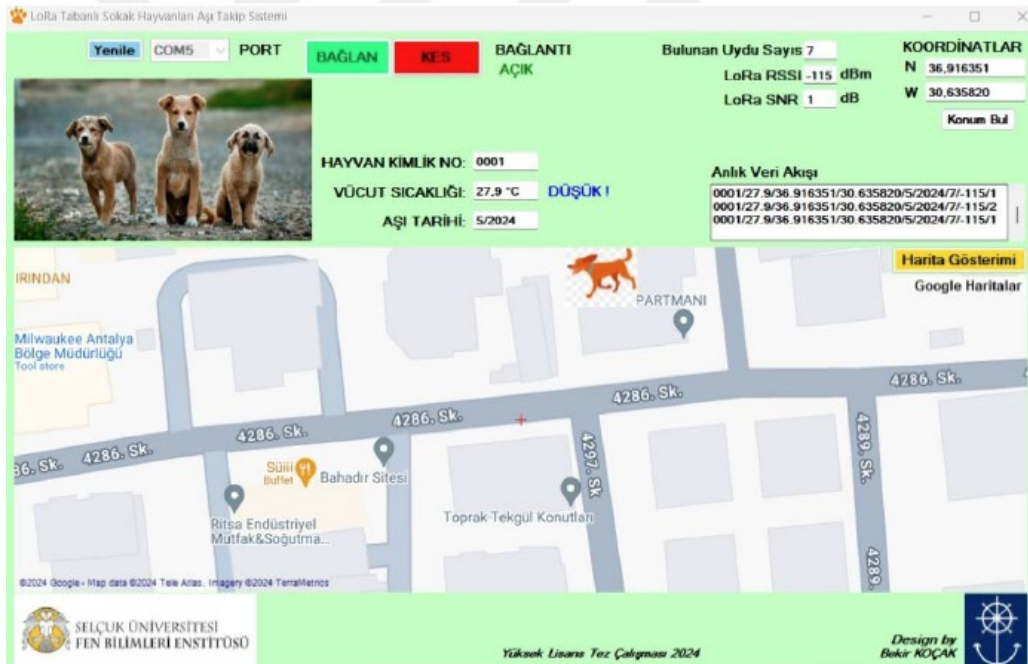
Koçak tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezi çalışmasında, sahipsiz sokak hayvanlarının konum ve sağlık bilgilerinin uzaktan takibini sağlayacak bir sistem geliştirilmiş ve bu sistemin haberleşme altyapısı olarak LoRa teknolojisi tercih edilmiştir.

Çalışmada öncelikle LoRa teknolojisinin teknik altyapısı ve avantajları kapsamlı biçimde açıklanmıştır. LoRa, düşük bant genişliğinde uzun menzilli haberleşmeyi mümkün kılan CSS modülasyon tekniğini kullanmaktadır. Bu modülasyon yapısı sayesinde LoRa, düşük güçlü sinyalleri bile uzak mesafelere iletebilmekte, bu da özellikle açık alan uygulamaları için önemli bir avantaj sağlamaktadır [15].

Geliştirilen sistemin donanım altyapısı, iki ana modülden oluşmaktadır: hayvanlara takılan verici tasma modülü ve merkezde bulunan alıcı birim. Verici modülde SX1278 LoRa modülü, Atmega328P mikrodenetleyici, DS18B20 sıcaklık sensörü ve NEO 7M GPS modülü kullanılmıştır. Bu yapı sayesinde her hayvana ait konum ve sıcaklık verisi belirli aralıklarla ölçülmekte ve LoRa modülasyonu ile merkezi birime kablosuz olarak iletilmektedir. Tüm bileşenler düşük enerji tüketimine sahip olduğu için sistemin mobil sahada uzun süreli çalışabilmesi hedeflenmiştir.

LoRa teknolojisinin önemli parametrelerinden biri olan SF, veri hızı ile menzil arasında bir denge kurmaktadır [16]. Gerçekleştirilen testler sonucunda SF12 ile açık alanda 1066 metreye kadar, SF7 ile ise 345 metreye kadar etkili iletişim sağlandığı rapor edilmiştir. Ayrıca sistemin hem antenlerin doğrudan görüş hattında olduğu hem de görüş hattının engellendiği ortamlarda performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yayılma faktörünün yanı sıra ortam yapısının da sinyal kalitesini doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur.

Geliştirilen bu sistem, LoRa tabanlı haberleşmenin sokak hayvanlarının konum ve sağlık takibi gibi mobil IoT uygulamaları için uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Saha testleriyle desteklenen sistem, düşük maliyetli donanım bileşenleri ve açık kaynaklı yazılım mimarisi sayesinde belediyeler, hayvan barınakları ve veteriner hizmetleri gibi birçok alanda genişletilebilir bir model ortaya koymaktadır [17].



Şekil 1.3: Koçak tarafından geliştirilen sistemin arayüzü [17]

Petru ve arkadaşları tarafından geliştirilen çalışmada, Endüstri 4.0 vizyonuna hizmet eden düşük güç tüketimli, uzun menzilli ve kablosuz izleme kontrol sistemlerinin gereksinimlerine çözüm sunmak amacıyla tasarlanmış LoRa tabanlı bir uzaktan izleme ve kontrol platformu kapsamlı bir biçimde ele alınmaktadır. Sistem, endüstriyel tesislerde enerji tüketimi izleme, ekipman arızalarının tespiti, motor performansı takibi ve çevresel parametrelerin ölçümü gibi uygulamaları hedeflemekte ve LoRa

teknolojisi aracılığıyla bu verileri uzun mesafelerden iletebilecek şekilde tasarlanmıştır [18].

Çalışmada ele alınan kablosuz iletim teknolojileri arasında, kısa ve orta mesafeler için Bluetooth ve ZigBee gibi çözümler önerilmiş olmasına karşılık uzun menzilli ve düşük enerji tüketimi gerektiren uygulamalarda LoRa, Sigfox ve GSM (Global System for Mobile Communications – Mobil İletişim İçin Küresel Sistem) gibi LPWAN teknolojilerinin tercih edilmesi gerektiği ifade edilmiştir [19]. Bu bağlamda, LoRa, sunduğu 45 km’ye kadar açık görüş hattı mesafesi, düşük veri oranlarında çalışabilme, çoklu frekans desteği ve 10 yıla kadar batarya ömrü gibi avantajlarıyla benzer protokoller arasında öne çıkmaktadır [20].

Geliştirilen sistemin donanım mimarisi, ARM Cortex-M0+ tabanlı KL25Z mikrodenetleyici etrafında inşa edilmiştir. Bu yapı, düşük güç tüketimi, bütünleşmiş USB (Universal Serial Bus – Evrensel Seri Veriyolu) arabirimi ve yüksek çözünürlüklü ADC (Analog Digital Converter) ile endüstriyel ortamlarda güvenilir veri toplama imkânı sunmaktadır.

Veri iletimi için Microchip RN2483 LoRa modülü tercih edilmiştir. Bu modül, düşük güç tüketimi, 50 kbps’ye kadar veri iletim hızı, 15 km’ye kadar menzil ve sertifikasyonları ile tercih sebebi olmuştur. Veriler LoRaWAN üzerinden toplanmakta, TTN (The Things Network – Şeyler Ağı) ağına bağlı bir gateway aracılığıyla Cayenne platformuna aktarılmakta ve burada kullanıcı arayüzü üzerinden görsel olarak sunulmaktadır.

Sistem mimarisi enerji verimliliği odaklı olarak “Sleep” ve “Active” modlar olmak üzere iki çalışma moduna sahiptir. Uyku modunda mikrodenetleyici düşük güç tüketimiyle çalışırken, tüm çevresel bileşenlerin elektriği kesilmekte; aktif moda geçildiğinde ise veri toplama ve iletim işlemleri gerçekleştirilip ardından tekrar uyku moduna dönülmektedir. Bu yapı sayesinde sistemin toplam ortalama tüketimi ciddi ölçüde azaltılmıştır.

Test ortamında enerji analizörü, tek fazlı motor, sıcaklık sensörü ve röleli uzaktan kontrol birimi kullanılmıştır. RS485 bağlantı portu üzerinden enerji analizörüyle haberleşme gerçekleştirilerek; akım, gerilim, aktif enerji, frekans gibi parametreler toplanmış ve bu veriler LoRaWAN ile uzaktan aktarılmıştır.

İletişim mesafesi testi sonucunda, şehir içi ortamda 3 km uzaklıktan veri iletimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu değer, geleneksel Wi-Fi ve ZigBee çözümlerine kıyasla oldukça yüksek bir değerdir ve geniş sahalara tek gateway ile erişim imkânı sunmaktadır.

Söz konusu çalışma, düşük enerji tüketimi, uzun menzil, yüksek dayanıklılık ve modüler yapıyı aynı platformda birleştiren LoRa tabanlı bir endüstriyel uzaktan izleme ve kontrol çözümü örneği sunmaktadır. Araştırmacılar, önerilen sistemin yalnızca çevresel izleme değil, aynı zamanda aktif kontrol mekanizmalarını da desteklemesi açısından mevcut literatürdeki çözümlerden daha kapsayıcı olduğunu ifade etmektedirler. Sistem, kablolama ihtiyacını ortadan kaldırarak maliyetleri azaltmakta, hızlı kurulum ve yüksek erişilebilirlik özellikleriyle Endüstri 4.0 geçiş süreçlerine ciddi katkı sağlamaktadır [18].

Zhang ve arkadaşları, IoT uygulamalarının artan kapsamı ve bu uygulamalarda karşılaşılan düşük güç tüketimi, uzun mesafe veri iletimi, düşük maliyet ve güvenilirlik gereksinimlerinden hareketle, NB-IoT (Narrowband Internet of Things – Dar Bant Nesnelerin İnterneti) ve LoRa teknolojilerini birleştiren, özellikle büyük ölçekli çevresel izleme, akıllı tarım, akıllı şehir ve endüstriyel otomasyon uygulamaları için tasarlanmış hibrit bir düşük güçlü geniş alan ağı izleme sistemi geliştirmişlerdir.

Çalışmada önerilen sistem mimarisi LoRa tabanlı alt düğümler (subnodes), LoRa–NB-IoT tabanlı ana düğüm (main node) ve bulut tabanlı sunucu sistemi olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Alt düğümler, çevresel verileri (örneğin sıcaklık ve nem) toplamakla sorumluyken, bu verileri LoRa modülasyonu aracılığıyla ana düğüme iletmektedirler. Ana düğüm ise hem alt düğümlerden gelen verileri toplamakta hem de bu verileri NB-IoT aracılığıyla Tencent Cloud sunucusuna göndermektedir. Bu mimari, yalnızca uzun menzilli iletişimi mümkün kılmakla kalmamakta, aynı zamanda ağın genel enerji tüketimini minimize ederek uzun süreli saha operasyonlarına uygunluk sağlamaktadır [21] [22].

Sistem yazılımında ise LoRa tarafında özel bir veri iletişim protokolü geliştirilmiş ve veriler bu protokole uygun şekilde çerçevelenerek gönderilmiştir. Ayrıca, ağda çok noktalı iletişimi mümkün kılmak için çok sıçramalı bir LoRa haberleşme algoritması geliştirilmiş, bu algoritma sayesinde LoRa'nın fiziksel menzil sınırlamaları aşılmıştır. Çok sıçramalı iletişimde, gelen veri çerçevesi geliştirilmiş LRU (Least Recently Used

– Sayfa Yer Değiştirme) algoritması ile işlenmekte ve hedef adres değiştirilerek sonraki düğüme yönlendirilmektedir [23].

Noktasal iletişim testlerinde LoRa modülünün karmaşık bir üniversite kampüsünde 1 km'ye kadar etkili iletişim sağladığı, çok sıçramalı senaryoda ise bu mesafenin 1.6 km'ye çıktığı belirtilmiştir. Testlerde ayrıca sistemin 8 gün boyunca kesintisiz çalıştığı, toplanan sıcaklık ve nem verilerinin doğru olduğu ve veri kaybı oranının yalnızca %3 civarında kaldığı tespit edilmiştir.

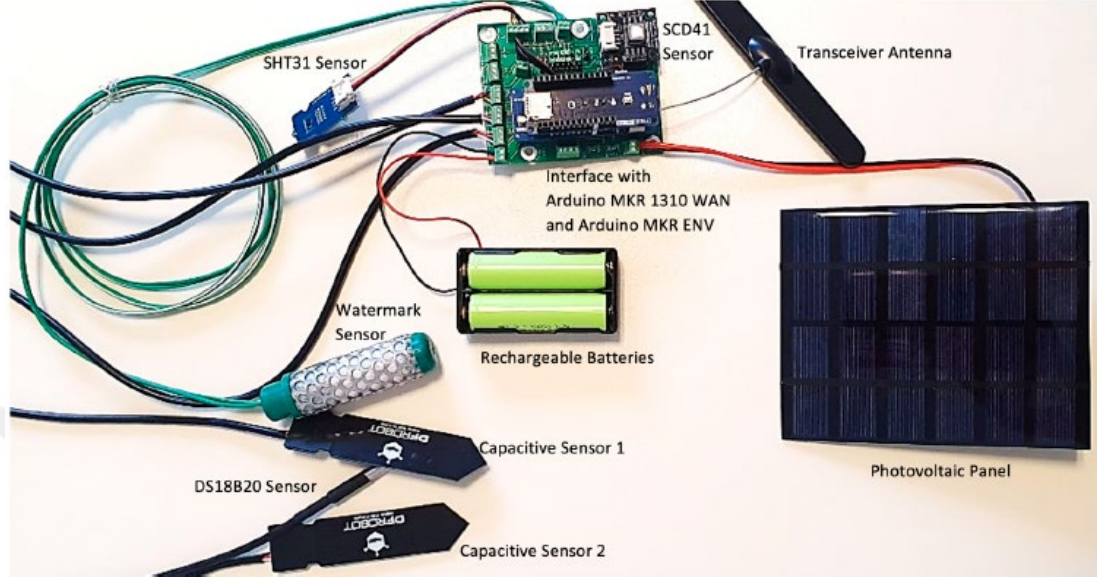
Çalışma sonucunda Zhang ve arkadaşları, NB-IoT ve LoRa teknolojilerinin birleşiminin hem yüksek enerji verimliliği hem de uzun menzilli veri iletimi açısından oldukça başarılı bir çözüm sunduğunu vurgulamışlardır. Bu yapı sayesinde sistem, akıllı tarım, orman, göl ve çevresel izleme gibi geniş alan kapsama gerektiren uygulamalarda kullanılabilecek bir referans sistem sunmaktadır. Araştırmacılar geliştirilebilirlik açısından sistemin daha fazla LoRa düğümüyle test edilerek, yazılıma yeni algoritmaların entegre edilmesiyle performans ve işlevselliğinin daha da geliştirilebileceğini ifade etmektedirler [24].

Săcăleanu ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmalarında, seralarda çevresel koşulların izlenmesi ve uzaktan kontrol edilmesi amacıyla geliştirilen bir LoRaWAN tabanlı kablosuz sensör ağı sistemi oluşturmuşlardır. Sistem, IoT destekli karar destek altyapısı olarak yapılandırılmış ve gerçek zamanlı mikro iklim takibi ile otomatik kontrol yeteneklerini bir arada sunmaktadır. Çalışmada sunulan sistem mimarisi kablosuz sensör düğümleri, kablosuz eyleyici düğümleri ve LoRaWAN ağ geçidi olmak üzere üç ana bileşene dayanmaktadır [25] [26] [27].

Sensör düğümleri sıcaklık, nem, ışık, UV, CO₂, toprak sıcaklığı ve nem gibi çevresel verileri toplamaktadır ve bu veriler LoRa ile ağ geçidine, ardından da internet tabanlı bir web platformuna aktarılmaktadır. Kullanıcılar bu platform aracılığıyla çevresel verileri izlemekte ve eyleyici düğümlere komut göndererek sulama veya havalandırma gibi işlevleri kontrol edebilmektedir.

Donanım tasarımı bakımından, her bir kablosuz sensör düğümünde Arduino MKR WAN 1310 geliştirme kartı, çeşitli analog ve dijital sensörler, mikroSD kart, 2x 5000 mAh Li-ion batarya ve 2 W gücünde 11 × 13,5 cm fotovoltaiik panel yer almaktadır. Bu yapı sayesinde düğümler dış ortamda uzun süre çalışabilirlik göstermekte, bakım gereksinimi en aza indirilmektedir. LoRa parametreleri, en uzak mesafe ve en yüksek

güç tüketimini sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır: Bu ayarlamalar sistemin menziline artırmakta ancak veri aktarım süresini ve güç tüketimini yükseltmektedir [28].



Şekil 1.4: Çalışmadaki sensör düğüm yapısı [29]

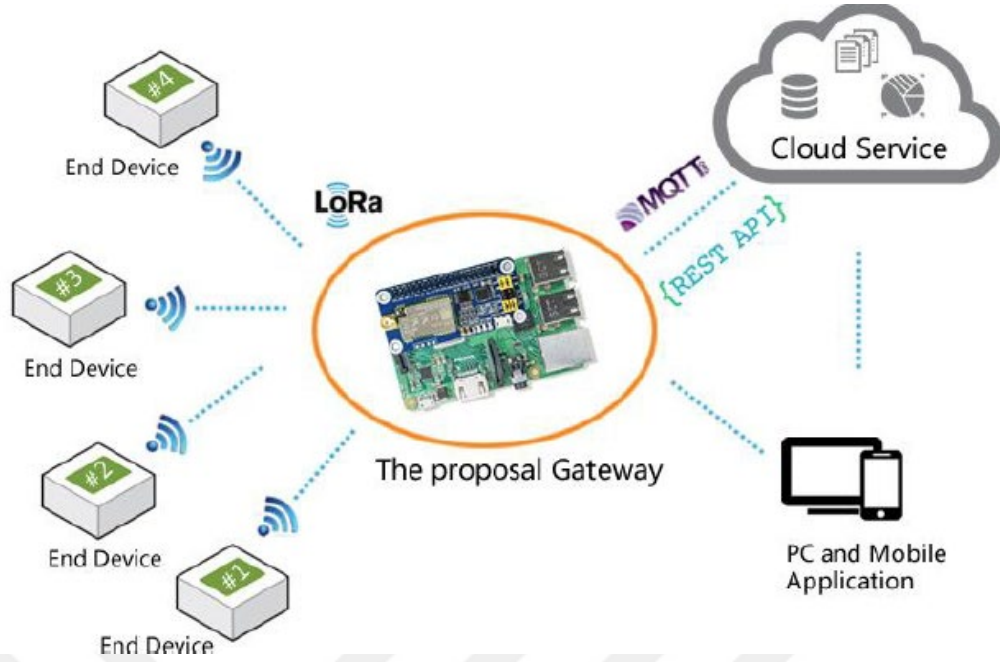
Çalışmanın yazılım bileşeni, sensör düğümlerinin veri toplama, saklama ve iletimini kontrol eden bir döngüden oluşmaktadır. Veriler hem mikroSD (Micro Secure Digital – mikro Güvenli Dijital Bellek Kartı) karta kaydedilmekte hem de LoRa ile gönderilmektedir. Kullanıcı platformu, bu verileri görselleştirmekte ve eyleyici düğümlere doğrudan komut göndermeye olanak sağlamaktadır. Platformdan sulama işlemi başlatıldığında, toprak nemi değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir ve bu da sistemin tepki süresini doğrulamaktadır.

Veri doğruluğu ve zaman serisi analizi açısından, sistem beş gün boyunca çalıştırılmış ve 2.5 dakikalık periyotlarla 2800'den fazla örnek toplanmıştır. Toplanan veriler dışa aktarılabilen ve farklı düğümlerden gelen sıcaklık değerleri karşılaştırılabilmektedir.

Sonuç olarak Săcăleanu ve arkadaşlarının çalışması, düşük güçlü geniş alan ağı teknolojilerinden biri olan LoRaWAN'ın akıllı tarım ve özellikle sera otomasyonu alanındaki uygulama potansiyelini ortaya koymaktadır. Sistem; modüler yapısı, enerji verimli tasarımı, çift yönlü haberleşme yeteneği ve web tabanlı kullanıcı dostu arayüzü ile gelecekte akıllı sera sistemlerinin yaygınlaştırılması için somut bir referans olarak değerlendirilebilmektedir [29].

Sun ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında, düşük güçlü ve geniş alan kapsama özellikleri ile öne çıkan LoRa teknolojisini temel alan, tek kanallı, Raspberry Pi tabanlı bir IIoT (Industrial Internet of Things - Endüstriyel Nesnelerin İnterneti) ağ geçidi tasarlamışlardır. Çalışmada geliştirilen bu sistem, sensör düğümlerinden gelen verileri toplamakta, ön işlemden geçirmekte ve bulut tabanlı sunuculara aktarmaktadır. Sistem, klasik “paket iletici” modundaki LoRaWAN ağ geçitlerinden farklı olarak, veri çerçevelerini yorumlayan, cihaza özel bağlantıları yöneten ve komutları uygulayan bir akıllı aracı içermektedir. Sistem uç cihazlar, LoRa IIoT geçidi ve bulut tabanlı sunucular olmak üzere üç temel katmandan oluşmaktadır. Uç cihazlar çevresel veya endüstriyel sensör verilerini toplamakta, bu verileri 433 MHz ISM bandı üzerinden LoRa modülasyonu ile tek kanallı gatewaye iletmektedir. Gateway ise, bu protokolleri aracılığıyla uzak sunuculara aktarmaktadır [30].

Uç cihaz donanımında ise STM32F030F4 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bu MCU (Microcontroller Unit – Mikrodenetleyici Birimi), SPI (Serial Peripheral Interface – Seri Çevresel Arabirim) üzerinden SX1276 LoRa transceiver modülüne bağlanmakta ve sensör verilerini topladıktan sonra LoRa veri yapısına uygun biçimde formatlamaktadır. SX1276 transceiver modülü, 433 MHz bandında çalışmakta olup CSS modülasyonu ile sinyali yayarak yüksek parazit bağımsızlığı sağlamaktadır. Bu özellik, sistemin endüstriyel ortamlarda güvenilir biçimde çalışabilmesini mümkün kılmaktadır. Gateway’in yazılım kısmı Python tabanlı Flask web framework ile tasarlanmış olup, LoRa modülü ve MQTT (Message Queuing Telemetry Transport - Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşıma Protokolü) parametreleri dahil tüm sistem ayarları, web tabanlı kullanıcı arayüzü üzerinden masaüstü veya mobil cihazlarla yapılandırılabilir. Kullanıcı, gatewayin parametre konfigürasyon arayüzü üzerinden LoRa frekansı, veri hızları, MQTT sunucu bilgileri gibi ayarları kolayca değiştirebilmektedir. Sensör cihazlardan gatewaye gönderilen veri paketleri için de belirli bir çerçeve yapısı tanımlanmıştır. Bu çerçevede; başlangıç karakteri (3x STX), veri boyutu, cihaz ID’si ve çoklu sensör verilerinden oluşan PAYLOAD alanı bulunmaktadır. Sensör verileri genellikle 4 byte’lık bloklar halinde gönderilmektedir. Deneysel sonuçlara göre, dış anten kullanımı ile uç cihaz ve gateway arasında 5 km’ye kadar başarılı iletişim sağlanabilmiştir [31].



