



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**FABRİKALARDA LORA HABERLEŞME PROTOKOLÜ İLE VERİ TOPLAMA VE
ANALİZİ: BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED EYÜP KAYA

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ AKİF KARAFİL

**YALOVA
OCAK 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

FABRİKALARDA LORA HABERLEŞME PROTOKOLÜ İLE VERİ TOPLAMA VE
ANALİZİ: BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED EYÜP KAYA
218105020

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ AKİF KARAFİL

YALOVA
OCAK 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “FABRİKALARDA LORA HABERLEŞME PROTOKOLÜ İLE VERİ TOPLAMA VE ANALİZİ: BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Muhammed Eyüp KAYA



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Akif KARAFİL'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda olduğu ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemediği için sevgili eşime çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının saha testlerinin gerçekleşmesine olanak sağlayan Kale Balata Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Sevgili eşim Zehra YEGİN 'e ithafen.

Ocak – 2025

Muhammed Eyüp KAYA



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	2
1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı.....	3
1.3. İlgili Çalışmalar	4
2. ENDÜSTRİYEL OTOMASYON.....	13
2.1. Endüstri 4.0 ve Akıllı Üretim	13
2.1.1. Endüstriyel devrimlerin evrimi	13
2.1.2. Endüstri 4.0'ın getirdiği yenilikler.....	14
2.1.3. Endüstriyel otomasyon ve veri toplama teknolojilerinin gelişimi	16
2.1.4. Akıllı üretim sistemleri	17
2.2. IoT ve Endüstriyel Uygulamaları	18
2.2.1. Mevcut otomasyon sistemleri	18
2.2.2. IoT tabanlı veri toplama teknolojileri	19
2.3. LoRa Teknolojisi ve Çalışma Prensipleri	20
2.3.1. LoRa fiziksel katman (PHY)	21
2.3.2. Veri şifreleme ve hata düzeltme	24
2.3.2. LoRaWAN ağ mimarisi	25
2.3.3. Uygulama katmanı	27
2.4. Diğer IoT Haberleşme Protokolleri	28
2.4.1. NB-IoT.....	28
2.4.2. Sigfox.....	29
2.4.3. WiFi	30
2.4.4. ZigBee.....	30
2.4.5. BLE	31

2.5. LoRa'nın Endüstriyel Avantajları	32
2.6. Kısıtlamalar ve Zorluklar.....	33
2.6.1. Çekim alanı ve mesafe sorunları.....	34
2.6.2. Parazit ve sinyal girişimi.....	34
2.6.3. Enerji tüketimi ve pil ömrü	34
2.6.4. Bant genişliği ve veri hızı sınırlamaları	34
2.6.5. Güvenlik ve gizlilik	35
2.6.6. Çevresel zorluklar ve fiziksel engeller.....	35
3. MATERYAL VE METOT.....	37
3.1. Sistem Tasarımı ve Bileşenler	37
3.1.1. Veri toplama donanımı	37
3.1.2. Ana ağ geçidi	37
3.1.3. Analiz sunucusu	38
3.1.4. Kullanıcı arayüzü.....	38
3.2. Donanım ve Yazılım Altyapısı	38
3.2.1. Donanım.....	38
3.2.2. Yazılım.....	41
3.3. Veri Toplama ve İletim Süreci	42
3.3.1. Pres makinelerinden veri toplama işlemi.....	42
3.3.2. LoRa protokolü ile kablosuz veri iletim altyapısı.....	44
3.4. Veri Tabanı Tasarımı ve Yönetimi.....	45
3.4.1. SQL tabanlı veri tabanı tasarımı	45
3.4.2. Veri yönetimi süreçleri	46
3.5. Kullanıcı Arayüzü ve Veri Görselleştirme	46
3.5.1. Kullanıcıların arayüz tasarımı ve yazılım geliştirilmesi	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Sistem Performans Analizi	49
4.2. Verimlilik ve Optimizasyon	52
4.3. Avantajlar ve Zorluklar	53
4.3.1. Sistemin avantajları.....	53
4.3.2. Sistemin karşılaştığı zorluklar	54
4.4. Değerlendirme ve Gelecek Perspektifleri.....	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	65

Ek.1 - Devre Diyagramları	65
Ek.2 - Uygulama İzin Belgesi	66
ÖZGEÇMİŞ	67



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

$f_{\min}$	: Minimum frekans
$f_{\max}$	: Maksimum frekans
n_s	: Slot sayısı
R_b	: Veri hızı
T	: Zaman
T_s	: Sembol Süresi