Şekil 1.5: Sun ve arkadaşlarının çalışmada kullandıkları mimari şeması [31]

1.3. Araştırma Çalışmasının Yenilik ve Katkıları

Bu tez çalışması, düşük güçlü geniş alan ağ teknolojilerinden biri olan LoRa tabanlı IoT sensör ağlarının, bulut tabanlı sistemlerle entegre edilerek kampüs tipi çok noktali ortamlarda kullanılmasına yönelik kapsamlı ve uygulamalı bir çözüm sunmaktadır. Çalışmada geliştirilen sistem, dört farklı noktaya yerleştirilen sıcaklık ve nem sensörlerinden alınan verilerin, LoRa protokolü aracılığıyla merkezi bir modüle iletilmesini ve buradan da bulut platformuna aktarılmasını sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde, geleneksel kablolu sistemlerin yetersiz kaldığı geniş alanlarda düşük maliyetli ve düşük enerji tüketimli bir izleme altyapısı oluşturulmuştur.

Tezde, gerçek zamanlı veri görselleştirme ve uzaktan izleme işlevi, bulut sistemi üzerinden her sensör noktasına ait sıcaklık ve nem değerlerinin izlenebilmesiyle sağlanmaktadır. Sistemin bulut entegrasyonu sayesinde kullanıcılar, uzaktan herhangi bir zamanda ağ durumunu ve çevresel koşulları görüntüleyebilmektedir. Söz konusu nitelik büyük yapılarda merkezi izleme ve yönetim açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Çalışmanın özgün yönlerinden biri, elde edilen çevresel verilerin bir tahmin modeli aracılığıyla işlenmesi ve analiz edilmesidir. Geliştirilen algoritma, toplanan sıcaklık ve nem verilerini ISO 7730 standardı kapsamında değerlendirerek, ortamın ofis konfor koşullarına uygun olup olmadığını analiz etmektedir. Aynı zamanda bu algoritma,

geçmiş verilere dayanarak gelecek günler için önerilen sıcaklık ve nem düzeylerini tahmin edebilmeyi hedeflemekte ve bu yönüyle sistem yalnızca izleme değil, karar destek işlevi de görmektedir.

Sistem hem donanım hem yazılım düzeyinde düşük enerji tüketimiyle çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. LoRa teknolojisinin uyku modu özelliği kullanılarak, sensör düğümlerinin yalnızca veri iletimi sırasında aktif olması sağlanmış ve böylece sistemin uzun süreli batarya ile çalışabilirliği artırılmıştır. Donanımın modüler yapısı sayesinde sistem farklı sensör tipleri ile kolayca genişletilebilmekte, bu da büyük ölçekli yapılarda yaygınlaştırılabilirliği mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada LoRa ve bulut teknolojilerinin bir arada kullanıldığı işlevsel bir saha uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu sistemin veri analizi ve standartlara dayalı çevresel değerlendirme mekanizması içermesi, literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmasını sağlamaktadır. Sahada uygulanabilirliği test edilmiş, gerçek çevresel koşullar altında başarıyla çalışan sistemin; enerji yönetimi, otomatik iklimlendirme ve akıllı bina teknolojilerinde kullanılabilir bir model olarak üzerinde durulmuştur. Böylece bu tez, yalnızca teorik değil, uygulamalı anlamda da özgün ve katkı sağlayıcı bir araştırma olarak değerlendirilmektedir.

1.4. Tezin Organizasyonu

Tez çalışmasının birinci bölümünde çalışmaya dair genel bir giriş yapısının ardından literatür taramasına, çalışmanın yenilik ve katkılarıyla birlikte tezin organizasyonuna yer verilmiştir. İkinci bölümde kablosuz haberleşme teknolojileri, LoRa modülasyonu ve IoT sistemleri ile bulut sistemlerine dair ayrıntılara yer verilmiştir. Çalışmanın üçüncü kısmında çalışma çerçevesinde uygulanacak sistemin bileşenleri ve çalışmadaki konumlarına yer verilmekle birlikte çalışmaya katkıları aktarılmıştır. Dördüncü bölümde kurgulanan sistemin hayata geçirilmesi ve uygulama aşamaları detaylıca aktarılmış olmakla birlikte son bölüm olan beşinci bölümde çalışmadan elde edilen bulgular ve sonuç kısmına yer verilmiştir.

BÖLÜM 2. KABLOSUZ HABERLEŞME, IoT VE BULUT TEKNOLOJİLERİ

Kablosuz iletişim teknolojileri Nesnelerin İnterneti ekosisteminin başarılı sonuçlara ulaşabilmesi açısından temel bir role sahiptir. Kablolu iletişim yöntemlerinin kurulum alan kısıtlamaları, yüksek bakım ve kurulum maliyetleri, fiziki kullanım alanının sınırlı olduğu projelerde yüksek alan kaplamaları vb. durumlar sebebiyetiyle kablosuz iletişim teknolojileri IoT sistemlerde daha çok tercih edilmektedir. Bu bölümde IoT sistemlerine tercih edilen bazı kablosuz iletişim teknolojileri ne değinilmiştir.

2.1. Bluetooth Teknolojisi

Bluetooth teknolojisi, kısa menzile sahip iki cihaz arasında veri iletişimi sağlayan, 1994 yılında Ericsson tarafından geliştirilen bir haberleşme teknolojisidir. Bu teknoloji 2.402 GHz – 2.480 GHz frekans değerleri arasında UHF (Ultra High Frequency – Ultra Yüksek Frekans) kısa dalga radyo dalgaları ile veri iletimi gerçekleştirmektedir [32].

Bluetooth teknolojisi, zaman içerisinde daha az güç tüketimi sağlayan BLE (Bluetooth Low Energy – Bluetooth Düşük Enerji) standardına evrilmiştir. Bluetooth Classic, yüksek veri hızları gerektiren uygulamalarda, BLE ise düşük veri miktarı ve güç tüketimi ile çalışan uygulamalarda tercih edilmektedir. Her iki teknoloji, aynı markaya veya donanım standardına sahip olmalarına karşılık birbirleriyle doğrudan uyumlu değildir. Bu sebeple birçok modern cihazda, her iki protokolü destekleyen çift modlu Bluetooth çipleri bulunmaktadır [33]. Tablo 2.1’de her iki teknolojinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

Tablo 2.1: Bluetooth teknolojileri karşılaştırılması [33].

Özellik	Klasik Bluetooth	Bluetooth Düşük Enerji (BLE)
Veri Yüğü Aktarım Hızı	2 Mbps	-100 kbps
Dayanıklılık	Güçlü	Güçlü
İletim Menzili	1000 m	250 m
Yerel Sistem Yoğunluğu	Güçlü	Güçlü
Büyük Ölçekli Ağ Yapısı	Zayıf	İyi
Düşük Gecikme Süresi	Güçlü	Güçlü
Bağlantı Kurulum Hızı	Zayıf	Güçlü
Güç Tüketimi	İyi	Çok İyi
Maliyet	İyi	Çok İyi

2.2. Wi-Fi Teknolojisi

IoT uygulamaların sıklıkla tercih edilen bir başka kablosuz iletişim teknolojisi olan Wi-Fi (Wireless Fidelity – Kablosuz Doğruluk) teknolojisi temel olarak yüksek veri iletim hızı, geniş bant kapasitesi ve ağ erişim kolaylığı gibi avantajlarıyla ön plana çıkmakta olup; akıllı cihazlar, sensör sistemleri ve enerji izleme platformları ile bütünleşik olarak çalışabilmektedir. Bu yönüyle, akıllı şehir altyapıları, bina otomasyon sistemleri ve giyilebilir teknolojiler gibi alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir [34].

Wi-Fi protokolü, IoT uygulamalarında özellikle yüksek veri hacmi taşıyan ve gerçek zamanlı analiz gerektiren senaryolar için uygun bir çözümdür. Bununla birlikte, Wi-Fi'nin güç tüketimi nispeten yüksektir; bu nedenle batarya ömrünün kritik olduğu düşük güçlü IoT cihazlarında ilk tercih olarak değerlendirilmemektedir. Wi-Fi teknolojisi, IoT cihazları için yüksek bant genişliği ve geniş kapsama alanı gibi avantajlar sunmakla birlikte, enerji verimliliği gerektiren senaryolarda dikkatli kullanım gerektirmektedir [35].

2.3. NFC Teknolojisi

NFC (Near Field Communication – Yakın Alan İletişimi) düşük güçlü, kısa menzilli kablosuz iletişim protokolleri arasında yer almakta olup, özellikle fiziksel temas gereksinimi barındırmayan veri alışverişine olanak tanıyan güvenli ve hızlı bir iletişim yöntemidir. NFC teknolojisi IoT ekosisteminde; özellikle temassız ödeme sistemleri, erişim kontrol uygulamaları ve mobil cihazlar arası veri aktarımı gibi alanlarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Maksimum 424–500 Kbps veri aktarım hızı ve birkaç santimetrelik iletişim menzili ile sınırlı olan bu teknoloji, yüksek güvenlik gereksinimi bulunan uygulamalarda düşük güç tüketimi avantajı sunmaktadır. NFC teknolojisinin

düşük enerji gereksinimi, temassız yapısı ve veri güvenliği konularındaki avantajları, özellikle mobil ve kişisel IoT uygulamaları açısından kritik öneme sahiptir. Ancak veri iletim mesafesinin oldukça kısa olması ve aktarım kapasitesinin sınırlı oluşu, geniş ölçekli veri aktarımı gerektiren uygulamalar için kullanım alanını daraltmaktadır. Bununla birlikte, güvenilir kimlik doğrulama ve kullanıcı etkileşimi gerektiren sistemlerde NFC, kompakt yapısı ve düşük işlem yükü ile öne çıkmaktadır [36].

2.4. ZigBee Protokolü

ZigBee, özellikle düşük güçlü ve kısa mesafeli kablosuz iletişim ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmış, IEEE 802.15.4 standardına dayalı bir protokoldür. ZigBee protokolü, ev otomasyonu, endüstriyel kontrol sistemleri ve IoT tabanlı sensör ağları gibi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılabilir. ZigBee'nin en dikkat çeken özelliklerinden biri düşük güç tüketimiyle uzun süreli batarya ömrü sağlamasıdır. Ayrıca, 100 metreye kadar iletim mesafesi, 20–250 Kbps arası veri iletim hızları ve uygun maliyetli donanım gereksinimleri sayesinde IoT uygulamaları için verimli bir iletişim altyapısı sunmaktadır. Bu özellikleriyle ZigBee, yüksek enerji verimliliği, modüler ağ genişletilebilirliği (mesh network yetenekleri) ve düşük işlem yükü gibi avantajları sayesinde geniş ölçekli IoT altyapılarında güvenilir bir haberleşme alternatifi sunmaktadır. Ancak yüksek bant genişliği veya uzun mesafe gerektiren uygulamalarda, ZigBee protokolünün performansı sınırlı kalabilmektedir [34].

2.5. NB-IoT Teknolojisi

NB-IoT, 3GPP tarafından standartlaştırılmış bir LPWAN teknolojisi olmakla birlikte, düşük güç tüketimi, geniş kapsama alanı ve düşük maliyetli cihaz gereksinimleri ile özellikle akıllı şehirler, endüstriyel otomasyon ve uzaktan izleme gibi alanlarda yaygın kullanım imkânı sunmaktadır. Tipik olarak 20–250 Kbps aralığında veri iletimi sunan NB-IoT, 25 km'ye kadar kapsama mesafesi ve geliştirilmiş iç mekân sinyal gücü ile diğer LPWAN çözümlerine göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Enerji verimliliği açısından yapılan analizlerde NB-IoT yüksek güçlü protokollere kıyasla daha az enerji tüketerek düşük maliyetli ve sürdürülebilir sensör ağlarının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, NB-IoT; hem gelişmiş frekans planlama kabiliyeti hem

de basitleştirilmiş cihaz mimarisi ile yüksek sayıda sensör düğümünün aynı anda ağ içinde etkin şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır [37].

2.6. GSM Teknolojisi

GSM (Global System for Mobile Communications - Küresel Mobil Haberleşme Sistemi), uzun yıllardır düşük veri oranı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir hücreli iletişim teknolojisi olup, özellikle GPRS (General Packet Radio Service - Genel Paket Radyo Servisi) standardı aracılığıyla birçok IoT senaryosunda temel altyapı olarak hizmet vermektedir [38].

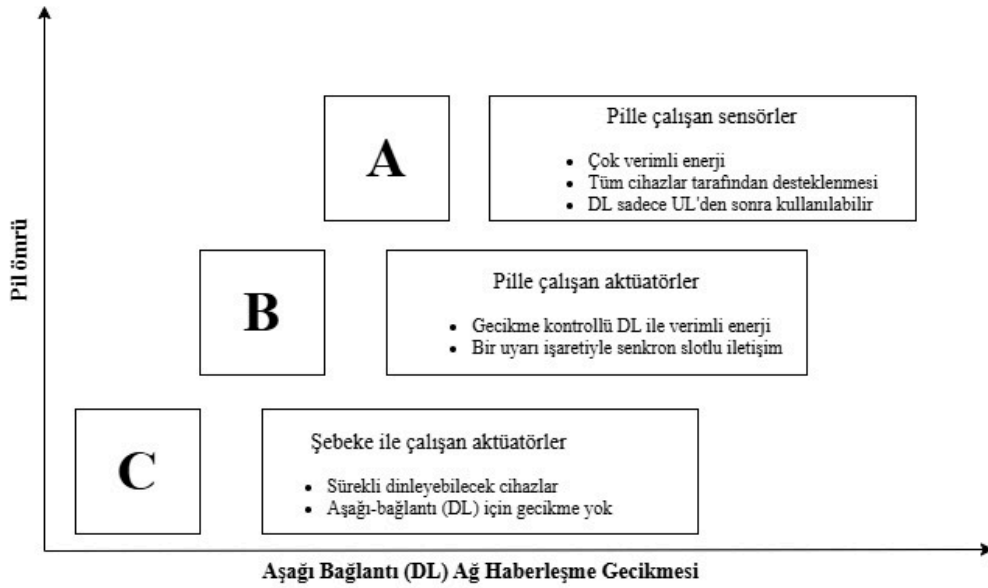
Durand ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışma, GSM/GPRS tabanlı ağların, mevcut geniş kapsama altyapısı sayesinde IoT alanında başlangıç düzeyinde geniş ölçekli uygulamalara olanak sağladığını, ancak yüksek güç tüketimi ve düşük veri aktarım hızı gibi teknik sınırlılıkları nedeniyle günümüzde işlevsel sınırlarına ulaştığını ortaya koymaktadır. GSM teknolojisi temel avantaj olarak, hâlihazırda mevcut olan hücreli altyapıyı kullanmakta ve bu sayede kırsal bölgelerde dahi veri iletimine olanak tanımaktadır. Ancak, 128 dB'lik maksimum bağlantı kaybı değeri ve sınırlı bağlantı kapasitesi nedeniyle, günümüzdeki yoğun bağlı cihaz ağlarını desteklemede yetersiz kalmaktadır. Özellikle akıllı tarım, sayaç okuma, çevresel izleme ve mobil olmayan sistemlerde GSM'in bir süre daha kullanımda kalacağı; ancak pil ömrü, çift yönlü iletişim ihtiyacı ve geniş ölçekli ağ gereksinimleri göz önünde bulundurulduğunda, yerini daha optimize edilmiş LPWAN protokollerine bırakacağı öngörülmektedir [38].

2.7. LoRa Teknolojisi

LoRa teknolojisi, düşük güç tüketimiyle uzun mesafelerde veri iletimi gerçekleştirebilen modülasyon tabanlı bir kablosuz haberleşme teknolojisi olarak ifade edilmektedir. Temel olarak düşük veri hızlarında çalışan, ancak kilometrelerce uzaklıktaki cihazlarla iletişim kurabilen bir sistem altyapısı sunmaktadır. LoRa teknolojisi, özellikle enerji kısıtı olan, sürekli şebeke bağlantısına ihtiyaç duymayan, ancak belirli aralıklarla veri aktarımı yapması gereken uygulamalar için ideal bir teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır. Wi-Fi gibi kısa menzilli teknolojilere kıyasla daha uzun iletişim mesafesi sunarken, hücreli ağlara göre ise çok daha düşük enerji tüketimi sağlamak ve operatör bağımlılığı gibi kısıtları ortadan kaldırmaktadır. Bu

yönüyle LoRa, kırsal ve kentsel alanlarda geniş ölçekli sensör ağlarının kurulmasını mümkün kılmakta ve enerji verimliliği ile maliyet etkinliği arasında dengeli bir çözüm sunmaktadır [39] [40].

Teknolojik altyapı açısından LoRa, fiziksel katmanda CSS modülasyon tekniğini kullanmakta olup, bu sayede yüksek parazit dayanıklılığı ve sinyal gürültü oranı avantajı sağlamaktadır. LoRaWAN, LoRa cihazlarının bölgesel, ulusal veya küresel ölçekte merkezi bir ağ altyapısı üzerinden haberleşmesini sağlayan, düşük güçlü ve geniş kapsama alanlı bir iletişim protokolüdür. LoRaWAN yapısı içinde, veri iletimi açısından üç farklı sınıf (A, B ve C) tanımlanmıştır. Bu sınıflar, cihazların veri alma sıklığı ve güç tüketimi bakımından farklılık göstermektedir. Sınıf A en düşük enerji tüketimine sahip olup yalnızca veri gönderimi sonrasında dinleme yaparken, Sınıf B belirli zaman aralıklarında ek dinleme pencereleri açmakta ve Sınıf C ise sürekli açık alıcı moda çalışarak minimum gecikme süresi sunmaktadır [40] [41].



Şekil 2.1: LoRa modülasyonu sınıflandırılması [40].

Ek olarak LoRa, hâlihazırda kurulmuş olan altyapılara sensörlerin entegre edilmesine olanak sağlayarak yeni altyapı kurulum maliyetlerini düşürmekte ve esnek uygulama senaryoları sunmaktadır. Özetle, LoRa teknolojisi; enerji verimliliği, uzun menzil, düşük maliyet ve esnek kurulum olanakları ile IoT destekli akıllı şehir uygulamaları başta olmak üzere tarım, lojistik, endüstri ve çevresel izleme gibi pek çok alanda yenilikçi ve sürdürülebilir haberleşme çözümlerinde tercih edilmektedir [40].

2.7.1. LoRa modülasyonu çalışma topolojisi

Düşük güç tüketimiyle uzun menzilli iletişimi mümkün kılan ve özellikle Nesnelerin İnterneti uygulamaları için tasarlanmış bir kablosuz haberleşme teknolojisi olan LoRa modülasyonu sisteminin temelini, fiziksel katmanda uygulanan CSS modülasyonu oluşturmaktadır. CSS, veri sembollerini zaman-frekans düzleminde genişleterek ileten bir yayılı spektrum modülasyon tekniğidir. Geleneksel frekans kaydırmalı modülasyon yöntemlerinden farklı olarak, CSS'de bilgi, frekansı zamanla doğrusal olarak artan veya azalan “chirp” sinyalleriyle taşınmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, LoRa sistemi düşük SNR (Signal to Noise Ratio- Sinyal Gürültü Oranı) ile dar bantlı girişimlere karşı oldukça dayanıklı bir yapı sunmaktadır. LoRa'nın fiziksel katmanında, sembol süresi denklem 2.1'de ifade edildiği gibi tanımlanırken, veri iletim hızı ise denklem 2.2'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.1)$$

$$R_b = \frac{SF \cdot BW}{2^{SF}} \quad (2.2)$$

Belirtilen hesaplamalarda SF (Spreading Factor – Yayılma Faktörü) sembol başına düşen bit sayısını, BW (Bandwidth – Bant Genişliği) ise bant genişliğini ifade etmektedir. CSS modülasyonunda her chirp sinyali, örnekleme dizinine denklem 2.3'te belirtildiği gibi modellenmektedir.

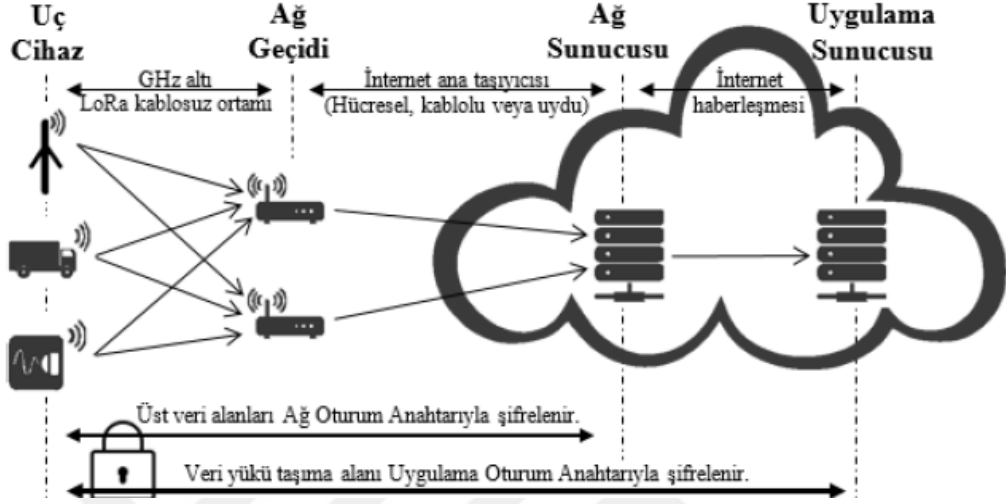
$$c[k] = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{j\pi \frac{k^2}{2^{SF}}} e^{-j\pi k} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'te $c[k]$ k. Örnekleme anında üretilen kompleks chirp sinyalini, k örnekleme zaman indisini, SF yayılma faktörünü, 2^{SF} toplam örnek sayısını, $\sqrt{2^{SF}}$ sinyal enerji normunu, j sanal birimi, π pi sayısını, $e^{j\theta}$ euler formülleriyle ifade edilen fazlı taşıyıcı sinyali ifade etmektedir [42].

Belirtilen sinyal yapısı, alıcı tarafında basit ancak etkili bir demodülasyon algoritmasının uygulanmasına imkân tanımaktadır.

LoRa'nın mimari topolojisi ise yıldız tabanlı (star-of-stars) haberleşme modeline dayanmaktadır. Bu mimaride, düşük güçlü uç cihazlar doğrudan bir veya birden fazla ağ geçidine veri iletmektedir. Ağ geçitleri, RF sinyallerini dijital IP (Internekt Protokol – İnternet Protokolü) paketlerine dönüştürerek bunları internet üzerinden merkezi bir

ağ sunucusuna göndermektedir. Ağ sunucusu ise veri paketlerini doğrular, organize eder ve gerekli yönlendirmeyi yaparak bu bilgileri ilgili uygulama sunucularına iletmektedir. Bu yapıda uç cihazlar, aralarında doğrudan iletişim kurmadan merkezi yönetimle kontrol edilebilmektedir [41].



Şekil 2.2: LoRa ağ mimarisi [43].

LoRa mimarisinde kullanılan bu topolojik yapı, özellikle geniş coğrafi alanlara yayılmış düşük veri gereksinimi olan IoT cihazları için oldukça elverişlidir. Tarım, çevresel izleme, akıllı şehir altyapıları, endüstriyel izleme ve sağlık teknolojileri gibi pek çok alanda yaygın olarak uygulanabilmektedir. Sistem, ISM frekans bandında (örneğin Avrupa’da 868 MHz, Amerika’da 915 MHz) çalıştığından lisanssız olarak geniş alan iletişimini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, çoklu SF kullanımı sayesinde aynı ağda farklı veri oranlarına ve menzil gereksinimlerine sahip cihazların eşzamanlı çalışabilmesi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, LoRa’nın klasik CSS modülasyonu spektral verimlilik açısından sınırlıdır. Bu sınıra çözüm getirmek amacıyla geliştirilen Group-Based CSS (GCSS) modülasyonu gibi yöntemlerle spektral verimlilikte önemli artışlar sağlanmıştır. GCSS, chirp sembollerini GN (Group Number – Grup Sayısı) kadar gruba ayırarak her grupta farklı bit blokları taşıyacak şekilde iletim yapmakta ve böylece maksimum 0.5 bps/Hz düzeyinde spektral verimlilik elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Matematiksel olarak, toplam bilgi biti miktarı Denklem 2.4’te ifade edildiği gibi tanımlanırken, belirtilen yöntemin spektral verimliliği ise Denklem 2.5’te ifade edilmektedir. GCSS’nin önemli avantajlarından biri, alıcı tarafında geleneksel LoRa mimarisi ile uyumlu çalışabilmesidir [42].

$$S = GN. (SF - \log_2 GN) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te S toplam iletilen bilgi sayısını, GN Grup sayısını, SF yayılma faktörünü ve $\log_2 GN$ her grubun taşıyabileceği bilgi miktarını ifade etmektedir.

$$\eta_G = \frac{2^n \cdot (SF - n)}{2^{SF}} \left(\frac{bps}{Hz} \right) \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te $n \log_2 GN$ olarak tanımlanırken, η_G GCSS modülasyonunun spektral verimliliğini, $2n$ grup sayısını, $SF - n$ her grubun taşıdığı bit sayısını ve 2^{SF} toplam chirp sembol sayısını ifade etmektedir.