KISALTMALAR

3GPP	: 3. Nesil Ortaklık Projesi
ADR	: Adaptif Veri Hızı
AES-128	: Gelişmiş Şifreleme Standartı – 128 bit
AP	: Erişim Noktası
AppSKey	: Uygulama Oturum Anahtarı
BLE	: Düşük Enerjili Bluetooth
BW	: Bant Genişliği
Byte	: Bayt
CBOR	: Kompakt İkili Nesne Temsilcisi
CoAP	: Kısıtlı Uygulama Protokolü
COM	: İletişim Portu
CPS	: Siber-Fiziksel Sistemler
CR	: Kod Oranı
CRC	: Döngüsel Artıklık Denetimi
CSMA/CA	: Taşıma Algılama Çoklu Erişim / Çarpışma Önleme
CSS	: Chirp Yayılım Spektrumu
dB	: Desibel
DC	: Doğru Akım
DCS	: Dağıtılmış Kontrol Sistemi
DE	: Düşük Veri Hızı Optimizasyonu
DMS	: Dağıtık Ölçüm Sistemleri
EMI	: Elektromanyetik Girişim
ET	: Mahsul Evapotranspirasyonu
FDD	: Frekans Bölmeli Çift Yönlü İletişim
FEC	: İleri Hata Düzeltme
FHDR	: Frame Başlığı
FPort	: Port Alanı
FUOTA	: Havadan Yazılım Güncellemesi
GATT	: Genel Öznitelik Profili
GHz	: Gigahertz
GSM	: Küresel Mobil İletişim Sistemi
H	: Başlık
Hz	: Hertz
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IIoT	: Endüstriyel Nesnelerin İnterneti

IoT	: Nesnelerin İnterneti
ISM	: Endüstriyel, Bilimsel ve Medikal (Tıbbi) Bandı
iWUE	: Sulama Suyu Kullanım Verimliliği
JSON	: JavaScript Nesne Gösterimi
Kbps	: Kilobit/Saniye
kHz	: Kilohertz
LoRa	: Uzun Mesafe (Long Range)
LoRaSim	: LoRa Simülatörü
LoRaWAN	: LoRa Ağ Katmanı
LPWAN	: Düşük Güçlü Geniş Alan Ağları
LTE	: Uzun Dönem Evrimi
MAC	: Ortam Erişim Kontrolü
Mbps	: Megabit/Saniye
MCU	: Mikrodenetleyici
MHDR	: MAC Başlığı
MHz	: Megahertz
MIC	: Mesaj Bütünlük Kodu
M2M	: Makineden-Makineye İletişim
MQTT	: Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşıma Protokolü
ms	: Mili Saniye
µs	: Mikro Saniye
NB-IoT	: Dar Bant Nesnelerin İnterneti
NwkSKey	: Ağ Oturumları Anahtarı
OEE	: Genel Ekipman Etkinliği
OFDMA	: Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
PDR	: Paket Teslim Oranı
PHY	: Fiziksel Katman
PL	: Veri Yüğü Uzunluğu
PLC	: Programlanabilir Mantık Kontrolörü
PRR	: Paket Alım Oranı
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
QoS	: Güvenilir Hizmet Kalitesi
SCADA	: Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama
SC-FDMA	: Tek Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
SF	: Yayılma Faktörü
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı
SPI	: Seri Çevresel Arayüz
TCP/IP	: İletim Kontrol Protokolü / İnternet Protokolü
UNB	: Ultra Dar Bant
Wi-Fi	: Kablosuz Bağlantı Alanı
WPA3	: WiFi Korumalı Erişim 3

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Semtech SX1276 LoRa alıcısının farklı bant genişlikleri ve yayılım faktörlerindeki hassasiyeti (dBm cinsinden) [4]	22
Tablo 2.2. LoRa'nın diğer protokollerle karşılaştırılması.....	32
Tablo 3.1. LoRa paket içeriği.....	44
Tablo 3.2. SQL tablo tasarımı	45