LoRa çalışma mimarisi bağlamında kullanılmakta olan ya da alternatif olarak değerlendirilmekte olan 3 temel modülasyon yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler ASK (Amplitude Shift Keying – Genlik Kaydırmalı Anahtarlama), FSK (Frequency Shift Keying – Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) ve PSK (Phase Shift Keying – Faz Kaydırmalı Anahtarlama) olarak tanımlanmaktadır.

ASK taşıyıcı sinyalin genliğinin değiştirilmesi yoluyla dijital verilerin iletimini sağlayan en basit modülasyon tekniklerinden biri olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, "1" ve "0" dijital bitlerini farklı genlik düzeylerine karşılık gelecek şekilde modüle etmektedir. Örneğin, ikili ASK sistemlerinde "1" biti belirli bir taşıyıcı genliği ile iletilirken, "0" biti taşıyıcının yokluğu (yani sıfır genlik) ile temsil edilebilmektedir. ASK modülasyonunun avantajları arasında uygulama kolaylığı ve düşük bant genişliği gereksinimi bulunmakla birlikte, en önemli dezavantajı gürültüye karşı yüksek hassasiyeti ve zayıf hata dayanımıdır. Bu nedenle, LoRa gibi uzun menzilli ve düşük SNR ortamlarında çalışması gereken sistemlerde genellikle tercih edilmemektedir. Özellikle çok yönlü yayılma ve parazit yoğun olduğu ortamlarda, sinyal genliğindeki dalgalanmalar bit hata oranını ciddi şekilde artırabilmektedir [44]. ASK yöntemi Denklem 2.6'da belirtildiği gibi matematiksel olarak modellenmektedir.

$$s(t) = b(t). A. \cos (2\pi f_c t) \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'da $b(t)$ bit dizisini, A genlik değerini, f_c taşıyıcı frekansı ifade ederken $s(t)$ ise ASK ile modüle edilmiş sinyali ifade etmektedir.

FSK, dijital verileri iletmek amacıyla taşıyıcı sinyalin frekansını değiştirerek modülasyon sağlayan bir yöntemdir. İkili FSK sistemlerinde, "0" ve "1" bitleri iki farklı taşıyıcı frekans ile temsil edilir. FSK'nin en önemli avantajlarından biri, genlik dalgalanmalarına karşı dayanıklı olmasıdır. Bu özelliği, kablosuz ortamda gürültüden

dolayı oluşabilecek sinyal zayıflamasına karşı dirençli hale getirmektedir. LoRa teknolojisinde doğrudan klasik FSK kullanılsa da, LoRa'nın CSS yapısı, FSK'nin genişletilmiş ve frekans-zaman düzlemine yayılmış bir türevi gibi değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, CSS modülasyonu FSK'nin temel frekans değişimi prensibini korumakta ancak chirp sinyallerle spektrumu yayarak daha yüksek parazit bağışıklığı sağlamaktadır [16]. FSK yöntemi Denklem 2.7'de belirtildiği gibi matematiksel olarak modellenmektedir.

$$s(t) = \begin{cases} \sqrt{2P} \cdot \cos(2\pi f_1 t) & \text{eğer } b(t) = 1 \\ \sqrt{2P} \cdot \cos(2\pi f_0 t) & \text{eğer } b(t) = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de P sinyal gücünü, f_0 ve f_1 frekansları, $b(t)$ bit dizisini ve $s(t)$ modüle edilmiş sinyali ifade etmektedir.

PSK modülasyonu ise, taşıyıcı sinyalin fazının değiştirilmesi yoluyla dijital bilgi iletir. BPSK (Binary PSK) en basit haliyle iki farklı faz örneğin 0° ve 180° kullanarak "0" ve "1" bitlerini temsil etmektedir. Daha gelişmiş versiyonlar olan QPSK (Quadrature PSK) veya 8-PSK gibi türlerde bir sembolde birden fazla bit taşınabilmektedir. PSK, özellikle yüksek veri hızlarının gerektiği ve bant genişliğinin sınırlı olduğu ortamlarda avantaj sağlamaktadır. Ancak, faz bilgisinin doğru çözülmesi için alıcı tarafında hassas senkronizasyon mekanizmaları gerektirmektedir. Ayrıca PSK, faz kaymasına karşı duyarlıdır ve çok yönlü yayımlı ortamlar bu tür sistemlerde sembol çözümleme hatalarına neden olabilmektedir. LoRa gibi düşük SNR ortamlarında çalışan sistemlerde faz tabanlı modülasyonlar genellikle tercih edilmemektedir çünkü alıcı karmaşıklığı artmakta ve enerji tüketimi yükselmektedir [42]. PSK yöntemi Denklem 2.8'de belirtildiği gibi matematiksel olarak modellenmektedir.

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'de A genliği, f_c taşıyıcı frekansı, ϕ faz açısını ve $s(t)$ modüle edilmiş sinyali ifade etmektedir.

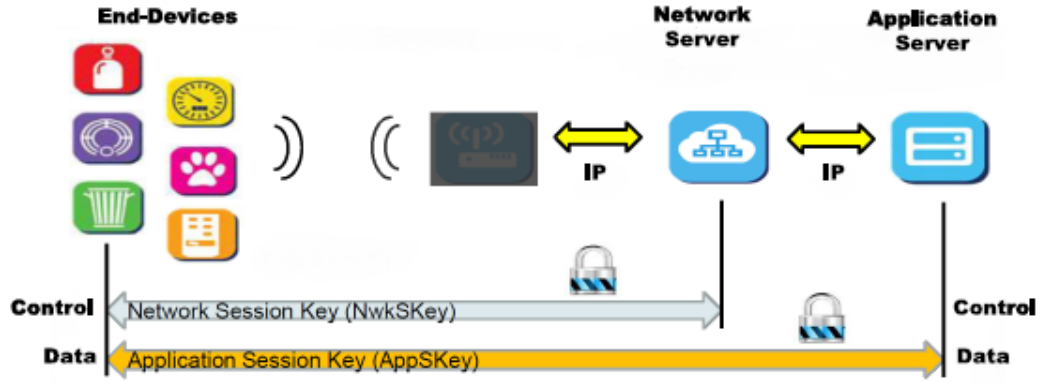
ASK, FSK ve PSK yöntemlerinin sahip oldukları özellikler açısından karşılaştırılmasına Tablo 2.2'de yer verilmiştir.

Tablo 2.2: ASK, FSK ve PSK yöntemlerinin karşılaştırılması

Özellik	ASK	FSK	PSK
Modülasyon Prensibi	Genlik değişimi	Frekans değişimi	Faz değişimi
Gürültü Bağışıklığı	Düşük	Orta	Yüksek (faz hatalarına duyarlı)
Uygulama Karmaşıklığı	Düşük (basit yapı)	Orta	Yüksek (faz çözümlemesi gerekli)
Veri Hızı	Düşük	Orta	Yüksek (QPSK, 8-PSK vb. ile)
Çok Yollu Ortama Dayanım	Zayıf	İyi	Zayıf (faz çakışması sorunu)
Enerji Tüketimi	Düşük	Düşük-Orta	Yüksek
LoRa Uyum Durumu	Uyumlu değil	Dolaylı ilişki (CSS türevi)	Uyumlu değil (faz hassasiyeti yüksek)
Avantajı	Düşük maliyet	Parazitlere karşı dayanıklı	Yüksek bant verimliliği
Dezavantajı	Parazite çok duyarlı	Daha fazla bant genişliği gerekebilir	Senkronizasyon ve karmaşık alıcı yapısı

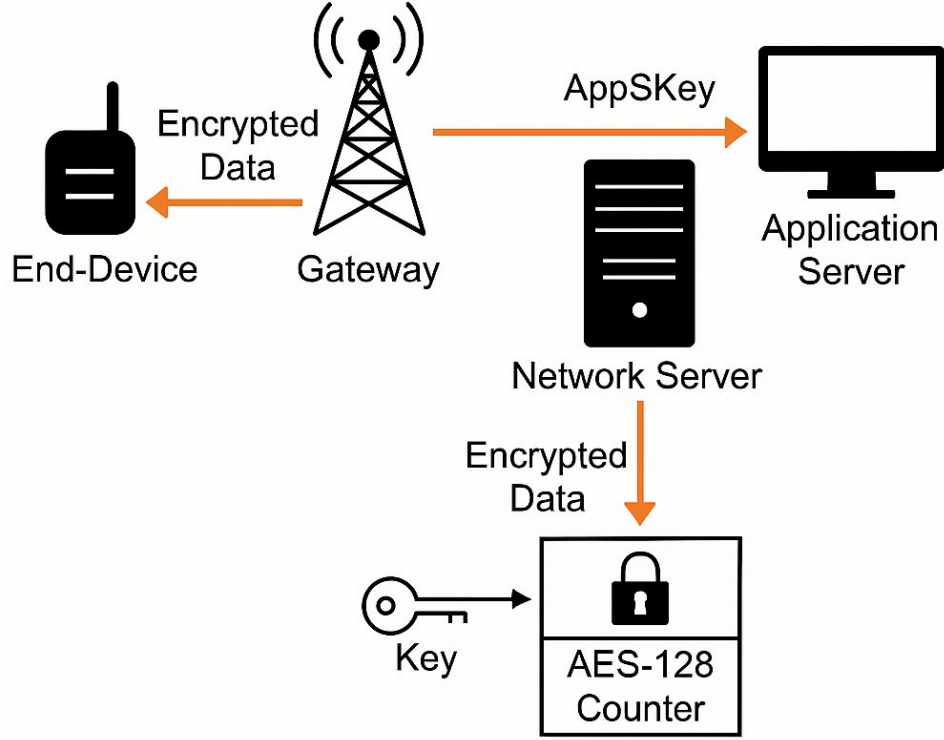
2.7.2. LoRa modüllerinde veri güvenliği

LoRa modülasyonunun sahip olduğu geniş kapsama alanı ve kablosuz yapısı siber saldırılara açık hale gelmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda güvenli veri iletimi, yetkisiz erişimden korunma ve veri bütünlüğünün sağlanması gibi unsurlar hayati önem taşımaktadır. LoRa modüllerinin güvenliği genellikle fiziksel radyo katmanında değil, LoRaWAN protokol katmanında sağlanmaktadır. Bu nedenle LoRa'nın güvenlik çerçevesi, veri iletimi sürecinde uygulanan şifreleme teknikleri ve anahtar yönetim prosedürleri ile şekillenmektedir. LoRaWAN'ın güvenlik mekanizması temel olarak AppSKey (Application Session Key - Uygulama Oturumu Anahtarı) ve NwkSKey (Network Session Key – Ağ Oturumu Anahtarı) olmak üzere iki tür anahtardan oluşmaktadır. Bu anahtarlar, 128-bit uzunluğunda olan ve cihazla ağ sunucusu arasında paylaşılan bir kök anahtar (AppKey) kullanılarak AES-128 şifreleme algoritmasıyla türetilmektedir. AppSKey, uygulama seviyesindeki verilerin gizliliğini sağlarken; NwkSKey, ağ yönetimiyle ilgili komutların güvenliğini ve mesajın bütünlüğünü garanti altına almaktadır. Bu ayırım, ağ sağlayıcısı ile uygulama geliştiricisi arasındaki güvenin ayrıştırılmasına olanak tanımakta ve yetki alanlarının sınırlandırılmasını mümkün kılmaktadır [45].



Şekil 2.3: Uçtan uca güvenlik anahtarları diyagramı [46].

LoRaWAN veri paketlerinin içeriği olan FRMPayload (Frame Payload – Çerçeve Yüğü) , yalnızca şifreli olarak iletilmektedir. Şifreleme işlemi, AES algoritmasının Counter Mode modunda gerçekleştirilmektedir. Bu modda, her veri paketi için benzersiz bir blok dizisi oluşturularak şifreleme işlemi yapılmaktadır. Bloklar, cihaz adresi, yön bilgisi, çerçeve sayacı, ve paket dizini gibi parametreleri içermektedirler. Bu bloklar üzerinden elde edilen anahtar akışı, orijinal veri ile XOR işlemine tabi tutularak FRMPayload şifrelenmektedir. LoRaWAN ağında cihazların ağa katılımı OTAA (Over The Radio Activation - Havadan Aktivasyon) ve ABP olmak üzere iki temel yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. OTAA yönteminde cihaz, bir "join-request" mesajı göndererek oturum anahtarlarını dinamik olarak üretilmektedir. Bu mesaj şifrelenmemiştir ancak imzalanmıştır. Ağ sunucusu daha sonra "join-accept" mesajıyla birlikte AppNonce, NetID, DevAddr gibi verileri göndermekte ve bu mesaj AES-ECB modunda AppKey ile şifrelenmektedir. Cihaz tarafında ise yalnızca aes128_encrypt () fonksiyonunun uygulanması yeterlidir, bu da enerji verimliliğini artırmaktadır. Her iki taraf, bu mesajlardaki bilgilerle AppSKey ve NwkSKey anahtarlarını AES-128 algoritması kullanarak oluşturmaktadır. Bu işlemde kullanılan algoritmalar IEEE 802.15.4 standardına dayanmaktadır [41] [45] [46].



Şekil 2.4: LoRa ağları için temsili veri şifreleme diyagramı.

2.7.3. LoRa modüllerinin avantaj ve dezavantajları

LoRa modülleri, düşük güçlü geniş alan ağları kategorisinde, uzun menzilli iletişim ve düşük enerji tüketimi özellikleriyle IoT uygulamalarında, kırsal ve kentsel alanlarda birkaç kilometreden onlarca kilometreye kadar veri iletimi sağlayabilme yetenekleriyle ön plana çıkmaktadır. CSS modülasyonu sayesinde, LoRa sinyalleri gürültüye karşı dayanıklıdır ve -148 dBm'ye kadar alıcı hassasiyeti sunabilmektedir. Bu özellikleri ile zorlu çevresel koşullarda bile güvenilir iletişim sağlanabilmektedir. Ayrıca, LoRa modülleri, düşük veri hızları ve enerji verimli protokol yapısıyla pil ömrünü uzatabilmektedirler. Bu nitelik özellikle enerji erişiminin kısıtlı olduğu uygulamalarda büyük bir avantaj sağlamaktadır. LoRaWAN protokolünün AES-128 şifreleme ile uçtan uca veri güvenliği sağlaması ve ağ geçitleri üzerinden binlerce cihazın aynı anda iletişim kurmasına olanak tanınması; akıllı şehirler, tarım, çevresel izleme ve endüstriyel otomasyon gibi geniş ölçekli IoT uygulamaları tercih sebebi oluşturmaktadır.

LoRa teknolojisinin sunduğu avantajlara rağmen, bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Öncelikle, LoRa modülleri düşük veri iletim hızlarına sahip olmaları yüksek bant genişliği gerektiren uygulamalar için uygunluğunu sınırlandırmaktadır. Tipik olarak,

veri hızları 0.3 kbps ile 50 kbps arasında değişmektedir. LoRaWAN protokolünün kullanmakta olduğu erişim yöntemi ağ yoğunluğu arttıkça paket çakışmalarına ve veri kayıplarına yol açabilmektedir. Bu durum, özellikle yüksek yoğunluklu cihaz dağılımlarında ağ performansını olumsuz etkileyebilmektedir. LoRa'nın lisanssız frekans bantlarında çalışması, spektrumda parazit riskini artırabilmekte ve iletişim güvenilirliğini azaltabilmektedir. LoRa teknolojisinin Semtech tarafından geliştirilen tescilli bir teknolojidir olması sebebi standartlaşma ve farklı üreticiler arasında tam uyumluluk konusunda bazı zorluklara neden olabilmektedir [47] [48].

Gündelik yaşam, akademik çalışmalar ve endüstriyel geliştirmelerde birçok LoRa modülü tercih edilmektedir. Bu modüllerin mimarileri oluşturan çiplere ait özelliklerin karşılaştırılmasına Tablo 2.3'te yer verilmiştir. Çalışma kapsamında incelemesi gerçekleştirilen modüllerin özelliklerin karşılaştırılmasına ise Tablo 2.4'te yer verilmiştir.

Tablo 2.3: LoRa modülasyonu çipleri teknik özellik karşılaştırma tablosu [49].

Çip	Frekans Bandı	Maks. Çıkış Gücü	Alıcı Hassasiyeti	Modülasyon Türleri	LoRaWAN Desteği	Uygulama Alanları
LLCC68	410–810 MHz	+22 dBm	-129 dBm	LoRa, (G)FSK	Hayır	Akıllı ev, bina otomasyonu
SX1262	150–960 MHz	+22 dBm	-148 dBm	LoRa, (G)FSK	Evet	LPWAN uygulamaları
SX1268	410–810 MHz	+22 dBm	-148 dBm	LoRa, (G)FSK	Evet	Çin pazarı, LPWAN
SX1281	2.4 GHz	+12.5 dBm	-132 dBm	LoRa, FLRC, GFSK	Hayır	IoT, endüstriyel otomasyon
SX1278	137–525 MHz	+20 dBm	-139 dBm	LoRa, FSK, GFSK	Hayır	Uzun menzilli iletişim
SX1276	137–1020 MHz	+20 dBm	-137 dBm	LoRa, FSK, GFSK	Evet	Geniş bant uygulamaları
SX1301	400–928 MHz	N/A	N/A	LoRa	Evet	LoRaWAN ağ geçitleri
SX1302	400–928 MHz	N/A	N/A	LoRa	Evet	LoRaWAN ağ geçitleri
ASR6505	410–525 MHz	+22 dBm	-140 dBm	LoRa, (G)FSK	Evet	LPWAN, IoT cihazları
ASR6601	150–960 MHz	+29.5 dBm	-148 dBm	LoRa, (G)FSK, BPSK	Evet	LPWAN, IoT cihazları
LR1121	Sub-GHz, 2.4 GHz, S-Band	+14 dBm (Sub-GHz), +11.5 dBm (2.4 GHz)	-130 dBm	LoRa, LR-FHSS, (G)FSK	Evet	Uydu iletişimi, küresel IoT

Tablo 2.4: LoRa modülleri teknik özellikler karşılaştırma tablosu.

Modül	Frekans Bandı	Çıkış Gücü	Menzil	Çipset	Güç Tüketimi	Öne Çıkan Özellikler
E32-433T30D	410–441 MHz	30 dBm	8 km	SX1278	Düşük	Uzun mesafe, UART arayüzü, 1W çıkış gücü
E22-900T30D	850.125–930.125 MHz	30 dBm	10 km	SX1262	Düşük	Gelişmiş LoRa teknolojisi, TTL çıkış, 3.3V/5V IO uyumlu
E70-433NW14+	433 MHz	14 dBm	2.5 km	CC1310	Ultra düşük	Düşük güç tüketimi, endüstriyel kullanım
E220-900T22D	850.125–930.125 MHz	22 dBm	5 km	LLCC68	Düşük	Yeni nesil LoRa teknolojisi, UART arayüzü
RAK3172H	433/470/868/915 MHz	22 dBm		STM32WLE5CC	1.69 μ A (uyku modu)	LoRaWAN 1.0.3 uyumlu, P2P desteği

IoT sistemlerinde sıkça tercih edilmekte olan Bluetooth, Wi-Fi, NFC, Zigbee, NB-IoT, LoRa/LoRaWAN ve GSM teknolojilerin teknik özellikler açısından karşılaştırılmasına Tablo 2.5’te yer verilmiştir.

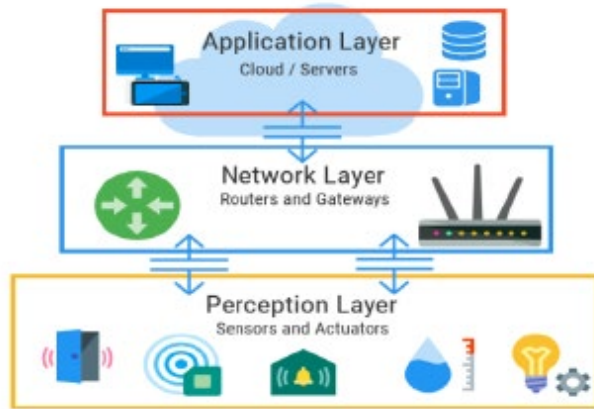
Tablo 2.5: Kablosuz haberleşme teknolojileri karşılaştırma tablosu [35].