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Endüstri 1.0'dan Endüstri 4.0'a evrim [1]	13
Şekil 2.2. IoT'yi desteklemek için kullanılan teknolojiler ve cihazlar [1].....	14
Şekil 2.3. Endüstri 4.0'ın gelişimi [1]	15
Şekil 2.4. Veri toplama teknolojilerinin tarihsel gelişimi [1, 7, 10].....	17
Şekil 2.5. LoRa katmanları ve çalışma prensibi [22]	21
Şekil 2.6. LoRa sembolü, indeks 90 (SF = 7, B = 125 kHz, SF = 7 ve $T_s = 1$ ms) [14]	21
Şekil 2.7. LoRa çerçeve yapısı [14]	23
Şekil 2.8. Preambül yapısı [13]	23
Şekil 2.9. LoRaWAN çerçeve formatı [4].....	26
Şekil 3.1. Veri toplama donanımı.....	37
Şekil 3.2. Ana ağ geçidi (Gateway).....	38
Şekil 3.3. EL817 Optokuplör entegresi [52]	39
Şekil 3.4. ATMEGA328P-AU entegresi [53]	39
Şekil 3.5. RA-01 LoRa entegresi [54].....	40
Şekil 3.6. Sistemin endüstriyel otomasyon piramidinde gösterimi.....	41
Şekil 3.7. Üretimde kullanılan pres makinesi	43
Şekil 3.8. Veri toplama donanımı pano yerleşimi.....	43
Şekil 3.9. Kullanıcı arayüzü anasayfası	47
Şekil 3.10. Pres detay sayfası	48
Şekil 3.11. Üretim arşiv sayfası	48
Şekil 3.12. Sistemin çektiği akım ölçümü.....	51
Şekil 3.13. Ağ geçidi ve pres fabrika yerleşim şeması.....	51

FABRİKALARDA LORA HABERLEŞME PROTOKOLÜ İLE VERİ TOPLAMA VE ANALİZİ: BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ

ÖZET

Bu tez çalışması, Endüstri 4.0 ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojilerinin sunduğu fırsatları değerlendirerek, fabrika ortamlarında uzun mesafe (LoRa) haberleşme protokolü ile veri toplama ve analizine odaklanmaktadır. Çalışmada, geleneksel kablolu sistemlerin yüksek kurulum maliyeti ve esneklik sorunlarına karşı, LoRa haberleşme protokolünün uzun mesafeli iletişim kapasitesi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajları ön plana çıkarılmıştır. Pres makinelerine entegre edilen özel tasarım veri toplama modülleri, makinelerin çalışma ve duruş sürelerini, hata verilerini gerçek zamanlı olarak kaydetmiş ve bu veriler LoRa protokolü ile bir ana ağ geçidine iletilmiştir. Toplanan veriler, SQL tabanlı bir veri tabanında depolanmış ve kullanıcıların üretim süreçlerini izleyebileceği bir arayüz aracılığıyla görselleştirilmiştir. Visual Studio ve C# kullanılarak geliştirilen bu arayüz, kullanıcıların üretim süreçlerini izleyip analiz etmelerine ve gerektiğinde müdahale etmelerine olanak tanımıştır. Sonuçlar, LoRa tabanlı sistemlerin düşük maliyetli, esnek ve enerji verimli bir çözüm sunduğunu, üretim süreçlerini optimize ederek operasyonel verimliliği artırdığını göstermektedir. Çalışma, LoRa teknolojisinin endüstriyel otomasyonda geniş bir uygulama alanı bulabileceğini ortaya koyarak benzer çalışmalara rehberlik edecek bir örnek sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel otomasyon, LoRa, Nesnelerin interneti, Veri toplama, Akıllı üretim

DATA COLLECTION AND ANALYSIS IN FACTORIES USING THE LORA COMMUNICATION PROTOCOL: A CASE STUDY

ABSTRACT

This thesis focuses on leveraging the opportunities provided by Industry 4.0 and internet of things (IoT) technologies to collect and analyze data in factory environments using the long range (LoRa) communication protocol. The study, the advantages of the LoRa communication protocol, such as its long-range communication capability and low energy consumption, were highlighted as a solution to the high installation costs and flexibility issues of traditional wired systems. Specially designed data collection modules integrated into press machines recorded real-time data on machine operation and downtime, as well as error information. This data was transmitted via the LoRa protocol to a central gateway and stored in an SQL-based database. The data was then visualized through an interface that allowed users to monitor production processes. Developed using Visual Studio and C#, this interface enabled users to track, analyze, and intervene in production processes when necessary. The results demonstrate that LoRa-based systems provide a cost-effective, flexible, and energy-efficient solution, optimizing production processes and enhancing operational efficiency. This study shows that LoRa technology has significant potential for industrial automation, offering a guiding example for similar projects in the field.