Özellik	Bluetooth/BLE	Wi-Fi	NFC	Zigbee	NB-IoT	LoRa/LoRaWAN	GSM
Menzil	Kısa (10m)	Orta (50m)	Çok Kısa	Orta (100m)	Uzun (km)	Uzun (km)	Geniş Alan
Veri Hızı	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
Güç Tüketimi	Düşük	Yüksek	Çok Düşük	Düşük	Çok Düşük	Çok Düşük	Yüksek
Frekans	2.4 GHz	2.4/5 GHz	13.56 MHz	2.4/915/868 MHz	Lisanslı Bant	ISM Bantları	Hücresele Bant
Ağ Topolojisi	Noktadan Noktaya, Mesh	Yıldız	Noktadan Noktaya	Mesh	Yıldız	Yıldız	Hücresele
Lisans Durumu	Lisanssız	Lisanssız	Lisanssız	Lisanssız	Lisanslı	Lisanssız	Lisanslı
Başlıca Kullanım Alanları	Ses, Giyilebilir Teknoloji	İnternet Akıllı Ev	Temassız Ödeme	Otomasyon, Endüstri	Sayaçlar, Takip	Tarım, Şehir	Takip, İzleme

2.8. IoT Teknolojisi ve Bulut Sistemleri

Nesnelerin İnterneti (IoT), fiziksel nesnelerin internet üzerinden birbirleriyle ve merkezi sunucularla veri alışverişi yapabilmesini sağlayan bütünleşmiş bir iletişim ağıdır. Bu sistem sensörler, mikrodenetleyiciler ve yazılımlar gibi gömülü teknolojiler sayesinde çevresel verilerin algılanması, işlenmesi ve kontrol süreçlerinin dijitalleştirilmesine olanak tanımaktadır. IoT teknolojisi sağlık hizmetleri, enerji altyapıları, güvenlik gözetimi ve tarım gibi çeşitli alanlarda kritik işlevlerde tercih edilmektedir. IoT sistemlerinin hızla yaygınlaşması, 2020 yılı itibarıyla dünya

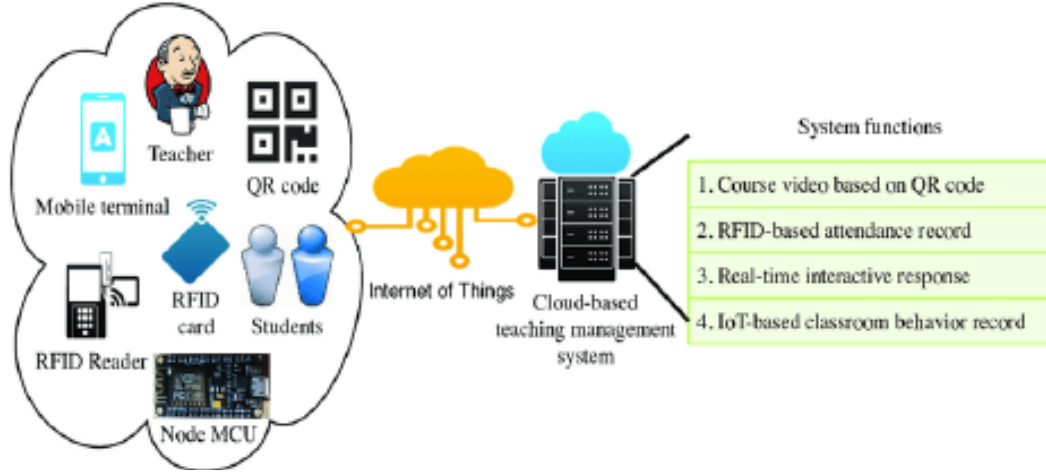
genelinde 20,4 milyardan fazla cihazın IoT ağına entegre olmasını sağlamıştır. Ancak bu hızlı yayılım, bant genişliği, işlem kapasitesi ve enerji kullanımı gibi sınırlamaları da beraberinde getirmekte, bu nedenle IoT cihazlarının bağımsız olarak çalışması yetersiz kalmaktadır. Bulut bilişim, kullanıcıların veri depolama, analiz, hesaplama ve uygulama hizmetlerine internet üzerinden erişmesini sağlayan esnek ve ölçeklenebilir bir bilgi işlem altyapısıdır. IoT sistemleriyle entegrasyonu, kaynak kısıtlı cihazlardan gelen büyük veri hacminin merkezi bir sistemde işlenmesini mümkün kılmaktadır. IoT-Bulut entegrasyonu, özellikle büyük veri işleme, depolama verimliliği ve gerçek zamanlı hizmet sağlama açısından güçlü avantajlar sunmaktadır. Sensörlerden elde edilen veriler, bulut ortamında analiz edilerek karar destek sistemlerinde kullanılmaktadır. IoT-bulut entegrasyonu algı (sensing) katmanı, ağ (network) katmanı ve uygulama (application) katmanı olmak üzere tipik üç katmandan oluşmaktadır. Algı katmanı fiziksel dünyadan sıcaklık, nem, hareket vb. verileri toplamaktadır. Ağ katmanı toplanan verilerin Wi-Fi, LoRa, Zigbee veya Ethernet gibi protokollerle buluta iletilmesini sağlamaktadır. Uygulama katmanı ise bulutta işlenen verileri anlamlandırarak kullanıcı hizmetine sunmaktadır. IoT sistemlerinin başarısı, bu üç katmanın kesintisiz ve verimli entegrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Veri iletimi için RESTful API (Representational State Transfer Application Programming Interface - Temsili Durum Transferi Tabanlı Uygulama Programlama Arayüzü), SOAP (Simple Object Access Protocol – Basit Nesne Erişim Protokolü), CoAP (Constrained Application Protocol – Kısıtlı Uygulama Protokolü) gibi protokoller kullanılmakta olup, bu sayede enerji açısından kısıtlı cihazlar bile minimum kaynakla bulutla iletişim kurabilmektedir [50].



Şekil 2.5: IoT bulut mimarisinde katmanların ifade edilmesi [50].

Bulut servis sağlayıcıları (AWS, Azure, Google Cloud vb.) IoT cihazlarının topladığı verileri RESTful API'ler veya MQTT (Message Queuing Telemetry Transport – Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşıma Protokolü) protokolü üzerinden kabul eder. Bu veriler daha sonra büyük veri (big data) araçlarıyla analiz edilerek, makine öğrenmesi algoritmaları ve karar destek sistemleriyle birleştirilebilir. Böylece örneğin bir tarım uygulamasında toprak nemi ve sıcaklık verilerine göre sulama sistemleri otomatik olarak devreye alınabilmektedir [51].

Abdulkareem ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmalarında oluşturdukları mimari modelde IoT cihazlarının topladığı veriler, öncelikle geçici olarak edge veya fog (sis) bilişim sistemlerinde işlenmesini daha sonra merkezi bulut sistemlerine yönlendirilmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu yapı, veri iletiminde oluşabilecek gecikmeleri azaltmak ve bant genişliğini daha verimli kullanmak için tasarlanmıştır. Çalışmada veri güvenliği için ECG (elektrokardiyogram) sinyali kullanılarak oluşturulan kriptografik anahtarlarla biyomedikal verilerin güvenliğinin artırıldığını belirtilmektedir. Enerji verimliliği sağlamak amacıyla, sanal makine konsolidasyonuna dayalı WAVMCM (Workload Aware Virtual Machine Consolidation Method - Yük Farkındalıklı Sanal Makine Yoğunlaştırma Yöntemi) adlı yöntem ile %15'e varan enerji tasarrufu sağlanmıştır [50].



Şekil 2.6: Çalışmada belirtilen sistemin ağ mimarisi [50].

Nesnelerin İnterneti ve bulut sistemlerinin entegrasyonu hem donanım altyapısı hem de yazılım platformları açısından disiplinler arası bir mühendislik çözümü oluşturmaktadır. IoT-Bulut birlikteliği, düşük maliyetli, merkezi yönetilebilir ve yüksek ölçeklenebilir sistemlerin kurulmasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte,

enerji verimliliği, veri gizliliği, gecikme süreleri ve işlem kapasitesi gibi etmenler oluşturulan sistemlerin verimi için uygun şekilde tasarlanmalıdır.

2.8.1. MQTT protokolü

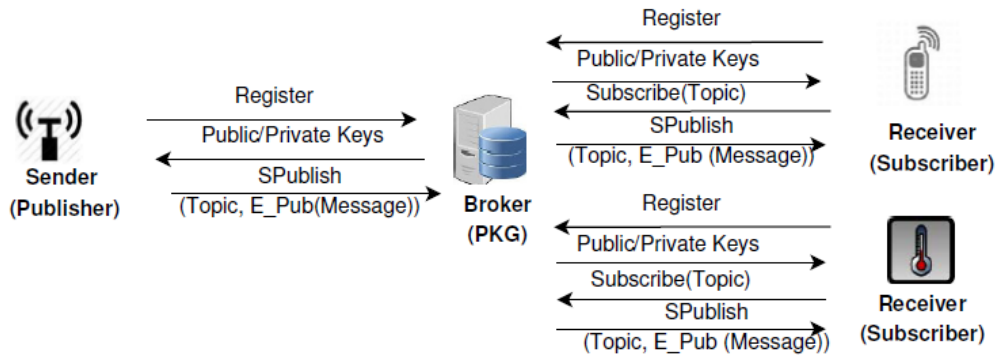
Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol- İletim Denetim Protokolü / İnternet Protokolü) üzerinde çalışan hafif bir mesajlaşma protokolü olarak birlikte publish/subscribe modelini temel almaktadır. Protokol, bir yayıncı (publisher), bir aracı (broker) ve bir abone (subscriber) arasında veri iletimi sağlamaktadır. Yayıncı, belirli bir “topic” altında mesajı broker’a göndermekte broker ise bu mesajı o konuyla ilgilenen abonelere yönlendirmektedir. Bu yapı, veri kaynağı ile tüketici arasında doğrudan bir bağlantı kurulmadan asenkron bir iletişimi mümkün kılmakta olup bu etmen özellikle bant genişliği ve enerji açısından kısıtlı IoT cihazları için oldukça verimli bir çözüm sunmaktadır. MQTT, IoT sistemlerinden gelen verilerin merkezi bulut platformlarına güvenli, ölçeklenebilir ve düşük gecikmeyle iletilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu protokol, uçtan uca gecikmeyi QoS (Quality of Service – Hizmet Kalitesi) düzeyleri aracılığıyla kontrol altına alabilmektedir. QoS 0’da “at most once”, QoS 1’de “at least once” ve QoS 2’de ise “exactly once” garantisi sunulmaktadır. Bu esneklik, farklı veri türlerinin örneğin sıcaklık, konum, alarm vb. güvenilirlik gereksinimlerine göre ayarlanmasını sağlamaktadır. MQTT protokolünün performansı; yayıncı, aracı ve abone bileşenlerinin bulut, edge ya da yerel ağda nasıl konumlandığına bağlı olarak da değişmektedir [52].

MQTT, düşük güç tüketimi ve az bant genişliği gerektiren uygulamalarda yaygınlıkla tercih edilmektedir. Başlıca kullanım alanları arasında akıllı ev sistemleri, sanayi otomasyonu, sağlık izleme sistemleri, akıllı şehir altyapıları, araçlar arası iletişim ve çevresel izleme sistemleri yer almaktadır. Ayrıca sosyal ağlardan üretim tesislerine kadar birçok heterojen sistemde yaygın olarak uygulanmaktadır [53].

MQTT'nin avantajları arasında düşük başlık yükü, enerji verimliliği, TCP'nin güvenli bağlantı altyapısını kullanması ve QoS mekanizmalarıyla esnek veri güvenilirliği sunması ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, “Last Will and Testament” özelliği ile beklenmedik bağlantı kopmaları durumunda sistem durumu hakkında bilgi verilebilmektedir. Ancak, TCP bağlantısı üzerinden çalışması sebebiyle kaynak kısıtlı cihazlar için enerji tüketimi daha yüksek olabildiği durumlar mevcuttur. Ayrıca,

broker bağlantılarının sürekli açık tutulması, büyük ölçekli ağlarda sistem kaynaklarının tükenmesine yol açabilmektedir [54].

MQTT, varsayılan olarak güvenli bir protokol değildir, bu nedenle veri gizliliği, bütünlüğü ve erişim kontrolü gibi güvenlik gereksinimlerinin protokol seviyesinde sağlanması gerekmektedir. Geleneksel çözüm olarak TLS/SSL (Transport Layer Security - Taşıma Katmanı Güvenliği / Secure Sockets Layer - Güvenli Soket Katmanı) kullanımı önerilmektedir fakat bu yapı IoT cihazlarının sınırlı işlem gücü ve bellek kapasiteleri nedeniyle her zaman uygun değildir. Bu problemi aşmak için, literatürde ABE (Attribute Based Encryption - Öznitelik Tabanlı Şifreleme) tabanlı çözümler geliştirilmiştir. Bu çözümlerden biri olan Secure MQTT (SMQTT) mimarisi, mesajların CP-ABE (Ciphertext-Policy ABE - Şifreli Veri Politikası Tabanlı Öznitelik Tabanlı Şifreleme) veya KP-ABE (Key-Policy ABE - Anahtar Politikası Tabanlı Öznitelik Tabanlı Şifreleme) şemalarına göre şifrelenmesini sağlamaktadır. Böylece yalnızca önceden tanımlanmış erişim politikasına sahip olan alıcılar mesajı çözebilmektedir. Bu yaklaşım, son kullanıcıya şifre çözme anahtarları tanımlı olup olmadığını denetleyerek uçtan uca veri güvenliği sağlamaktadır [53].



Şekil 2.7: MQTT için önerilen güvenlik mimarisi şeması [53].

BÖLÜM 3. SİSTEM TASARIMI

Bu bölümde çalışmada kurgulanacak ve uygulanacak sistem tasarımı, sistem bileşenleri ve sistem bileşenlerinin teknik özelliklerine yer verilmiştir. Sistemin kurgusunda yer alan algılayıcı katman nesnelere, sahadaki sensör noktalarından verileri toplayan alıcı ve verilerin bulut ortamına aktarılmasında kullanılan tüm alt sistem ve bileşenler belirtilmiştir.

3.1. LoRa E22-900T22D Modülü

E22-900T22D, Chengdu Ebyte firması tarafından geliştirilen, 850.125 MHz ile 930.125 MHz frekans aralığında çalışan, UART tabanlı bir LoRa modülüdür. Modül, düşük güç tüketimi, yüksek alıcı hassasiyeti ve geniş menzil özelliklerini bir araya getirerek hem endüstriyel hem de gömülü sistemler için optimize edilmiş bir kablosuz iletişim çözümüdür. Bu modül, özellikle enerji kısıtlı IoT cihazları ile uzun menzilli veri iletimi gerektiren uygulamalar için tasarlanmıştır. Yeni nesil LoRa yayılım spektrum teknolojisiyle SX1278 tabanlı klasik çözümlere kıyasla daha uzun iletim mesafesi, daha yüksek hız ve daha düşük güç tüketimi sunmaktadır. Ayrıca çok seviyeli otomatik röle, kanal izleme, uyku modları, şifreli veri iletimi ve kablosuz yapılandırma gibi gelişmiş işlevleri desteklemektedir. Bu sayede, modül; akıllı şehirler, bina otomasyonu, uzaktan sayaç okuma sistemleri, sanayi otomasyonu, akıllı ev çözümleri ve sağlık teknolojileri gibi birçok alanda etkin biçimde kullanılabilir [55].



Şekil 3.1: LoRa E22-900T22D modülü

Modül, LBT (Listen Before Talk – Konuşmadan Önce Dinle) özelliği sayesinde, veri gönderimi öncesinde mevcut kanalın gürültü düzeyini analiz ederek çakışmalı iletimi önlemekte ve ağ içi kararlılığı artırmaktadır. Şifreli iletişimi mümkün kılan CRYPT_H ve CRYPT_L kayıtları aracılığıyla kablosuz ortamda veri güvenliği sağlanabilmekte; kullanıcı tanımlı 16-bit anahtarlarla temel seviye simetrik şifreleme uygulanabilmektedir. Modül ayrıca, farklı uygulama ihtiyaçlarına göre sub-paketleme yapılandırmasını desteklemekte olup, veri yükünü 32, 64, 128 veya 240 baytlık bloklar halinde gönderebilme esnekliği sunmaktadır. E22-900T22D, ağ genişletme açısından da gelişmiş yetenekler taşımaktadır; röle modu sayesinde, belirli adresleme şemalarıyla iki modül arasında tekrarlayıcı görevi üstlenerek uzun mesafelerde veri aktarımını sürdürmektedir. Tüm bu özelliklere ek olarak, derin uyku modu sayesinde modülün bekleme akımı 2 μ A seviyelerine düşmekte ve bu da pil ömrünün maksimum düzeye çıkarılmasına olanak tanımaktadır. Bu teknik yetenekler, E22-900T22D’yi özellikle düşük güç tüketimiyle uzun mesafe haberleşmenin kritik olduğu endüstriyel ve dış ortam IoT uygulamaları için yüksek uyumlulukta bir çözüm haline getirmektedir [55]. Tablo 3.1’de modüle ait teknik özelliklere yer verilmiştir.

Tablo 3.1: LoRa E22-900T22D teknik özellikler tablosu [55].

Kategori	Parametre	Değer
Frekans Bandı	Çalışma Frekansı	850.125 – 930.125 MHz (varsayılan: 868.125 MHz)
Çıkış Gücü	Maksimum TX Gücü	22 dBm (ayarlanabilir: 10/13/17/22 dBm)
Alıcı Hassasiyeti	RX Sensitivite	-148 dBm (0.3 kbps veri hızında)
Hava Veri Hızı	Ayarlanabilir Aralık	0.3 kbps – 62.5 kbps
İletim Mesafesi	Açık Alanda (ideal koşullar)	Maks. 5 km (anten yüksekliği 2.5 m, 2.4 kbps)
Güç Tüketimi	TX / RX / Uyku	140 mA / 11 mA / 2 μ A
Çalışma Gerilimi	Besleme Aralığı	2.3 V – 5.5 V (≥ 3.3 V önerilir)
Çalışma Sıcaklığı	Endüstriyel Kullanım Aralığı	-40°C ile +85°C
Modül Boyutu	Fiziksel Boyutlar	21 x 36 mm
Arayüz	Veri İletimi	UART (TTL)
Anten Bağlantısı	Konnektör Tipi	SMA-K, 50 Ohm
Şifreleme	Kablosuz Şifreleme Desteği	2 Byte (CRYPT_H / CRYPT_L) AES benzeri sistem
Çalışma Modları	Normal, WOR, Konfigürasyon, Uyku	M1/M0 pin kombinasyonu ile seçilir
Ağ Özellikleri	Röle Modu, Broadcast, Sabit Nokta İletimi	Desteklenir

3.2. LoRa E22-900T30D Modülü

E22-900T30D, Chengdu Ebyte firması tarafından geliştirilen ve SX1262 çipi temelinde tasarlanmış, UART arayüzlü, 30 dBm çıkış gücüne sahip, yüksek performanslı bir LoRa modülüdür. 850.125 MHz ile 930.125 MHz frekans bandında çalışmakta olup varsayılan olarak 868.125 MHz ayarlıdır. SX127x serisine kıyasla daha yüksek iletim gücü, daha uzun mesafe ve daha düşük güç tüketimi ile öne çıkmaktadır. Bu modül, özellikle uzun menzil, düşük enerji tüketimi ve yüksek veri güvenliği gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. E22-900T30D; akıllı şehir sistemleri, bina otomasyonu, sanayi tipi uzaktan kontrol çözümleri, sağlık teknolojileri, akıllı ev sistemleri, güvenlik alarm sistemleri ve otomotiv uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Ayrıca desteklediği çok katmanlı röle iletişimi, AES benzeri veri şifreleme, LBT (kanal dinleme), hava üzerinden uyandırma (Air Wake-Up) ve uzaktan kablosuz konfigürasyon gibi gelişmiş fonksiyonları ile güvenilir, özelleştirilebilir ve endüstriyel düzeyde kararlı bir iletişim altyapısı sunmaktadır. SX1262 tabanlı mimarisi, daha düşük enerji tüketimiyle daha uzun mesafelerde kararlı veri iletimi sağlamaktadır. Modül, Air Wake-Up özelliğiyle ultra düşük enerji tüketimi gerektiren batarya destekli uygulamalarda kullanılmak üzere optimize edilmiştir. LBT mekanizması sayesinde veri gönderimi öncesinde kanal gürültüsü ölçülerek çakışma riski en aza indirilir ve zorlu RF ortamlarda bile veri iletiminin başarımlı oranı artırılmaktadır [56].



Şekil 3.2: LoRa E22-900T30D modülü

Modül, kullanıcıya özel tanımlanan 2 baytlık şifreleme anahtarı ile veri paketleri kablosuz ortamda şifrelenerek veri güvenliği sağlanmaktadır. Konfigürasyon işlemleri hem kablolu hem de kablosuz komut setleri aracılığıyla uzaktan yapılabilmektedir, bu da sahada modül yapılandırması gerektirmeyen sistem tasarımlarına olanak sunmaktadır. Modül Normal, WOR (Wake On Radio – Radyo Tetiklemeli Uyanma), Konfigürasyon, Uyku olmak üzere dört farklı çalışma moduna sahiptir ve AUX

(Auxiliary -Yardımcı/İkincil/Ek) pin durumu kullanılarak modlar arası geçiş güvenli şekilde yapılabilir. Bu sayede hem yazılım esnekliği hem de donanımda enerji verimliliği sağlanabilmektedir [56]. Tablo 3.2’de modüle ait teknik özelliklere yer verilmiştir. Çalışmada bu modül uzak mesafedeki binalarda ve alıcı noktasında kullanılmıştır.

Tablo 3.2: LoRa E22-900T30D teknik özellikler tablosu [56].

Kategori	Parametre	Değer
Frekans Bandı	Çalışma Frekansı	850.125 – 930.125 MHz (varsayılan: 868.125 MHz)
Çıkış Gücü	Maksimum TX Gücü	30 dBm (ayarlanabilir: 21/24/27/30 dBm)
Alıcı Hassasiyeti	RX Sensitivite	-148 dBm (2.4 kbps hızda)
Hava Veri Hızı	Ayarlanabilir Aralık	0.3 kbps – 62.5 kbps
İletim Mesafesi	Açık Alan (ideal koşullarda)	Maks. 10 km (5 dBi anten, 2.5 m yükseklik)
Güç Tüketimi	TX / RX / Uyku	650 mA / 16 mA / 2 μ A
Çalışma Gerilimi	Besleme Gerilimi	3.3 – 5.5 V (\geq 5.0 V önerilir)
Çalışma Sıcaklığı	Endüstriyel Sıcaklık Aralığı	-40°C ile +85°C
Modül Boyutu	Fiziksel Ölçü	24 x 43 mm
Veri Arayüzü	Haberleşme	UART (TTL seviyesi)
Paketleme Tipi	Donanım Formatı	DIP
Anten Tipi	Konnektör Tipi	SMA-K, 50 Ohm
Şifreleme Desteği	Kablosuz Şifreleme	2 Byte (CRYPT_H / CRYPT_L) AES benzeri yapı
Çalışma Modları	Normal, WOR, Konfigürasyon, Uyku	M1/M0 pin kombinasyonları ile seçilir
Ağ Yeteneği	Röle ve Ağ Geçidi İşlevleri	Röle modu, sabit nokta ve yayın iletimi destekli
Uyumluluk	Donanım Uyumluluğu	E32 serisi ile pin uyumlu

3.3. LoRa E22 Modülleri Parametre Ayarları

LoRa E22 modüllerinin birbirleri ile haberleşme süreçlerinin gerçekleştirilebilmesi için modüllere kullanılmadan önce tercih edilecek konfigürasyonlar bağlamında parametre ayarlarının yüklenmesi gerekmektedir. Bu işlem gömülü yazılım süreciyle birlikte gerçekleştirilebileceği gibi Ebyte firması tarafından Lora E22 modülleri için geliştirilen RF_Setting(E22-E90(SL)) programıyla da gerçekleştirilebilmektedir.

Bu programda LoRa modüllerinin kullanılacak uygulamada modüller için tercih edilecek Baud Rate, Parity, Air Rate, Packet Size, WOR Role, Power, Tran Mode,

Relay Mode, Packet ve Channle RSSI konfigürasyonları belirlenebileceği gibi modüller arası haberleşmede kritik öneme sahip olan adres ve kanal tanımlamalarıyla birlikte veri güvenliği için tercihen kullanılabilir NET ID ve Key tanımlamaları gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma kapsamında parametre ayarları program aracılığı yerine gömülü yazılıma entegrasyon seçeneğiyle modüllere yüklenmiştir.

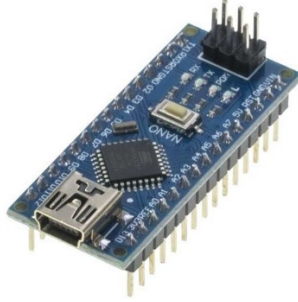


Şekil 3.3: RF-Setting programı arayüzü.

3.4. Arduino Nano

Arduino Nano, kompakt boyutu ve ATmega328 mikrodenetleyici tabanlı yapısı sayesinde gömülü sistemler ve prototipleme projeleri için sıklıkla tercih edilen düşük maliyetli bir geliştirme kartıdır. 16 MHz'lik saat frekansı ile çalışan bu 8-bit mikrodenetleyici, düşük güç tüketimi ve çok yönlü haberleşme arayüzleri ile donatılmıştır. Nano kartı mini-USB portu ve 20 dijital I/O pini ile breadboard tabanlı uygulamalar için ideal bir platform sunmaktadır. Kullanım alanları arasında akıllı cihazlar, çevre izleme, robotik kontrol, güvenlik sistemleri (ör. biyometrik geçiş sistemleri), kablosuz haberleşme modül entegrasyonu ve IoT veri toplama sistemleri yer almaktadır. Kartın düşük güç modları ve geniş giriş voltaj aralığı (7–15 V harici besleme veya doğrudan 5 V regüleli giriş) sayesinde, taşınabilir sistemlerde uzun süreli batarya çalışması sağlanabilmektedir. Ayrıca Arduino IDE, CLI ve Cloud Editor

desteği ile hızlı prototipleme süreçlerinde yeni başlayanlar ve ileri düzey kullanıcılar için kolay kullanım imkânı sunmaktadır [57].



Şekil 3.4: Arduino Nano kartı

Arduino Nano, enerji tüketimini optimize etmek amacıyla çeşitli uyku modlarıyla işlemciyi bekleme durumunda düşük enerji tüketimine geçirebilmektedir. Ayrıca 3.3 V ve 5 V çıkışları sayesinde farklı voltaj seviyelerine sahip çevresel bileşenlerle çalışmak mümkündür. USB programlama desteği ile, Arduino IDE veya bulut tabanlı editörlerle kolayca yazılım geliştirme ve yükleme işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Fiziksel olarak küçük boyutları sayesinde kart, breadboard uyumlu tasarımlara entegre edilebilir ve taşınabilir gömülü sistemlerde ideal bir çözüm sunmaktadır [57]. Çalışmada sahadan veri alınan sensör noktalarında gömülü yazılımın gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Arduino Nano kartına ait teknik özelliklere Tablo 3.3'te yer verilmiştir.

Tablo 3.3: Arduino Nano kartı teknik özellikleri [57].

Kategori	Parametre	Değer
Mikrodenetleyici	Model	ATmega328 (8-bit AVR mimarisi)
Saat Frekansı	İşlemci Frekansı	16 MHz
Program Hafızası	Flash Bellek	32 KB (2 KB bootloader için ayrılmış)
SRAM	Geçici Bellek	2 KB
EEPROM	Kalıcı Bellek	1 KB
Dijital Giriş/Çıkış	Dijital Pin Sayısı	20 (6 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir)
Analog Girişler	ADC Giriş Sayısı	8 (10-bit çözünürlükte)
PWM Kanalları	Pulse Width Modulation	6 kanal (D3, D5, D6, D9, D10, D11)
Seri Arayüzler	Haberleşme Protokolleri	UART, SPI, I2C (TWI)
Giriş Voltajı (VIN)	Harici Giriş Voltajı	7–15 V
Çalışma Voltajı	Kart İşletim Gerilimi	5 V (regüleli) / 3.3 V çıkış destekli
USB Bağlantısı	Programlama / Güç	Mini-B USB
Uyku Modları	Güç Tasarrufu	Idle, Power-save, Standby, Power-down
Fiziksel Boyutlar	Genişlik x Uzunluk	18 mm x 45 mm (yaklaşık)
Çalışma Sıcaklığı	Sıcaklık Aralığı	-40°C ila +85°C
Uyumluluk	Geliştirme Ortamları	Arduino IDE, CLI, Arduino Cloud Editor

3.5. ESP32 Devkit Modülü

ESP32-WROOM-32, çift çekirdekli düşük güç tüketimli Xtensa LX6 mikrodenetleyici mimarisi üzerine inşa edilmiş, dahili Wi-Fi (802.11 b/g/n) ve Bluetooth v4.2 (BR/EDR ve BLE) kablosuz bağlantı desteğine sahip gelişmiş bir IoT modülüdür. Bu özellikleri sayesinde, hem düşük güçlü sensör ağları gibi enerji verimliliği odaklı uygulamalarda hem de ses kodlama, müzik akışı ve dijital medya çözümü gibi işlem gücü gerektiren yüksek performanslı görevlerde kullanılabilir.



Şekil 3.5: ESP32-WROOM32 modülü

Modül; akıllı ev sistemleri, endüstriyel otomasyon, giyilebilir teknolojiler, kablosuz haberleşme, uzaktan çevre izleme sistemleri, akıllı şehir uygulamaları, medikal cihazlar ve endüstriyel IoT platformlarında geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır. Geniş çevre birimi desteği ile mikrodenetleyici sistemlerine kolay entegre edilebilmektedir [58]. Modüle ait teknik özelliklere tablo 3.4’te yer verilmiştir.

Tablo 3.4: ESP32- WROOM32 teknik özellikler tablosu [58].

Kategori	Parametre	Değer
Mikrodenetleyici	İşlemci Çekirdeği	2x Xtensa® 32-bit LX6 (240 MHz’e kadar)
Kablosuz Bağlantı	Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n (150 Mbps’e kadar)
	Bluetooth	v4.2 BR/EDR + BLE
Hafıza	RAM	520 KB dahili SRAM
	ROM	448 KB
	Flash	4 MB SPI NOR Flash (entegre)
İletişim Arayüzleri	UART, SPI, I2C, I2S, SDIO, PWM, TWAI (CAN 2.0)	Desteklenir
Analog Girişler	ADC / DAC	18 kanal ADC (12-bit), 2 kanal DAC
Çalışma Gerilimi	Besleme Gerilimi	3.0 V – 3.6 V (tipik 3.3 V)
Güç Tüketimi	Ortalama Akım	80 mA (aktif), 10 µA (derin uyku)
Çalışma Sıcaklığı	Termal Aralık	-40 °C ile +85 °C
Fiziksel Boyutlar	Modül Ölçüleri	18 mm × 25.5 mm × 3.1 mm

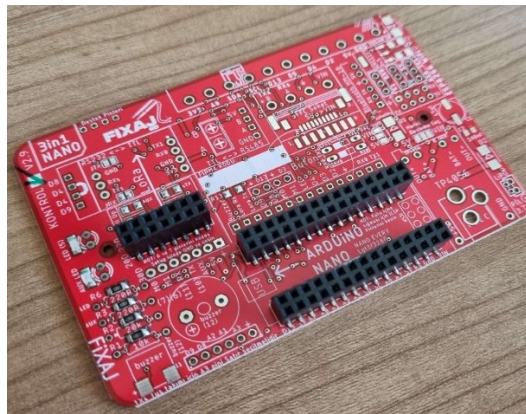
Tablo 3.4(Devam): ESP32- WROOM32 teknik özellikler tablosu [58].

Kategori	Parametre	Değer
Wi-Fi Frekans Aralığı	RF Spektrum	2412 ~ 2484 MHz
Bluetooth Gücü	BLE TX Güç Aralığı	-12 dBm ~ +9 dBm
Anten Yapısı	Entegre PCB Anteni veya U.FL Harici Anten Opsiyonu	Değişkendir (modeline göre)
GPIO Sayısı	Dijital Giriş/Çıkış	Maks. 34 GPIO
Uyku Modları	Güç Yönetimi	Modem Sleep, Light Sleep, Deep Sleep
Geliştirme Desteği	SDK ve Platformlar	ESP-IDF, Arduino, PlatformIO, MicroPython

3.6. Fixaj 3in1 Nano PCB Shield

Fixaj 3in1 Nano PCB Shield, Arduino Nano ile E22 veya E32 LoRa modüllerinin entegrasyonunu kolaylaştırmak amacıyla tasarlanmış, hazır lehimli ve tak-çalıştır özellikli bir geliştirme kartıdır. Bu kart, kablosuz haberleşme projelerinde hızlı prototipleme ve modüler sistem tasarımı için optimize edilmiştir.

Üzerinde bulunan lehimli soketler sayesinde, Arduino Nano ve LoRa modülleri doğrudan karta takılarak kullanılabilir. Ayrıca, RF ayarlarının PC üzerinden yapılabilmesi için gerekli bağlantılar da sağlanmıştır. Kart, enerji yönetimi ve çevresel entegrasyon açısından da zengin özellikler sunmaktadır. Lipo pil desteği, TP4056 şarj yönetim sistemi, güneş paneli girişi ve barrel jack ile harici besleme gibi enerji seçenekleri mevcuttur. Ayrıca, RS232 ve RS485 dönüştürücü bağlantıları, 11'li klemens çıkışı, membran tuş takımı ve buzzer gibi çeşitli çevresel bağlantılar için hazır yerler bulunmaktadır. Bu özellikler, kartın endüstriyel otomasyon, uzaktan izleme sistemleri, akıllı tarım uygulamaları ve IoT projeleri gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını mümkün kılmaktadır [59].



Şekil 3.6: Fixaj 3in1 Nano PCB Shield kartı

Fixaj 3in1 Nano PCB Shield kartına ait teknik özelliklere Tablo 3.5’te yer verilmiştir.

Tablo 3.5: Fixaj 3in1 Nano PCB Shield kartı teknik özellikleri [59].

Kategori	Parametre	Değer
Uyumlu Geliştirme Kartı	Arduino Nano	ATmega328 tabanlı
Uyumlu LoRa Modülleri	E22, E32	Ebyte serisi
Lehim Durumu	Hazır Lehimli	Tak-çalıştır soketler
Enerji Girişi	Barrel Jack, Lipo Pil, Güneş Paneli	5V–9V (ideal 5V)
Şarj Yönetimi	TP4056 Modülü Desteği	Lipo pil şarjı
Haberleşme Arayüzleri	UART, RS232, RS485	Seri iletişim protokolleri
GPIO Çıkışları	11’li Klemens	Arduino portlarından çıkış alma
Ekstra Donanım Desteği	Membran Tuş Takımı, Buzzer, FFC Soket	Kullanıcı arayüzü ve ekran bağlantıları
ESP8266 Bağlantısı	Hazır Bağlantı Noktası	Wi-Fi modülü entegrasyonu
Kasa Uyumluluğu	ABS Baskılı CNC Kesim Kutular	Fiziksel koruma ve montaj kolaylığı
Boyutlar	Standart Arduino Nano Shield Boyutları	Yaklaşık 53 mm x 68 mm
Kanal ve Adres Ayarı	RF Setting Programı ile PC üzerinden	LoRa modül parametre ayarları

3.7. 5.0dB 900 MHz Anten

5.0 dBi kazançlı anten, LoRa, GSM, 3G, 4G LTE ve NB-IoT gibi kablosuz iletişim protokolleriyle uyumlu olarak tasarlanmıştır. Geniş frekans desteği sayesinde, IoT cihazları, uzaktan izleme sistemleri, akıllı tarım uygulamaları, endüstriyel otomasyon ve kablosuz sensör ağları gibi çeşitli alanlarda etkin bir şekilde kullanılabilir.



Şekil 3.7: 5.0dB 900 MHz anten.

Dikey polarizasyonu ve çok yönlü yayılım deseni sayesinde, sinyal kapsama alanını maksimize etmektedir. SMA (SubMiniature version A – Alt Minyatür Tip A Konnektör) erkek konnektörü ile çeşitli cihazlara kolayca bağlanabilir ve PCB yapısı sayesinde kompakt sistemlerde kullanım için idealdir. TPE malzemenin kullanılması sayesinde kullanım için idealdir.

olup, zorlu çevre koşullarında karşı dayanıklılık sağlamaktadır [60]. Anten ait teknik özelliklere Tablo 3.6’da yer verilmiştir.

Tablo 3.6: Antene ait teknik özellikler tablosu [60].

Kategori	Parametre	Değer
Frekans Aralığı	Desteklenen Bantlar	698–960 MHz, 1710–2700 MHz
Kazanç	Anten Kazancı	5.0 dBi
VSWR	Yansıma Katsayısı	≤ 1.5
Empedans	Anten Empedansı	50 Ohm
Polarizasyon	Sinyal Polarizasyonu	Dikey (Vertical)
Radyasyon Deseni	Yayılm Tipi	Omnidirectional (Çok yönlü)
Konektör Tipi	Bağlantı Arayüzü	SMA Erkek
Boyutlar	Fiziksel Ölçüler	Yaklaşık 190 mm uzunluk, 15 mm çap
Ağırlık	Net Ağırlık	Yaklaşık 18 gram
Malzeme	Gövde Malzemesi	TPE (Termoplastik Elastomer)
Maksimum Güç	Güç Kapasitesi	20 W
Çalışma Sıcaklığı	Sıcaklık Aralığı	-40°C ila +85°C
Uygulama Alanları Kullanım Senaryoları LoRa, GSM, 3G, 4G LTE, NB-IoT, Wi-Fi, Zigbee		

3.8. HDC 1080 Sıcaklık ve Nem Sensörü

HDC1080, entegre sıcaklık ve bağıl nem (RH) ölçüm yeteneklerine sahip, düşük güç tüketimli ve yüksek doğrulukta çalışan dijital bir çevresel sensördür. I²C (Inter-Integrated Circuit - Entegreler Arası İletişim Protokolü) arayüzü üzerinden veri alışverişi sağlayan bu sensör, 2.7V ile 5.5V arasında değişen besleme gerilimi ile çalışabilir ve 14-bit çözünürlükte ölçüm gerçekleştirebilmektedir. Sensörün sıcaklık doğruluğu tipik olarak $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, nem doğruluğu ise $\pm 2\% \text{RH}$ düzeyindedir.



Şekil 3.8: HDC 1080 sıcaklık ve nem sensörü.

HDC1080, iklimlendirme sistemleri, akıllı termostatlar, beyaz eşyalar, medikal cihazlar, el tipi ölçüm cihazları, akıllı ev sistemleri, kablosuz sensör ağları ve IoT tabanlı veri toplama platformları gibi çok çeşitli uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Sensör, ölçüm sırasında tipik olarak yalnızca 1.3 μA akım tüketmektedir. Enerji verimliliği sağlayan uyku modu (100 nA tipik) ve sıcaklık kompansementine

karşı stabil ölçüm yetenekleri sayesinde özellikle batarya ile çalışan sistemlerde ve uzun süreli çevresel izlemelerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Dahili kalibrasyon katsayıları, sensörlerin üretim aşamasında programlanmakta olup, son kullanıcı için ek kalibrasyon ihtiyacı bulunmamaktadır. Ayrıca, cihazın entegre ısıtıcısı, yüksek nemde oluşabilecek kondenzasyon ve sensör sapmalarını gidermek amacıyla kullanılabilir [61]. HDC 1080 sıcaklık ve nem sensörüne ait teknik özelliklere Tablo 3.7’de yer verilmiştir.

Tablo 3.7: HDC 1080 sıcaklık ve nem sensörü teknik özellikler tablosu [61].

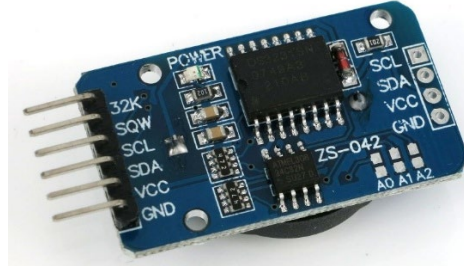
Kategori	Parametre	Değer
Nem Ölçüm Doğruluğu	± 2 %RH (25°C, 20–80% RH)	Tipik
Sıcaklık Ölçüm Doğruluğu	± 0.2 °C (5–60°C arası)	Tipik
Nem Çözünürlüğü	8, 11, 14 bit seçilebilir	Programlanabilir
Sıcaklık Çözünürlüğü	11 veya 14 bit	Programlanabilir
İletişim Arayüzü	I ² C	400 kHz'ye kadar
Güç Tüketimi	Ortalama 1.3 μ A (1 Hz RH+Temp ölçümü)	Ultra düşük güç
Uyku Modu Akımı	100 nA	Tipik
Çalışma Gerilimi	2.7V – 5.5V	
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ila +125°C	Tam sıcaklık aralığı
Nem Çalışma Aralığı	0% – 100% RH (yoğuşmasız)	Önerilen 10% – 70% RH
Dijital Çıkış	16-bit sıcaklık ve nem verisi	I ² C ile aktarım
Kalibrasyon	Fabrika kalibrasyonlu	OTP hafızada kayıtlı
Boyutlar	3 mm x 3 mm x 0.8 mm (6-pin WSON)	Küçük form faktörü
ESD Dayanımı	2 kV (HBM), 500 V (CDM)	Endüstriyel ortam uyumu
Entegre Isıtıcı	Nem kalibrasyonunda drift giderimi için	HEAT bitiyle kontrol edilebilir

3.9. DS3231 RTC Modülü

DS3231, entegre sıcaklık kompanzasyonlu kristal osilatör ve kristal yapısı sayesinde yüksek doğrulukta çalışan, düşük maliyetli ve I²C protokolü ile haberleşen bir gerçek zaman saati modülüdür. Dahili saat ve takvim bileşenleri; saniye, dakika, saat, gün, tarih, ay ve yıl bilgisini tutarak ve artık yıllar dahil olmak üzere otomatik düzeltme yapabilmektedir. ± 2 ppm'lik frekans doğruluğu sayesinde yıllık sapma 1 dakika seviyesindedir.

Bu modül, sıcaklık kompanzasyonlu yapısıyla klasik kristalli RTC çözümlerine kıyasla daha yüksek zaman tutarlılığı sağlar ve entegre sıcaklık sensörü ile dijital ortam izleme de gerçekleştirebilmektedir. DS3231, harici güç kesintilerinde çalışmasına

devam edebilmek için yedek batarya desteğine sahiptir. Ayrıca, iki adet programlanabilir alarm, programlanabilir kare dalga çıkışı ve kristal yaşlandırma düzeltme özellikleriyle donatılmıştır.



Şekil 3.9: DS3231 RTC modülü.

INT/SQW pini, hem alarm uyarı çıkışı hem de kare dalga üretici olarak çift işlevli kullanılabilir. Entegre sıcaklık sensörü, her 64 saniyede bir ölçüm olarak osilatör frekansını kalibre eder ve böylece farklı çevresel koşullarda bile zaman doğruluğunu korumaktadır.

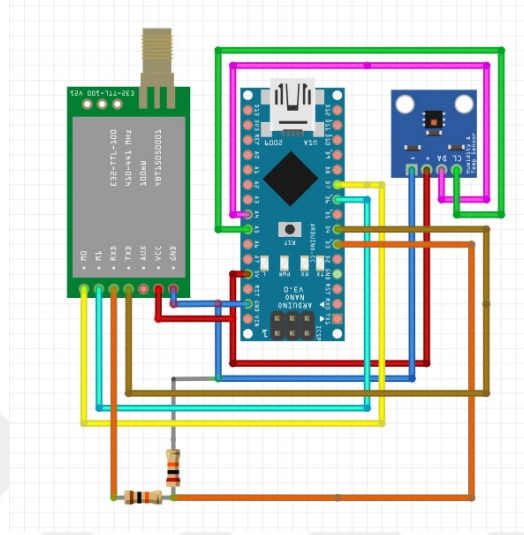
DS3231, gömülü sistemler, IoT cihazları, akıllı tarım, medikal izleme, otomasyon sistemleri, veri kaydediciler, enerji sayaçları ve GPS eş zamanlama uygulamaları gibi alanlarda yoğun biçimde kullanılmaktadır [62]. DS3231 modülüne ait teknik özelliklere Tablo 3.8’de yer verilmiştir.

Tablo 3.8: DS3231 RTC modülü teknik özellikler tablosu [62].

Kategori	Parametre	Değer
Saat Doğruluğu	TCXO ile Frekans Sapması	± 2 ppm ($0^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$), ± 3.5 ppm ($-40^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$)
Sıcaklık Sensörü	Dahili Dijital Sensör, $\pm 3^{\circ}\text{C}$ doğruluk	10-bit çözünürlükte
İletişim Arayüzü	I ² C (Fast mode: 400 kHz)	7-bit adres: 0x68
Zaman Formatı	12 saat / 24 saat destekli	AM/PM göstergesi mevcut
Alarm Sayısı	2 adet	Programlanabilir zaman ve tarih alarmı
Kare Dalga Çıkışı	INT/SQW pini üzerinden	1Hz, 1.024kHz, 4.096kHz, 8.192kHz seçenekleri
Güç Girişi	VCC	2.3V – 5.5V
Yedek Güç (VBAT)	Lityum Pil ile çalışabilir	2.3V – 5.5V
Zaman Saklama Akımı	VBAT üzerinden	Tipik 0.84 μA
Çalışma Sıcaklığı	Endüstriyel aralık	$-40^{\circ}\text{C} - +85^{\circ}\text{C}$
Fiziksel Paket	16-pin SO (300-mil)	Standart yüzey montaj (SMT)
RTC Belleği	Kullanıcı alanı (buffer)	7 byte
Kalibrasyon Özelliği	Kristal yaşlandırma düzeltme	8-bit register (± 5 ppm)
Reset Girişi	RST pini	Düğme veya voltaj düşümü ile tetiklenebilir
32kHz Çıkışı	Ayrı pin üzerinden	Açılıp kapatılabilir, harici sistemlerle senkron

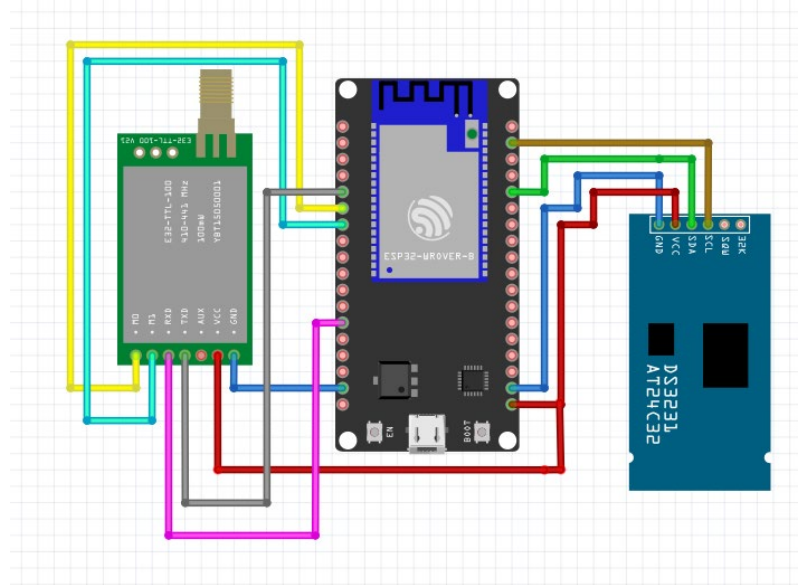
3.10. Bağlantı Şemaları

Sistem bünyesindeki alıcı nokta ve verici sensör noktalarının fiziksel bağlantıları kurulum kolaylığı açısından Fixaj 3in1 Nano PCB Shield kartları üzerinde gerçekleştirilmiş olmasına rağmen verici sensör noktalarının temel bağlantı şeması Şekil 3.10’da belirtilmiştir.



Şekil 3.10: Verici sensör noktası bağlantı şeması.

Alıcı noktasında yer alan bileşenler de Fixaj 3in1 Nano PCB Shield üzerinde ve ekstradan manuel bağlantılarla bütünleştirilmiş olup, bağlantı şemasına Şekil 3.11’de yer verilmiştir.



Şekil 3.11: Alıcı noktası bağlantı şeması.

3.11. Gömülü Yazılım

Oluşturulan sistemde verici noktalarında ortam nem ve sıcaklığının alınabilmesi amacıyla HDC 1080 sıcaklık nem sensörleri, LoRa modülleri ve Arduino Nano kartları Fixaj 3in1 Nano PCB Shield kartı üzerinde montajlanmıştır. Birbirinden farklı 4 merkezde yer alan verici sensör noktalarındaki LoRa modüllerinde adres bilgisi olarak 1,2,3,4 numaraları adresler atanmış olmakla birlikte hem verici hem de alıcı noktasındaki LoRa modüllerinin haberleşme işlemini gerçekleştirebilmesi için ortak olması zorunlu olan kanal bilgisi “20” olarak belirtilmiştir. Ek olarak şifreli haberleşme protokolü için NET ID olarak da “63” değeri atanmıştır. Alıcı noktasında bulunan LoRa modülünde ise adres bilgisi “5” olarak tanımlanmakla birlikte kanal ve NET ID bilgileri vericilerle aynı şekilde oluşturulmuştur. Tablo 3.9’da verici modüllerin Tablo 3.10’da alıcı modülün sözde kod dizinine yer verilmiştir.

Tablo 3.9: Verici modül sözde kod dizini.

Verici Modül Sözde Kod Dizini
Kütüphaneler tanımlanır: LoRa_E22, SoftwareSerial, Wire, HDC1080
HDC1080 sıcaklık ve nem sensörü nesnesi oluşturulur
SoftwareSerial üzerinden LoRa iletişimi başlatılır
M0 ve M1 pinleri çıkış olarak tanımlanır
Seri haberleşme başlatılır
LoRa parametreleri yapılandırma fonksiyonu çağrılır
LoRa çalışma modu (normal) LOW, LOW olarak ayarlanır
HDC1080 sensörü başlatılır (I2C adresi: 0x40)
Sistem başlatılıyor mesajı seri porta yazdırılır
Ana döngü başlatılır
HDC1080’den sıcaklık verisi okunur ve data.temp’e atanır
HDC1080’den nem verisi okunur ve data.nem’e atanır
Veri paketine konum bilgisi yazılır: "T3_OFIS"
Veri paketine cihaz ID bilgisi yazılır: 2
Sıcaklık ve nem değeri seri porta yazdırılır
LoRa ile sabit adresli veri gönderimi yapılır
30 saniye beklenir ve döngü tekrarlanır
LoRaE22Ayarlar fonksiyonunda yapılandırma okunur
Modül parametreleri ayarlanır

Tablo 3.10: Alıcı modül sözde kod dizini.

Alıcı Modülü Sözde Kod Dizini
Gerekli kütüphaneler tanımlanır
RTC ve LoRa_E22 nesnesi oluşturulur
Modül adresi, kanal ve ağ kimliği sabitleri tanımlanır
Veri yapısı tanımlanır ve şifre, ID, konum, sıcaklık ve nem alanları oluşturulur
Serial iletişim başlatılır ve kısa gecikme verilir
Arduino IoT Cloud yapılandırması başlatılır
LoRa haberleşmesi başlatılır
LoRa ayarları yapılandırılır (LoraE22Ayarlar fonksiyonu çağrılır)
LoRa çalışma modu normal moda alınır
Ana döngü başlatılır: ArduinoCloud.update() ile IoT güncellenir
LoRa ile veri beklenir: receiveMessage ile gelen veri alınır
Veri şifresi kontrol edilir: 'SUBU_2025' ise işlem devam eder
RTC'den güncel tarih ve saat alınır
Alınan veri seri porttan zaman damgası ile yazdırılır
Veri içerisindeki ID'ye göre gelen konuma ait sıcaklık ve nem bilgileri ayrıştırılır
ID 1 ise T1_OFIS verileri işlenir
ID 2 ise T3_OFIS verileri işlenir
ID 3 ise T4_OFIS verileri işlenir
ID 4 ise T4_ROTASAM verileri işlenir
Alınan veri işleminden sonra bellek temizlenir:
LoRa parametre ayarlarını tanımlanır.

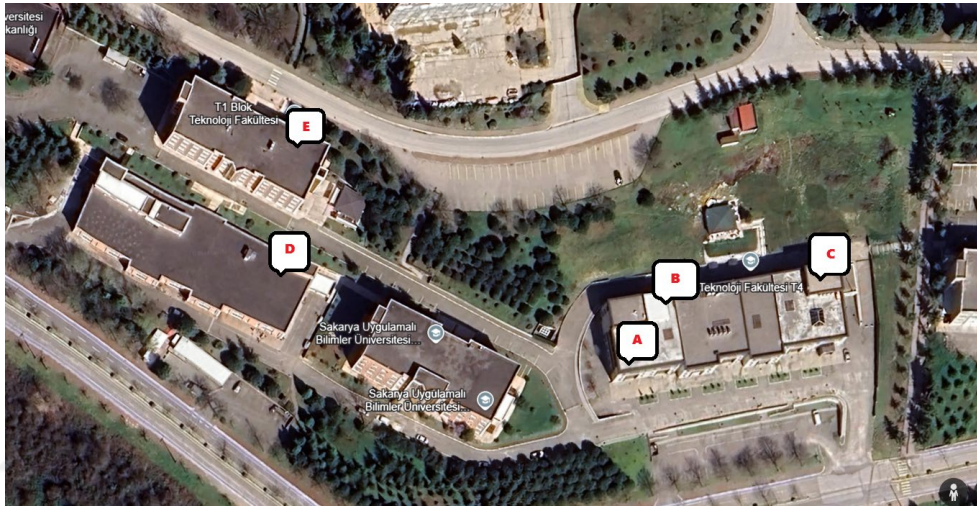
3.12. Arduino IoT Cloud

Arduino IoT Cloud, Arduino tarafından geliştirilen ve kullanıcıların mikrodenetleyici tabanlı projelerini internet üzerinden kolayca yönetmelerine olanak tanıyan kapsamlı bir platformdur. Bu platform, cihazların uzaktan izlenmesi, kontrol edilmesi ve veri analizi gibi işlemleri kolaylaştırarak, özellikle eğitim, endüstri ve hobi amaçlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada ise düşük maliyetli bir bulut sistemi ihtiyacı sebebiyle tercih edilmiş olup sahadan toplanan verilerin tek merkezden izlenebilmesi ve kayıt altına alınabilmesi amacıyla kullanılmıştır. Arduino IoT Cloud servisine ait özelliklere Tablo 3.11'de yer verilmiştir.

Tablo 3.11: Arduino IoT Cloud servisi özellik tablosu.

Özellik	Açıklama
Cihaz Desteği	Arduino Nano 33 IoT, MKR WiFi 1010, MKR GSM 1400, MKR NB 1500, Portenta H7, ESP32, ESP8266 ve diğer uyumlu kartlar.
Dashboard Özelleştirme	Sürükle-bırak yöntemiyle grafiksel arayüz oluşturma; gösterge, anahtar, harita, grafik gibi 15'ten fazla widget desteği.
Over-the-Air (OTA) Güncellemeler	Uyumlu cihazlara kablosuz yazılım güncellemeleri yapabilme özelliği.
Cihazlar Arası İletişim	Farklı cihazlar arasında doğrudan veri alışverişi yapabilme imkanı.
Mobil Uygulama	Arduino IoT Remote uygulaması ile cihazları Android ve iOS üzerinden uzaktan kontrol etme ve izleme.
API ve SDK Desteği	REST API, Python, JavaScript/Node.js istemcileri ile entegrasyon ve otomasyon imkanı.
Veri Saklama Süresi	Ücretsiz planda 1 gün, ücretli planlarda 15 gün ile 1 yıl arasında değişen veri saklama süreleri.
Plan Seçenekleri	Ücretsiz, Maker, Okul ve Kurumsal olmak üzere farklı ihtiyaçlara yönelik planlar.
Güvenlik	HTTPS, MQTT ve TLS şifreleme protokolleri ile güvenli veri iletimi.
Ek Araçlar	Arduino Create Agent (cihaz bağlantısı), Cloud CLI (komut satırı aracı), otomatik sketch oluşturucu.

Gerçekleştirilen test sonucunda verici modülün en son B ve C noktalarında alıcı modüle sinyal gönderdiği tespit edilmiştir. Alıcı merkez ile B noktası arası kuş uçuşu mesafe Google Earth Uydu Servisi vasıtasıyla 532 metre, C noktası ile kuş uçuşu mesafe ise 326 metre olarak ölçülmüştür. Gerçekleştirilen saha mesafe testi sonucunda çalışmanın planlandığı binalar arasında yeterli olacağı tespit edilmiştir. Temsili yerleşke binaları arası için Şekil 4.2’de belirtildiği üzere A noktası alıcı olarak tanımlanırken B, C, D ve E noktaları verici noktalar olarak tespit edilmiştir. B ve C noktaları alıcı merkez ile aynı binada olmakla birlikte D ve E noktaları ise aynı birimin diğer binaları olmaları sebebiyle tercih edilmiştir.



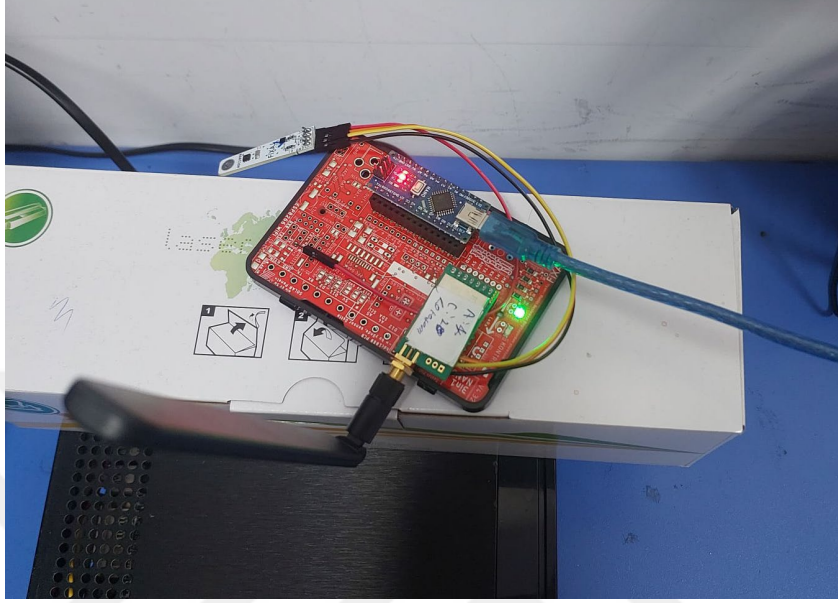
Şekil 4.2: Çalışmada verici modüllerin yerleştirileceği konumlar.

Alıcı modülün bulunduğu merkez nokta ile verici modüllerin yerleştirileceği noktalar arası mesafe teorik olarak modüllerin sahip olduğu menzil yeteneğinin altında kalmış olarak görünmesine karşılık, bina duvarları, bina içi ve bina dışı radyo frekans yoğunlukları ve diğer dış etmenler göz önüne alındığında uygulamanın hedefleri arasında olan yerleşke alanlarındaki binalar arası veri iletişimi için tercih edilen modüllerin yeterli oldukları saptanmıştır.

4.2. Alıcı – Verici Modüllerin Yerleştirilmesi ve Saha Çalışması

Verici modüllerin yerleştirileceği konumların tespit edilmesi sürecinin ardından sistemin devreye alınabilmesi amacıyla B ve C noktalarına LoRa E22-900T22D modülleri, HDC 1080 sıcaklık ve nem sensörü ve Arduino Nano kartından oluşan verici sistemleri yerleştirilmiştir. Vericilerin ihtiyaç duydukları güç ise Arduino Nano kartının USB portuna bağlanan 5V çıkış gerilimine sahip adaptörlerle

gerçekleştirilmiştir. D ve E noktalarında ise benzer sistem LoRa E22-900T30D modülü entegre edilerek düzenlenmiştir. Şekil 4.3'te B ve C noktalarına yerleştirilen vericilerin Şekil 4.4'te ise D ve E noktalarına yerleştirilen vericilerin görsellerine yer verilmiştir.



Şekil 4.3: B ve C noktalarına yerleştirilen verici modülü devresi.



Şekil 4.4: D ve E noktalarına yerleştirilen verici modülü devresi.

Alıcı noktasında ise vericiler arası haberleşmeyi gerçekleştirmek üzere LoRa E22-900T30D modülü, gelen verilerin gerçek zamanlı kaydedilebilmesi amacıyla DS3231 RTC modülü ve gelen verilerin Arduino IoT Cloud bulut servisine aktarılabilmesi için ESP32 Devkit kartın ve ESP32 Devkit kartının ihtiyaç duyduğu internet erişimi için bir mobil telefon internet erişim noktasından oluşan alıcı devresi yerleştirilmiştir. Alıcı noktasında verici noktalarından gelen verilerin bulut ortamına aktarılmasıyla eş zamanlı olarak yerel olarak da kaydedilmesine ihtiyaç duyulması sebebiyle verici modül yerel veri kaydının gerçekleştirileceği bilgisayara USB arayüzü ile bağlanmıştır. Bu bağlantı ile hem yerel veri kaydı için serial port haberleşmesi gerçekleştirilebilmiş hem de alıcı modülün ihtiyaç duyduğu enerji sağlanmıştır. Şekil 4.5'te alıcı devrenin görseline yer verilmiştir.

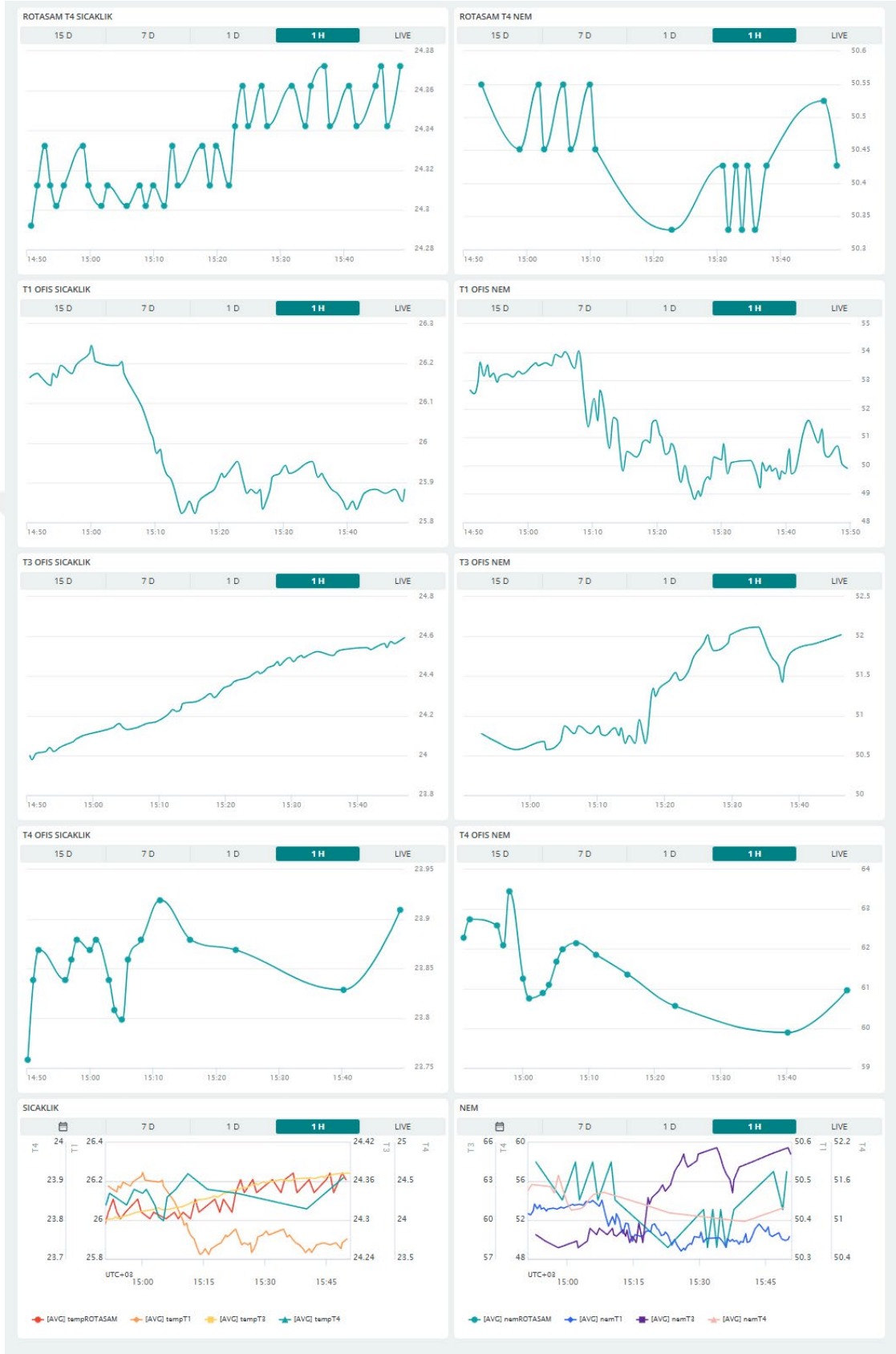


Şekil 4.5: Alıcı modülü devresi.

4.3. Saha Verilerinin Bulut Sistemine Aktarılması

Çalışma sürecinde B, C, D ve E noktalarında bulunan vericiler LoRa modülasyon üzerinden gerçekleştirdikleri radyo frekans haberleşme ile A noktasında yer alan alıcıya buldukları konumlarıdaki ortamların nem ve sıcaklık değerlerini şifreli olarak iletimini gerçekleştirmişlerdir. Bu haberleşmenin gerçekleştirilmesinin ardından alıcıda toplanan saha verileri hem uzaktan izlenebilirlik sağlanması amacıyla hem de bulut ortamında da yedeklenmesi amacıyla Arduino IoT Cloud bulut servisine MQTT protokolü kullanılarak aktarılmıştır. Bunun için öncelikle Arduino IoT Cloud servisinde dışarıya veri paylaşımı olmayan özel bir hesap oluşturulmuş olup akabinde

sistemde yer alan ESP32 Devkit bu bulut sistemine sadece bu cihaza ait oluşturulan bir anahtar ile entegre edilmiştir. Anahtar hem gömülü yazılımın barındığı alıcı modülünde hem de bulut servisinde yer aldığı için bu anahtar ile veri güvenliği gerçekleştirilmiştir. Bulut servisi ile alıcı modül arası bağlantının kurulmasının ardından ise bulut sistemine aktarılan verilerin görselleştirilebilmesi amacıyla bulut sistemi arayüzünde bir gösterge paneli tasarlanmıştır. Gösterge paneline ait görsele Şekil 4.6’da yer verilmiştir. Bu gösterge panelinde B, C, D ve E noktalarında yer alan verici modüllerin her biri için ayrı ayrı sıcaklık ve nem değerleri yansıtılmıştır. Ek olarak tüm noktalara ait sıcaklık ve nem değerleri ayrı birer grafik olarak gösterge paneline yerleştirilmiştir. Verilerin gösterge panelinde ayrı ayrı detaylı görselleştirilmesine ek olarak sıcaklık ve nem verilerinin toplu birer grafikte görselleştirilmesindeki amaç tüm noktalardaki değerleri tek bir grafikte görselleştirip noktalar arası oluşan değer farklarının kolay tespit edilebilmesini sağlamaktır. Bulut sistemi mevcut yapısı gereği B, C, D ve E noktalarından gelen verileri anlık olarak görselleştirebildiği gibi bu verileri kayıt altına alarak saatlik, günlük, haftalık ve 15 günlük değerler olarak da grafiklerle görselleştirebilmektedir. Çalışmada bulut servisi olarak Arduino IoT Cloud servisinin tercih edilme sebebi düşük maliyetli olmasının yanı sıra desteklemiş olduğu ürün yelpazesinin oldukça geniş olmasıdır. Ek olarak Arduino IoT Cloud bulut servisinde B, C, D ve E noktalarından aktarılan verilerin zaman damgası ile birlikte depolanabilip daha sonra ihtiyaç halinde istenilen formatta edinilebilir olması da etkili olmuştur. Bunun yanı sıra Arduino IoT Cloud bulut servisi sahip olduğu çeşitli entegrasyon servisleri ile verilerin başka platformlara aktarılmasına da olanak sağlamaktadır. Tüm bu sebeplerle çalışmada bu servis kullanım kolaylıklarıyla birlikte tercih edilmiştir.



Şekil 4.6: Bulut sisteminin gösterge paneli arayüzü görseli.

4.4. Verilerin Yerel Olarak Kaydedilmesi

Sistemde yer alan verici noktalarında gelen verilerin hem yedeklemek amacıyla hem de oluşturulacak algoritmalarda kullanılabilmesi amacıyla bulut harici bir sistemde kaydedilmesi gerekmektedir. Bu amaçla alıcı devresinde yer alan ESP32 Devkit modülü USB arayüzü ile yerel veri kaydının gerçekleştirileceği bilgisayara bağlanmış ve serial port haberleşmesi gerçekleştirilmiştir. Python programlama diliyle yazılan bir mini program aracılığıyla ESP32 Devkit modülünden aktarılan veriler bir .csv uzantılı dosyaya kaydedilmiştir. Programın kaynak kodlarına Tablo 4.1’de yer verilmiştir.

Tablo 4.1: Gelen verileri lokal olarak kaydeden programın kaynak kodları.

Gelen Verileri Yerel Olarak Kaydeden Program

```
import serial
import time
import os
port = 'COM9'
baudrate = 9600
masaustu_yolu = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "Desktop")
dosya_adi = os.path.join(masaustu_yolu, "esp_veri_1.csv")
with open(dosya_adi, 'w', encoding='utf-8') as dosya:
    dosya.write("Zaman,Veri\n")
try:
    ser = serial.Serial(port, baudrate, timeout=1)
    time.sleep(2)
    print(f"[INFO] '{dosya_adi}' dosyasına kayıt başlatıldı...")
except Exception as e:
    print(f"[HATA] Seri port bağlanamadı: {e}")
    exit()
with open(dosya_adi, 'a', encoding='utf-8') as dosya:
    while True:
        try:
            satir = ser.readline().decode('utf-8').strip()
            if satir:
                zaman = time.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
                kayit = f"{zaman},{satir}"
                print(kayit)
                dosya.write(kayit + '\n')
        except KeyboardInterrupt:
            print("\n[INFO] Kayıt işlemi manuel olarak durduruldu.")
            break
        except Exception as hata:
            print(f"[HATA] Veri okuma hatası: {hata}")
```

Bu dosyada RTC modülü ve bilgisayarın zaman dilimiyle ayrı ayrı zaman damgaları, verilerin geldiği konum bilgisi ve id numarası ile belirtilen noktalardan gelen sıcaklık ve nem değerleri yer almaktadır. Tablo 4.2’de lokal olarak kaydedilen verilerin bir kısmına tablo olarak yer verilmiştir.

Tablo 4.2: Lokal olarak kaydedilen veri kesiti tablosu.

Zaman Damgası	Konum	ID	Sıcaklık (C°)	Nem (%)	Bilgi Notu
7.05.2025 12:34	T1_OFIS	id: 1	25.40	46.98	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:34	T3_OFIS	id: 2	24.39	53.44	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:34	T1_OFIS	id: 1	25.39	47.17	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:34	T3_OFIS	id: 2	24.38	53.44	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:34	T4_OFIS	id: 3	23.44	55.24	T4_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:35	ROTASAM	id: 4	24.99	50.18	T4_ROTASAM verisi geldi
7.05.2025 12:35	T1_OFIS	id: 1	25.38	46.88	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:35	T3_OFIS	id: 2	24.39	53.44	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:35	T1_OFIS	id: 1	25.39	47.08	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:35	T3_OFIS	id: 2	24.38	53.44	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:35	T4_OFIS	id: 3	23.43	55.13	T4_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:36	ROTASAM	id: 4	25.13	50.18	T4_ROTASAM verisi geldi
7.05.2025 12:36	T1_OFIS	id: 1	25.38	46.98	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:36	T3_OFIS	id: 2	24.38	53.53	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:36	T1_OFIS	id: 1	25.39	47.28	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:36	T3_OFIS	id: 2	24.39	53.53	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:36	T4_OFIS	id: 3	23.46	54.94	T4_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:37	ROTASAM	id: 4	24.89	50.48	T4_ROTASAM verisi geldi
7.05.2025 12:37	T1_OFIS	id: 1	25.45	47.38	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:37	T3_OFIS	id: 2	24.39	53.53	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:37	T1_OFIS	id: 1	25.46	47.05	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:37	T3_OFIS	id: 2	24.39	53.53	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:37	T4_OFIS	id: 3	23.46	54.94	T4_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:38	ROTASAM	id: 4	24.80	51.20	T4_ROTASAM verisi geldi
7.05.2025 12:38	T1_OFIS	id: 1	25.46	46.95	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:38	T3_OFIS	id: 2	24.38	53.34	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:38	T1_OFIS	id: 1	25.43	46.88	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:38	T3_OFIS	id: 2	24.38	53.64	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:38	T4_OFIS	id: 3	23.44	55.04	T4_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:39	ROTASAM	id: 4	24.66	51.50	T4_ROTASAM verisi geldi
7.05.2025 12:39	T1_OFIS	id: 1	25.45	47.17	T1_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:39	T3_OFIS	id: 2	24.38	53.44	T3_OFIS verisi geldi
7.05.2025 12:39	T1_OFIS	id: 1	25.45	47.08	T1_OFIS verisi geldi

4.5. Verilerin Yorumlanması ve Tahmin Algoritması

Çalışmanın bu kısmında, bir yerleşkedeki farklı konumlarda ölçülen sıcaklık ve nem verileri kullanarak, kısa vadeli iç ortam koşullarının tahmin edilmesi ve ISO 7730 termal konfor standardına dayalı olarak konum bazlı öneriler sunulması amaçlanmıştır. Tahmin aşamasında Python programlama dili tercih edilmiş, veri bilimi, makine öğrenmesi ve çevresel analiz disiplinlerinden faydalanılmıştır.

İlk olarak, çeşitli odalarda konumlandırılmış sıcaklık-nem sensörlerinden elde edilen veriler, kullanıcı tarafından düzenli olarak güncellenen ve veriler.xlsx adlı Excel dosyasında depolanan bir formatta analiz edilmiştir. Bu veri seti, dört temel sütundan oluşmaktadır: tarih-zaman damgası, konum bilgisi, sıcaklık ve bağıl nem. Verilerin okunması ve işlenmesi için Python'un veri analizi kütüphanesi olan pandas kullanılmıştır. read_excel() fonksiyonu yardımıyla veriler doğrudan çalışma dosyasından okunmuş, tarihsel sütun datetime veri tipine dönüştürülmüş ve eksik veya hatalı gözlemler dropna() yöntemiyle temizlenmiştir. Verilerin kullanılabilirliğini artırmak amacıyla, tüm sayısal sütunlar to_numeric() işlevi ile dönüştürülerek olası karakter tabanlı veri girişlerinden arındırılmıştır. Bu ön işleme adımı, veri modelleme sürecinin doğruluğunu artırmak açısından kritik önem taşımaktadır.

İç ortam sıcaklığı ve nem değerlerinin zaman içinde gösterdiği eğilimi tahmin edebilmek için Python'un scikit-learn kütüphanesi içerisinde yer alan LinearRegression sınıfı kullanılarak her bir konum için ayrı regresyon modelleri oluşturulmuştur. Zaman serisi temelli bu uygulamada, datetime değerleri UNIX zaman damgalarına (timestamp) dönüştürülmüş ve bu değerler bağımsız değişken (X), sıcaklık ve nem gözlemleri ise bağımlı değişken (y) olarak modele dahil edilmiştir.

Regresyon modeli eğitildikten sonra, her konum için bir haftalık ileriye dönük tahmin gerçekleştirilmiştir. Tahminler, geçmişteki veri eğilimine dayalı olarak, her gün için sıcaklık ve nem değerlerinin hesaplanmasını sağlamıştır. Modelleme sonucunda elde edilen değerlerin doğruluğu, gözlemlerle örtüşecek düzeyde anlamlı bulunmuştur. Ayrıca dış ortam koşullarının iç ortama olan etkisini de dikkate almak amacıyla, OpenWeatherMap API üzerinden dış ortam sıcaklık ve bağıl nem verileri çekilmiş ve bu dış parametreler günlük ortalama değerler olarak sistemde referans alınmıştır.

Çalışmada, uluslararası kabul görmüş ISO 7730 standardı referans alınarak termal konfor değerlendirmesi yapılmıştır. ISO 7730, iç mekanlardaki termal konforu

değerlendirmek için PMV (Predicted Mean Vote – Tahmin Edilen Ortalama Oy) ve PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied - Tahmin Edilen Memnuniyetsiz Yüzdesi) gibi metrikleri temel alan bir standarttır. Bu çalışmada, PMV hesaplaması yapılmadan, sıcaklık ve nem değerlerine dayalı öneri sistemleri ISO 7730'un kış mevsimi için önerilen iç ortam sıcaklığı 20–24 °C, yaz mevsimi için önerilen iç ortam sıcaklığı: 23–26 °C, ve önerilen bağıl nem aralığı (her mevsim): %30–60 parametrelerine göre oluşturulmuştur.

Öneri algoritması dış ortam sıcaklıkları ≥ 28 °C olduğunda 23,5 °C, ≤ 10 °C olduğunda 22,0 °C ve ara sıcaklıklarda 23,0 °C referans değerlerini temel almıştır. Ayrıca bu değerlere konuma ve güne göre 0,1–0,3 °C'lik mikro sapmalar uygulanarak, her konumun özgün yapısal veya fiziksel farklılıklarına göre önerilen sıcaklıklar çeşitlendirilmiştir.

Önerilen bağıl nem değeri de sabit bir değer yerine, dış ortam bağıl nemi ve tahmin edilen iç ortam nemi arasında %75 dış, %25 iç ağırlıklı bir ağırlıklı ortalama hesaplanarak oluşturulmuştur. Bu yöntem, dış ortamın iç ortama olan etkisini hesaba katarak daha gerçekçi bir öneri profili oluşturmayı amaçlamıştır.

Tüm konumlar için günlük sıcaklık ve nem tahminlerinin yanı sıra ISO 7730'a dayalı öneriler de grafiksel olarak sunulmuştur. Python'un matplotlib kütüphanesi ile her konum için iki adet grafik oluşturulmuştur. Bu grafiklerden biri tahmini sıcaklık ve önerilen sıcaklığı karşılaştırırken, diğeri tahmini nem ve önerilen nemi göstermektedir. Bu grafikler, zaman ekseninde tahmin edilen değerlerin konfor referans aralıklarıyla olan ilişkisini açıkça ortaya koymakta ve sistemin öneri doğruluğunu görsel olarak da değerlendirme olanağı sunmaktadır.

Bu sistem, sahadan gelen sıcaklık ve nem verilerini sadece raporlamakla kalmayıp, aynı zamanda ileriye dönük tahminlerde bulunarak her bir odaya özel iklimlendirme önerileri sunmaktadır. Literatürde genellikle genel alan tahminlerine dayalı konfor sistemleri yer alırken, bu çalışmada konum bazlı mikro-öneri mekanizması geliştirilmiş ve bu yönüyle farklılaşmıştır.

Çalışma bağlamında tahmin algoritması sonucunda Tablo 4.3'te sensör noktaları için sunulan haftalık tahmin ve öneri çıktısına yer verilmiştir.

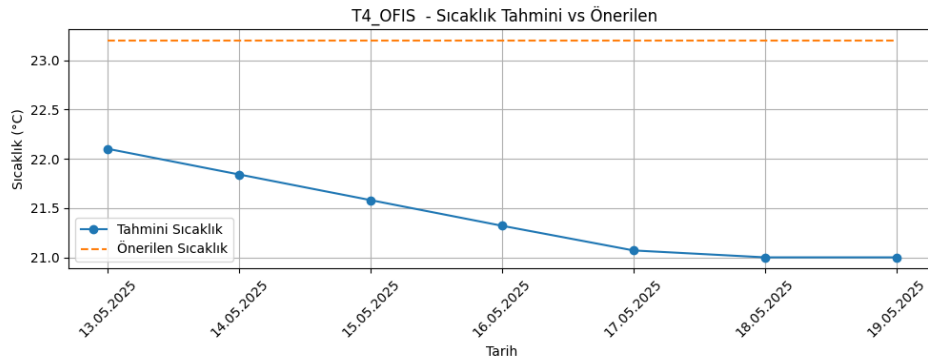
Tablo 4.3: Sensör noktaları için sunulan tahmin algoritması veri çıktısı tablosu.

Tarih	Konum	Tahmini Sıcaklık (C°)	Tahmini Nem (%)	Önerilen Sıcaklık (C°)	Önerilen Nem (%)	Meteoroloji Hava Sıcaklık (C°)	Meteoroloji Hava Nem (%)
13.05.2025	T3 OFİS	21.00	45.49	23.1	57.56	21.9	68.0
14.05.2025	T3 OFİS	21.05	42.80	23.1	56.06	21.5	56.8
15.05.2025	T3 OFİS	21.00	41.50	23.1	56.06	22.7	54.8
16.05.2025	T3 OFİS	21.14	59.03	23.1	56.06	21.7	64.8
17.05.2025	T3 OFİS	21.12	60.00	23.1	58.00	23.4	66.8
18.05.2025	T3 OFİS	21.29	48.56	23.1	56.06	17.6	69.1
19.05.2025	T3 OFİS	21.00	60.00	23.1	60.00	20.01	68.4
13.05.2025	T1 OFİS	21.00	60.00	22.8	60.00	21.9	68.0
14.05.2025	T1 OFİS	21.00	60.00	22.8	57.56	21.5	56.8
15.05.2025	T1 OFİS	22.18	59.03	22.8	56.06	22.7	54.8
16.05.2025	T1 OFİS	21.00	60.00	22.8	60.00	21.7	64.8
17.05.2025	T1 OFİS	21.56	60.00	22.8	56.06	23.4	66.8
18.05.2025	T1 OFİS	21.02	60.00	22.8	58.00	17.6	69.1
19.05.2025	T1 OFİS	21.23	60.00	22.8	57.56	20.01	68.4
13.05.2025	T4 OFİS	21.10	45.49	22.9	53.48	21.9	68.0
14.05.2025	T4 OFİS	21.84	43.66	22.9	51.52	21.5	56.8
15.05.2025	T4 OFİS	21.58	41.84	22.9	58.00	22.7	54.8
16.05.2025	T4 OFİS	21.32	40.01	22.9	59.61	21.7	64.8
17.05.2025	T4 OFİS	21.07	38.18	22.9	60.00	23.4	66.8
18.05.2025	T4 OFİS	21.00	36.36	22.9	51.52	17.6	69.1
19.05.2025	T4 OFİS	21.00	45.49	22.9	59.61	20.01	68.4
13.05.2025	ROTASAM	22.98	42.80	23.1	60.00	21.9	68.0
14.05.2025	ROTASAM	22.69	41.50	23.1	60.00	21.5	56.8
15.05.2025	ROTASAM	22.41	40.21	23.1	52.94	22.7	54.8
16.05.2025	ROTASAM	22.13	38.91	23.1	51.12	21.7	64.8
17.05.2025	ROTASAM	21.85	37.61	23.1	57.73	23.4	66.8
18.05.2025	ROTASAM	21.56	36.32	23.1	59.46	17.6	69.1
19.05.2025	ROTASAM	21.28	35.02	23.1	60.00	20.01	68.4

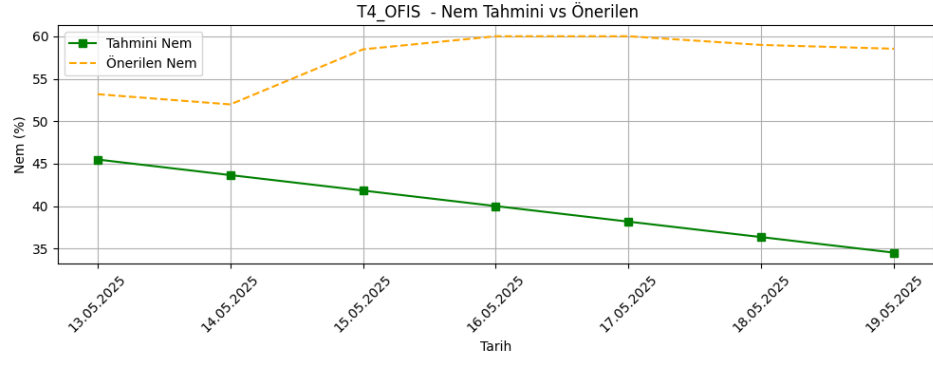
Tablo 4.3'te çalışma sürecinde son kayıt tarihi 12/05/2025 olan veri kümesinden hareketle bir haftalık bir tahmin çıktısı ifade edilmektedir. Çıktı tablosunda yer alan tahmini sıcaklık ve tahmini nem değerleri belirtilen konumlar için iç mekan sıcaklık ve nem değerlerinin tahmini verilerini ifade etmektedir. Belirtilen tahmini değerler veri tabanında yer alan geçmiş verilerden türetilmiştir. Önerilen sıcaklık ve nem değerleri ise ISO 7730 standartları çerçevesinde tahmini sıcaklık ve nem verilerine göre belirtilen tarihlerde belirtilen konumlar için önerilmekte olan sıcaklık ve nem değerlerini ifade etmektedir. Meteoroloji hava sıcaklığı ve nem değerleri ise belirtilen tarihlerde ofislerin bulunduğu konum için öngörülen ve meteorolojik merkezlerden çekilen tahmini dış mekan sıcaklık ve nem verilerini ifade etmektedir.

Çalışmada gelecek verilere yönelik tahminlerde Lineer Regresyon kullanılmasının sebebi sıcaklık ve nem gibi çevresel değişkenlerin kısa vadeli zaman serilerinde çoğunlukla lineer eğilimler gösterme eğiliminde bulunmalarıdır. Lineer regresyon, zaman ile ölçüm değerleri arasındaki doğrusal ilişkiyi hızlı ve anlaşılır biçimde modelleyerek, her konum için özelleştirilmiş tahminlerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, veri setinin ölçek olarak küçük ve gürültüsüz olması, daha karmaşık modellere gerek kalmadan lineer modellerin yüksek açıklama kabiliyetiyle sonuç üretmesini sağlamıştır. Bunun yanı sıra, modelin hesaplama açısından hafif olması, gömülü sistemler veya bulut dışı çözümler için avantaj sunmaktadır.

Şekil 4.7'de sensör noktalarından biri için oluşturulan tahmini ve önerilen sıcaklık grafiği çıktısına yer verilirken Şekil 4.8'de ise sensör noktalarından biri için tahmini ve önerilen nem grafiği çıktısına yer verilmiştir.



Şekil 4.7: Bir sensör noktası için tahmini ve önerilen sıcaklık grafiği çıktısı.



Şekil 4.8: Bir sensör noktası için tahmini ve önerilen nem grafiği çıktısı.

BÖLÜM 5. BULGULAR VE SONUÇ

Bu çalışmada, bir yerleşke ortamındaki farklı iç mekân noktalarına yerleştirilen sıcaklık ve nem sensörlerinden elde edilen çevresel verilerin değerlendirilmesi ve bu veriler doğrultusunda konum bazlı termal konfor önerileri sunan akıllı bir sistem geliştirilmiştir. Sistem, LoRa tabanlı kablosuz iletişim altyapısı ile dağıtık sensörlerden toplanan verileri Arduino IoT Cloud platformu aracılığıyla merkezi bir sunucuda toplamış ve ardından bu verileri Python ortamında analiz ederek kısa vadeli tahminler gerçekleştirmiştir. Verilerin tahmini ve yorumlanmasında scikit-learn kütüphanesi kullanılarak her konum için ayrı ayrı Linear Regression modelleri eğitilmiş ve bu modeller ile bir haftalık ileriye dönük sıcaklık ve nem tahminleri yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda tahmin edilen sıcaklık ve nem değerlerinin, önceki gözlemlerle anlamlı derecede örtüştüğü görülmüştür. Sistemin önerdiği sıcaklık ve nem aralıkları, dış ortam koşullarının etkisini de dikkate alacak şekilde dinamik olarak belirlenmiştir. Bu amaçla OpenWeatherMap API kullanılarak günlük dış ortam sıcaklık ve bağıl nem değerleri elde edilmiş ve iç ortam koşulları üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Tahmin edilen iç ortam değerleriyle dış ortam verileri birlikte ele alınarak ISO 7730 standardında belirtilen konfor aralıklarına göre kişiselleştirilmiş öneriler oluşturulmuştur. ISO 7730'a göre iç ortam sıcaklıklarının kış aylarında 20–24 °C, yaz aylarında ise 23–26 °C arasında olması gerektiği belirtilmiş, bağıl nem için ise tüm yıl boyunca %30–60 aralığı referans alınmıştır.

Sistemin sunduğu haftalık tahmin ve öneriler, matplotlib kütüphanesi kullanılarak her bir konum için ayrı ayrı görselleştirilmiştir. Her sensör noktası için oluşturulan iki ayrı grafik ile bir yanda tahmin edilen sıcaklık değerleri ve önerilen konfor sıcaklıkları, diğer yanda ise tahmin edilen bağıl nem ile önerilen nem seviyeleri zaman ekseninde karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu sayede sistemin tahmin başarısı ve öneri doğruluğu, görsel olarak da değerlendirilebilir hâle getirilmiştir.

Çalışmadan tasarlanan ve uygulanan sistemin haberleşme altyapısı olarak Wi-Fi ya da LTE teknolojileri ile kurgulanmasına dair karşılaştırmaya Tablo 5.1’de yer verilmiştir. Karşılaştırma işlemi gerçekleştirilirken belirtilen kriterler üzerinde aynı sistemin LoRa, Wi-Fi ve LTE teknolojileri ile kurgulanması karşılaştırılmış öne çıkan özelliklerle basit puanlamaya tabi tutulmuştur.

Tablo 5.1: Sistem kurgusu karşılaştırma tablosu.

Karşılaştırma Kriteri	LoRa	Wi-Fi	LTE
İletişim Menzili	+1	-1	0
Enerji Tüketimi (Batarya Ömrü)	+1	-1	-1
Veri Aktarım Hızı (kbps)	-1	+1	+1
Kurulum Maliyeti	+1	0	-1
Mevcut Altyapıya Bağımsızlık	+1	0	-1
İç Mekan Performansı	+1	+1	-1
Açık Alan Performansı (Parazit Direnci)	+1	-1	0
Şifreli Veri İletimi	+1	+1	+1
Donanım Uyumu ve Gömülü Sistem Entegrasyonu	+1	+1	-1
Bulut Entegrasyon Uyumu	+1	+1	+1
Kurulum ve Bakım Kolaylığı	+1	+1	-1
Toplam Puan	+10	2	-3

Tablo 5.1’de de belirtildiği üzere çalışma kapsamında kurgulan sistemin haberleşme katmanı için en uygun haberleşme teknolojisinin LoRa teknolojisi olduğu sonucuna açıkça ulaşılmaktadır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda geliştirilen sistemin sadece mevcut çevresel koşulları izlemekle kalmadığını, aynı zamanda ileriye dönük önerilerde bulunabilen karar destek mekanizmasına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Konum bazlı öneri mekanizması sayesinde her bir oda için farklı ve özelleştirilmiş sıcaklık-nem hedef değerleri elde edilerek, konfor düzeyi artırılmakta ve enerji verimliliği gözetilerek iklimlendirme sistemlerinin daha optimize çalışması sağlanmaktadır. Bu yönüyle

Çalışma, literatürde yaygın olan genel ortalama temelli sistemlerden farklılaşarak daha yüksek çözümlüklü çevresel kontrol yaklaşımlarına katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu alışma, LoRa tabanlı dağıtık veri toplama ağı ile desteklenen, Python ortamında işlenerek ISO 7730 termal konfor standartlarına dayalı mikro-öneri üretebilen bir iç ortam izleme ve değerlendirme sisteminin etkinliğini göstermiştir. Geliştirilen sistemin, daha geniş ölçekli kampüsler, fabrikalar veya kamu binalarında yaygınlaştırılabilir bir altyapı sunduğu düşünölmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, öneri sistemine PMV/PPD hesaplamalarının entegre edilmesi, enerji tüketimi ile ilişkilendirilerek optimizasyon yapılması ve kullanıcı geri bildirimlerinin de modele dahil edilmesi önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Tunalı, D. (2025). Türkiye’de Nesnelerin İnterneti Kullanımı ve Çoklu Uyum Analizi ile İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 27(1), 210-224. <https://doi.org/10.32709/akusosbil.1295122>
- [2] Erdal, E., & Ergüzen, A. (2020). Nesnelerin İnterneti (IoT). *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3), 24-34. <https://doi.org/10.29137/umagd.827676>
- [3] Polak, L., & Milos, J. (2020). Performance analysis of LoRa in the 2.4 GHz ISM band: coexistence issues with Wi-Fi. *Telecommunication Systems*, 74(3), 299-309, <https://doi.org/10.1007/s11235-020-00658-w>.
- [4] Sinap, V. (2025). Yapay Zekâ Destekli Karar Destek Sistemleri ve Yönetim Bilişim Sistemlerine Entegrasyonu. *Yönetim Bilişim Sistemleri Alanında Yenilikçi Çözümler ve Güncel Yaklaşımlar*, 25.
- [5] Demircan, B. (2019), *Endüstriyel Tabanlı Sistemler İçin Bulut Tabanlı Sistem İçin Bulut Bilişim Tabanlı Nesnelerin İnterneti Uygulaması*, (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [6] Conijn, J. G., Querner, E., Rau, M., Hengsdijk, H., Kuhlman, T., Meijerink, G. W., ... & Bindraban, P. S. (2011). Agricultural resource scarcity and distribution. A case study of crop production in Africa. *Midterm Report*. Report, 380.
- [7] de Araujo Zanella, A. R., Da Silva, E., & Albini, L. C. P. (2020). Security challenges to smart agriculture: Current state, key issues, and future directions. *Array*, 8, 100048, <https://doi.org/10.1016/j.array.2020.100048>.
- [8] Pagano, A., Croce, D., Tinnirello, I., & Vitale, G. (2022). A survey on LoRa for smart agriculture: Current trends and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(4), 3664-3679.
- [9] Hamami, L., & Nassereddine, B. (2020). Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105782, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105782>.
- [10] Amaro, J. P., Marcos, H., & Cortesão, R. (2019, October). An energy study of a LoRaWan based electrical impedance spectroscopy module for tree health monitoring. *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vol 1, Lisbon, Portugal, 2916-2921.
- [11] Tılfarlıgil, A. *Tarımsal Sulamada Düşük Maliyetli Bir Lorawan Test Platformu: Uygulama ve Ölçümler* (Yüksek Lisans Tezi), Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis.

- [12] Ferré, G., & Giremus, A. (2018, December). LoRa physical layer principle and performance analysis. *2018 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, Bordeaux, France, 65-68.
- [13] Erkan, E., Fidan, Ş., & Oğraş, H. (2022). LoRa Modülasyon Tabanlı Saha Aydınlatma Sistemi Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 10(2), 203-215. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1031783>
- [14] Tankut, E., Çelikkaya, B., Yurdakoç, E., Sisalan, V., vd. (2019). Akıllı Su Sayaçlarında Çift Yönlü LoRaWAN Protokolü ve IoT Uygulaması. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 2(3), 32-36. <https://doi.org/10.38016/jista.529735>
- [15] 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.
- [16] Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, 16(9), 1466, <https://doi.org/10.3390/s16091466>.
- [17] Koçak, B. (2024), *LoRa Tabanlı Sokak Hayvanları Aşısı Takip Sistemi*, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [18] Pătru, G. C., Trancă, D. C., Costea, C. M., Rosner, D., & Rughiniş, R. V. (2019, October). LoRa based, low power remote monitoring and control solution for Industry 4.0 factories and facilities. *2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet)*, Galati, Romania, 1-6.
- [19] Mahmoud, M. S., & Mohamad, A. A. (2016). A study of efficient power consumption wireless communication techniques/modules for internet of things (IoT) applications, *Advances in Internet of Things*, 19-29, <http://dx.doi.org/10.4236/ait.2016.62002>.
- [20] de Carvalho Silva, J., Rodrigues, J. J., Alberti, A. M., Solic, P., & Aquino, A. L. (2017, July). LoRaWAN—A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. *2017 2nd International multidisciplinary conference on computer and energy science (SpliTech)*, Split, Croatia, 1-6.
- [21] Van den Abeele, F., Haxhibeqiri, J., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2017). Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6), 2186-2198, <https://doi.org/10.1109/JOIT.2017.2768498>.
- [22] Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT express*, 5(1), 1-7.
- [23] Shi, X., Huang, Q., & Gu, G. (2017, September). Design of remote eater conservancy information monitoring system based on embedded technology. *2017 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA)*, Xi'an, China, 400-403.
- [24] Zhang, X., Zhang, M., Meng, F., Qiao, Y., Xu, S., & Hour, S. (2018). A low-power wide-area network information monitoring system by combining NB-IoT and LoRa. *IEEE Internet of things Journal*, 6(1), 590-598, <https://doi.org/10.1109/IIOT.2018.2847702>.
- [25] Hotei, Ş. A., Marghescu, C. I., Negroiu, R. C., & Drumea, A. (2023). Towards Sustainable Subsistence Agriculture In Romania With Low-Cost IoT Modules And Solutions-Proof Of Concept. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 71(3).

- [26] Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoRaFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. *Sensors*, 20(7), 2028, <https://doi.org/10.3390/s20072028>.
- [27] Le Van, T., Thi, P. N., Minh, P. V., Do Thi, L., Le Cong, H., & Phuong, T. N. T. (2022). Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Smart Greenhouse Controller. *CommIT (Communication and Information Technology) Journal*, 16(1), 1-8, <https://doi.org/10.21512/commit.v16i1.7288>.
- [28] Tagarakis, A. C., Kateris, D., Berruto, R., & Bochtis, D. (2021). Low-cost wireless sensing system for precision agriculture applications in orchards. *Applied Sciences*, 11(13), 5858, <https://doi.org/10.3390/app11135858>.
- [29] Săcăleanu, D. I., Matache, M. G., Roșu, Ș. G., Florea, B. C., Manciu, I. P., & Perişoară, L. A. (2024). IoT-enhanced decision support system for real-time greenhouse microclimate monitoring and control. *Technologies*, 12(11), 230, <https://doi.org/10.3390/technologies12110230>.
- [30] Li, D., Yang, Z., Liu, X. H., Zhang, L., & Liu, S. Y. (2019). Design of LoRaWAN Integrated Gateway System Based on Embedded Linux. *Microcontroller & Embedded Systems*, 19(007), 10-14.
- [31] Sun, C., Zheng, F., Zhou, G., & Guo, K. (2020, July). Design and implementation of cloud-based single-channel LoRa IIoT gateway using raspberry pi. *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, Shenyang, China, 5259-5263.
- [32] Li, M. (15 Mayıs 2025). Why Bluetooth IoT?. <https://mokoblue.com>
- [33] Mahmud, M. I., Abdelgawad, A., Yanambaka, V. P., & Yelamarthi, K. (2021, June). Packet drop and rssi evaluation for lora: An indoor application perspective. *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, New Orleans, LA, USA, 913-914.
- [34] Aldin, H. N. S., Ghods, M. R., Nayebipour, F., & Torshiz, M. N. (2024). A comprehensive review of energy harvesting and routing strategies for IoT sensors sustainability and communication technology. *Sensors International*, 5, 100258, <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2023.100258>.
- [35] Al-Sarawi, S., Anbar, M., Alieyan, K., & Alzubaidi, M. (2017). Internet of Things (IoT) communication protocols. *2017 8th International conference on information technology (ICIT)*, Amman, Jordan, 685-690.
- [36] Alharbi, M. H., & Alhazmi, O. H. (2019, April). Prototype: User authentication scheme for IoT using NFC. *2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)* Sakaka, Saudi Arabia, 1-5.
- [37] Tekin, N., & Gungor, V. C. (2020). The impact of error control schemes on lifetime of energy harvesting wireless sensor networks in industrial environments. *Computer Standards & Interfaces*, 70, 103417, <https://doi.org/10.1016/j.csi.2020.103417>.
- [38] Durand, T. G., Visagie, L., & Booysen, M. J. (2019). Evaluation of next-generation low-power communication technology to replace GSM in IoT-applications. *IET Communications*, 13(16), 2533-2540, <https://doi.org/10.1049/iet-com.2019.0168>
- [39] Açıkgöz, T. (2024), *Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Analizi ve Uygulamaları*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [40] Yazıcı, A. B., & Ünverdi, N. Ö. (2024, May). Lora technology overview and smart parking system design. *2024 32nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Mersin, Türkiye, 1-4.
- [41] E-Byte, (17 Mayıs 2025). LoRa Alliance, <https://lora-alliance.org>.
- [42] Yu, Q., Wang, H., Lu, Z., & An, S. (2022). Group-based CSS modulation: A novel enhancement to LoRa physical layer. *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(3), 660-664.
- [43] Doğan, G. (2019), *Lorawan Kablosuz İletişim Protokolünün İncelenmesi ve Bir IOT Uygulaması*, (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [44] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital communications*. McGraw-hill.
- [45] Loukil, S., Fourati, L. C., Nayyar, A., & Chee, K. W. A. (2022). Analysis of LoRaWAN 1.0 and 1.1 protocols security mechanisms. *Sensors*, 22(10), 3717, <https://doi.org/10.3390/s22103717>.
- [46] Tsai, K. L., Huang, Y. L., Leu, F. Y., You, I., Huang, Y. L., & Tsai, C. H. (2018). AES-128 based secure low power communication for LoRaWAN IoT environments. *Ieee Access*, 6, 45325-45334, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2852563>
- [47] Fragkopoulos, M., Panagiotakis, S., Kostakis, M., Markakis, E. K., Astyrakakis, N., & Malamos, A. (2023). Experimental assessment of common crucial factors that affect LoRaWAN performance on suburban and rural area deployments. *Sensors*, 23(3), 1316, <https://doi.org/10.3390/s23031316>.
- [48] Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications magazine*, 55(9), 34-40, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>.
- [49] Ebyte, (18 Mayıs 2025). cdbYTE, <https://www.cdebyte.com/Module>.
- [50] Sadeeq, M. M., Abdulkareem, N. M., Zeebaree, S. R., Ahmed, D. M., Sami, A. S., & Zebari, R. R. (2021). IoT and Cloud computing issues, challenges and opportunities: A review. *Qubahan Academic Journal*, 1(2), 1-7, <https://doi.org/10.48161/qaj.v1n2a36>.
- [51] Kianoush, S., Raja, M., Savazzi, S., & Sigg, S. (2018). A cloud-IoT platform for passive radio sensing: Challenges and application case studies. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3624-3636, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2834530>.
- [52] Borsatti, D., Cerroni, W., Tonini, F., & Raffaelli, C. (2020, July). From IoT to cloud: applications and performance of the MQTT protocol. *2020 22nd international conference on transparent optical networks (ICTON)*, Bari, Italy, 1-4.
- [53] Singh, M., Rajan, M. A., Shivraj, V. L., & Balamuralidhar, P. (2015, April). Secure mqtt for internet of things (iot). *2015 fifth international conference on communication systems and network technologies*, Gwalior, India, 746-751.
- [54] Bellavista, P., & Zanni, A. (2016, September). Towards better scalability for IoT-cloud interactions via combined exploitation of MQTT and CoAP. *2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, Bologna, Italy, 1-6.
- [55] Chengdu Ebyte Electronic Technology Co Ltd. (2018) *E22-900T22D User Manuel*. <http://www.ebyte.com>

- [56] Chengdu Ebyte Electronic Technology Co Ltd.(2018) *E22-900T30D User Manuel*, <http://www.ebyte.com>
- [57] Arduino Foundation, (2025) *Arduino Nano User Manual*. <http://arduino.cc>
- [58] ESPRESSIF. (2025). *ESP32-WROOM-32 Datasheet*.
- [59] Yıldız, M. (19 Mayıs 2025). 3in1 nano hazır lehimli tak çalıştır pcb shield e22 ve e32 lora modülleri ile uyumlu. <https://shop.fixaj.com/3in1-nano-hazir-lehimli-tak-calistir-pcb-shield-e22-ve-e32-lora-modulleri-ile-uyumlu>.
- [60] Yıldız, M. (19 Mayıs 2025). 50db-868 mhz 900 mhz 4g lte 698~960 mhz 1710~2700 mhz sma anten. <https://shop.fixaj.com/50db-868-mhz-900-mhz-4g-lte-698~960mhz1710~2700mhz-sma-anten>.
- [61] Texas Instruments. (2016). *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor Datasheet*.
- [62] Maxim. (2005). *Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal DS3231 Datasheet*.



EKLER

EK A: LoRa Verici Kodu

```
1 #include <LoRa_E22.h>
2 #include <SoftwareSerial.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include "ClosedCube_HDC1080.h"
5
6 ClosedCube_HDC1080 hdc1080;
7 SoftwareSerial mySerial(3, 4);
8 LoRa_E22 LoRaE22(&mySerial);
9
10 #define M0 7
11 #define M1 6
12 #define Adres 2
13 #define Kanal 20
14 #define Netid 63
15 #define GonderilecekAdres 5
16 const byte XOR_KEY = 0xAA;
17
18 struct Signal {
19     char sifre[15] = "SUBU_2025";
20     byte id;
21     char konum[15];
22     byte nem[4];
23     byte temp[5];
24 } data;
25
26 void encryptData(float& value) {
27     byte* ptr = (byte*)&value;
28     for (int i = 0; i < sizeof(float); i++) {
29         ptr[i] ^= XOR_KEY;
30     }
31 }
32
```

Şekil A.1: LoRa Verici Kodu

```

33 void setup() {
34     pinMode(M0, OUTPUT);
35     pinMode(M1, OUTPUT);
36     Serial.begin(9600);
37     LoRaE22.begin();
38     LoraE22Ayarlar()
39     pinMode(M0, LOW);
40     pinMode(M1, LOW);
41     hdc1080.begin(0x40);
42     delay(500);
43     Serial.println("Sistem başlatılıyor...");
44 }
45
46 void loop() {
47     float temperature = hdc1080.readTemperature();
48     float humidity = hdc1080.readHumidity();
49     encryptData(temperature);
50     encryptData(humidity);
51     *(float*)(data.temp) = temperature;
52     *(float*)(data.nem) = humidity;
53
54     strcpy(data.konum, "T3_OFIS");
55     data.id = 2;
56     ResponseStatus rs = LoRaE22.sendFixedMessage(
57         highByte(GonderilecekAdres),
58         lowByte(GonderilecekAdres),
59         Kanal,
60         &data,
61         sizeof(Signal)
62     );
63
64     Serial.println("Veri şifreli olarak gönderildi.");
65     delay(30000);
66 }

```

Şekil A.1:(Devamı) LoRa Verici Kodu

```

68 void LoraE22Ayarlar() {
69
70     digitalWrite(M0, LOW);
71     digitalWrite(M1, HIGH);
72
73     ResponseStructContainer c;
74     c = FixajSS.getConfiguration();
75     Configuration configuration = *(Configuration*)c.data;
76     configuration.ADDL = lowByte(Adres);
77     configuration.ADDH = highByte(Adres);
78     configuration.NETID = Netid;
79     configuration.CHAN = Kanal;
80     configuration.SPED.airDataRate = AIR_DATA_RATE_010_24;
81     configuration.OPTION.subPacketSetting = SPS_240_00;
82     configuration.OPTION.transmissionPower = POWER_22;
83     configuration.SPED.uartBaudRate = UART_BPS_9600;
84     configuration.SPED.uartParity = MODE_00_8N1;
85     configuration.TRANSMISSION_MODE.WORPeriod = WOR_2000_011;
86     configuration.OPTION.RSSIAmbientNoise = RSSI_AMBIENT_NOISE_DISABLED;
87     configuration.TRANSMISSION_MODE.WORTransceiverControl = WOR_RECEIVER;
88     configuration.TRANSMISSION_MODE.enableRSSI = RSSI_ENABLED;
89     configuration.TRANSMISSION_MODE.fixedTransmission = FT_FIXED_TRANSMISSION;
90     configuration.TRANSMISSION_MODE.enableRepeater = REPEATER_DISABLED;
91     configuration.TRANSMISSION_MODE.enableLBT = LBT_DISABLED;
92     ResponseStatus rs = FixajSS.setConfiguration(configuration, WRITE_CFG_PWR_DWN_SAVE);
93     c.close();
94 }

```

Şekil A.1:(Devamı) LoRa Verici Kodu

EK B: LoRa Alıcı Kodu

```
1  #include "arduino_secrets.h"
2  #include "thingProperties.h"
3  #include <Wire.h>
4  #include "RTClib.h"
5  #include <LoRa_E22.h>
6  #include <HardwareSerial.h>
7  RTC_DS3231 rtc;
8
9  #define M0 32
10 #define M1 33
11 #define RX 27
12 #define TX 35
13
14 HardwareSerial LoRaSerial(1);
15 LoRa_E22 LoRaE22(TX, RX, &LoRaSerial, UART_BPS_RATE_9600);
16 #define Adres 5
17 #define Kanal 20
18 #define Netid 63
19 #define roleKontak 14
20
21 const byte XOR_KEY = 0xAA;
22
23 struct Signal {
24     char sifre[15];
25     byte id;
26     char konum[15];
27     byte nem[4];
28     byte temp[5];
29 } data;
30
31 float tempT3, nemT3;
32
33 void decryptData(float& value) {
34     byte* ptr = (byte*)&value;
35     for (int i = 0; i < sizeof(float); i++) {
36         ptr[i] ^= XOR_KEY;
37     }
38 }
39
```

Şekil B.1: LoRa Alıcı Kodu

```

40 void setup() {
41   Serial.begin(9600);
42   delay(1500);
43   initProperties();
44   ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);
45   setDebugMessageLevel(2);
46   ArduinoCloud.printDebugInfo();
47
48   pinMode(M0, OUTPUT);
49   pinMode(M1, OUTPUT);
50
51   LoRaE22.begin();
52   LoraE22Ayarlar();
53   digitalWrite(M0, LOW);
54   digitalWrite(M1, LOW);
55
56   pinMode(roleKontak, OUTPUT);
57   Wire.begin();
58   rtc.begin();
59   rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
60
61   delay(500);
62   Serial.println("Sistem başlatıldı...");
63 }
64
65 void loop() {
66   ArduinoCloud.update();
67
68   while (LoRaE22.available() > 1) {
69     ResponseStructContainer rss = LoRaE22.receiveMessage(sizeof(Signal));
70     struct Signal data = *(Signal*)rss.data;
71
72     DateTime now = rtc.now();
73
74     if (strcmp(data.sifre, "SUBU_2025") == 0) {
75       float temp = *(float*)(data.temp);
76       float hum = *(float*)(data.nem);
77
78       decryptData(temp);
79       decryptData(hum);
80
81       Serial.print("[");
82       Serial.print(now.timestamp());
83       Serial.print("] ,Konum: ");
84       Serial.print(data.konum);
85       Serial.print(" ,id: ");
86       Serial.print(data.id);
87       Serial.print(" ,Sıcaklık: ");
88       Serial.print(temp, 2);
89       Serial.print(" ,Nem: ");
90       Serial.println(hum, 2);
91
92       if (data.id == 2) {
93         nemT3 = hum;
94         tempT3 = temp;
95         Serial.println("T3_OFIS verisi çözüldü.");
96       }
97     }
98
99     rss.close();
100 }
101 }

```

Şekil B.1: (Devamı). LoRa Alıcı Kodu

```

103 void LoraE22Ayarlar() {
104     digitalWrite(M0, LOW);
105     digitalWrite(M1, HIGH);
106
107     ResponseStructContainer c;
108     c = LoRaE22.getConfiguration();
109     Configuration configuration = *(Configuration*)c.data;
110
111     configuration.ADDL = lowByte(Adres);
112     configuration.ADDH = highByte(Adres);
113     configuration.NETID = Netid;
114     configuration.CHAN = Kanal;
115     configuration.SPED.airDataRate = AIR_DATA_RATE_010_24;
116     configuration.OPTION.subPacketSetting = SPS_240_00;
117     configuration.OPTION.transmissionPower = POWER_22;
118     configuration.SPED.uartBaudRate = UART_BPS_9600;
119     configuration.SPED.uartParity = MODE_00_8N1;
120     configuration.TRANSMISSION_MODE.WORPeriod = WOR_2000_011;
121     configuration.OPTION.RSSIAmbientNoise = RSSI_AMBIENT_NOISE_DISABLED;
122     configuration.TRANSMISSION_MODE.WORTransceiverControl = WOR_RECEIVER;
123     configuration.TRANSMISSION_MODE.enableRSSI = RSSI_ENABLED;
124     configuration.TRANSMISSION_MODE.fixedTransmission = FT_FIXED_TRANSMISSION;
125     configuration.TRANSMISSION_MODE.enableRepeater = REPEATER_DISABLED;
126     configuration.TRANSMISSION_MODE.enableLBT = LBT_DISABLED;
127     ResponseStatus rs = FixajSS.setConfiguration(configuration, WRITE_CFG_PWR_DWN_SAVE);
128     c.close();
129 }

```

Şekil B.1: (Devamı). LoRa Alıcı Kodu

EK C: Veri Yorum Algoritması Kodları

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from datetime import datetime, timedelta
4 from sklearn.linear_model import LinearRegression
5 import requests
6 import matplotlib.pyplot as plt
7
8 # --- 1. EXCEL VERİ OKUMA ---
9 excel_path = "C:/Users/dell/Desktop/veriler.xlsx"
10 df = pd.read_excel(excel_path)
11 df.columns = ["datetime", "location", "temperature", "humidity"]
12
13 df["datetime"] = pd.to_datetime(df["datetime"], dayfirst=True, errors="coerce")
14 df["temperature"] = pd.to_numeric(df["temperature"], errors="coerce")
15 df["humidity"] = pd.to_numeric(df["humidity"], errors="coerce")
16 df = df.dropna(subset=["datetime", "temperature", "humidity"])
17
18 # --- 2. DIŞ HAVA 5 GÜNLÜK ORTALAMA VERİ ---
19 api_key = "37cb8df0fd2e15257c4dda1927f8b1a4"
20 city = "Serdivan"
21 url = f"https://api.openweathermap.org/data/2.5/forecast?q={city},tr&units=metric&appid={api_key}"
22
23 response = requests.get(url)
24 weather_data = response.json()
25
26 weather_list = []
27 for entry in weather_data["list"]:
28     time = datetime.strptime(entry["dt_txt"], "%Y-%m-%d %H:%M:%S")
29     temp = entry["main"]["temp"]
30     humidity = entry["main"]["humidity"]
31     weather_list.append({"ds": time, "out_temp": temp, "out_humidity": humidity})
32
33 weather_df = pd.DataFrame(weather_list)
34 daily_weather = weather_df.resample("D", on="ds").mean().reset_index()
35
36 # Gerekirse 7 güne tamamla
37 last_day = daily_weather["ds"].max()
38 while len(daily_weather) < 7:
39     last_day += timedelta(days=1)
40     daily_weather = pd.concat([
41         daily_weather,
42         pd.DataFrame([
43             {
44                 "ds": last_day,
45                 "out_temp": daily_weather["out_temp"].mean(),
46                 "out_humidity": daily_weather["out_humidity"].mean()
47             }
48         ])
49     ])
50
51 # --- 3. HER KONUM İÇİN TAHMİN ve ÖNERİ HESABI ---
52 locations = df["location"].unique()
53 recommendation_rows = []
54
55 for loc in locations:
56     df_loc = df[df["location"] == loc].copy()
57     df_loc["time_num"] = df_loc["datetime"].map(datetime.timestamp)
58
59     if len(df_loc) < 5:
60         continue
61
62     # --- Sıcaklık modeli
63     model_temp = LinearRegression()
64     model_temp.fit(df_loc["time_num"].values.reshape(-1, 1), df_loc["temperature"].values)
65
66     # --- Nem modeli
67     model_hum = LinearRegression()
68     model_hum.fit(df_loc["time_num"].values.reshape(-1, 1), df_loc["humidity"].values)
```

Şekil C.1: Veri Yorum Algoritması Kodları

```

68 -- 7 günlük tahminler
69 _time = df_loc["datetime"].max()
70 _re_dates = [last_time + timedelta(days=i) for i in range(1, 8)]
71 _re_timestamps = np.array([d.timestamp() for d in future_dates]).reshape(-1, 1)
72
73 is_temp = model_temp.predict(future_timestamps)
74 is_hum = model_hum.predict(future_timestamps)
75
76 i, f_date in enumerate(future_dates):
77 tahmini_sicaklik = round(max(preds_temp[i], 21.0), 2) # min sınır
78 tahmini_nem = round(min(max(preds_hum[i], 30.0), 60.0), 2) # 30-60 aralığı
79
80 dis_sicaklik = daily_weather.iloc[i]["out_temp"]
81 dis_nem = daily_weather.iloc[i]["out_humidity"]
82
83 # ISO 7730 öneri sıcaklığı
84 if dis_sicaklik >= 28:
85     base_ideal_temp = 23.5
86 elif dis_sicaklik <= 10:
87     base_ideal_temp = 22.0
88 else:
89     base_ideal_temp = 23.0
90
91 # Konum bazlı ±0.2 fark
92 konum_fark = (hash(loc) % 5 - 2) * 0.1
93 ideal_temp = round(base_ideal_temp + konum_fark, 2)
94
95 # Önerilen nem = dış nemin %75'i + iç tahminin %25'i (dengelemiş)
96 ideal_nem = round((dis_nem * 0.75 + tahmini_nem * 0.25), 2)
97 ideal_nem = max(30, min(ideal_nem, 60)) # sınırla
98
99 recommendation_rows.append({
100     "Tarih": f_date.strftime("%d.%m.%Y"),
101     "Konum": loc,
102     "Tahmini Sıcaklık (°C)": tahmini_sicaklik,
103     "Tahmini Nem (%)": tahmini_nem,
104     "Önerilen Sıcaklık (ISO 7730)": ideal_temp,
105     "Önerilen Nem (%)": ideal_nem,
106     "Dış Sıcaklık": round(dis_sicaklik, 1),
107     "Dış Nem": round(dis_nem, 1)
108 })
109
110 . SONUÇLARI GÖSTER ---
111 ff = pd.DataFrame(recommendation_rows)
112 option("display_max_rows", None)
113 print(Haftalık Konum Bazlı Tahmin + ISO 7730 Önerileri:\n")
114 result_df)
115
116 in result_df["Konum"].unique():
117 loc = result_df[result_df["Konum"] == loc]
118
119 -- SICAKLIK GRAFİĞİ ---
120 .figure(figsize=(10, 4))
121 .plot(df_loc["Tarih"], df_loc["Tahmini Sıcaklık (°C)"], label="Tahmini Sıcaklık", marker="o")
122 .plot(df_loc["Tarih"], df_loc["Önerilen Sıcaklık (ISO 7730)"], label="Önerilen Sıcaklık", linestyle="--")
123 .title(f"{loc} - Sıcaklık Tahmini vs Önerilen")
124 .xlabel("Tarih")
125 .ylabel("Sıcaklık (°C)")
126 .xticks(rotation=45)
127 .grid(True)
128 .legend()
129 .tight_layout()
130 .show()
131
132 -- NEM GRAFİĞİ ---
133 .figure(figsize=(10, 4))
134 .plot(df_loc["Tarih"], df_loc["Tahmini Nem (%)"], label="Tahmini Nem", marker="s", color="green")
135 .plot(df_loc["Tarih"], df_loc["Önerilen Nem (%)"], label="Önerilen Nem", linestyle="--", color="orange")
136 .title(f"{loc} - Nem Tahmini vs Önerilen")
137 .xlabel("Tarih")
138 .ylabel("Nem (%)")
139 .xticks(rotation=45)
140 .grid(True)
141 .legend()
142 .tight_layout()
143 .show()
144

```

Şekil C.1:(Devamı) Veri Yorum Algoritması Kodları