Keywords: Industrial automation, LoRa, Internet of things, Data collection, Smart manufacturing

1. GİRİŞ

Modern endüstriyel üretim, tarihsel süreç içerisinde dört temel devrim geçirmiştir. İlk sanayi devrimi (Endüstri 1.0) su ve buhar gücünün mekanik üretim sistemlerinde kullanılmasıyla başlamış, ikinci sanayi devrimi (Endüstri 2.0) elektrik enerjisinin kullanımı ve seri üretimin yaygınlaşmasıyla devam etmiş, üçüncü sanayi devrimi (Endüstri 3.0) ise dijital teknolojilerin ve elektronik sistemlerin üretim süreçlerine entegrasyonu ile karakterize edilmiştir [1]. Günümüzde ise dördüncü sanayi devrimi (Endüstri 4.0) ile birlikte üretim sistemleri köklü bir dönüşüm geçirmektedir.

Endüstri 4.0, ilk kez 2011 yılında Hannover Fuarı'nda Almanya'nın yüksek teknoloji stratejisinin bir parçası olarak tanıtılmış ve kısa sürede dünya çapında bir kavram haline gelmiştir. Bu yeni endüstriyel yapı, üretim sektöründe devrim yaratan bir dönüşüm süreci olarak üretim süreçlerinin dijitalleşmesini ve otomasyonunu merkeze alır. Bu devrim, üretim hatlarında akıllı sistemlerin ve otomasyon teknolojilerinin entegrasyonunu teşvik ederek verimlilik, kalite, hız ve esneklik unsurlarını iyileştirmeyi hedefler. Dijital dönüşüm sürecinin temel bileşenlerinden olan endüstriyel otomasyon, tekrarlanan işlerin daha verimli yapılması, insan hatasının en aza indirilmesi ve üretim süreçlerinin daha kontrollü hale getirilmesini sağlamaktadır. Bu çerçevede nesnelerin interneti (IoT), siber-fiziksel sistemler ve büyük veri analitiği gibi teknolojiler, makineler ve sistemler arasında anlık veri alışverişi ve analiz imkânları sunar. Bu teknolojiler, işletmelere karar alma süreçlerinde hız kazandırır ve yüksek miktarda verinin sürekli işlenmesini mümkün kılar [2].

Geleneksel üretim yöntemleri, manuel işleme dayalı olmaları nedeniyle düşük esneklik ve sınırlı veri toplama kapasitelerine sahiptir. Bu durum, operasyonel süreçlerin izlenmesi ve optimize edilmesini zorlaştırmaktadır. Öte yandan, IoT tabanlı sistemler ve düşük güçlü geniş alan ağları (LPWAN) gibi teknolojiler, üretim süreçlerinde devrim yaratarak daha geniş kapsama alanı ve düşük maliyet avantajı sunmaktadır [3].

Uzun mesafe (LoRa) teknolojisi, enerji verimliliği ve uzun mesafelerde iletişim kurabilme özellikleriyle IoT uygulamaları için öne çıkmaktadır. Semtech tarafından geliştirilen bu teknoloji, özellikle veri toplama ve iletişimde güvenilirliği artırmak için frekans yayılımı tabanlı modülasyon tekniklerini kullanır. LoRa, düşük güç tüketimiyle uzun menzilli iletişim sunarak, fabrika ortamlarında operasyonel verilerin gerçek zamanlı izlenmesine olanak tanır. Ayrıca, LoRa ağ katmanı (LoRaWAN) protokolü, ağ yönetimini kolaylaştıran ve farklı cihazların güvenilir bir şekilde iletişim kurmasını sağlayan bir çerçeve sunmaktadır [4, 5].

Bu bağlamda, endüstriyel otomasyon sistemlerinde IoT tabanlı veri toplama uygulamaları hem izlenebilirliği hem de denetimi artırarak modern üretim süreçlerini daha sürdürülebilir ve esnek hale getirir. Üretim tesislerinde gerçek zamanlı veriye dayalı karar alma süreçleri, üretim verimliliğini artırırken kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlar. Endüstri 4.0 ile birlikte, üretim süreçlerinin yalnızca dijitalleşmesi değil, aynı zamanda akıllı hale gelmesi de beklenmektedir. Bu dönüşüm, fabrikalardaki verimlilik ve maliyet optimizasyonunu yeni bir seviyeye taşır ve işletmelere rekabet avantajı sağlar [6, 7].

1.1. Problemin Tanımı

Modern endüstriyel üretimde veri toplama sistemleri, üretim süreçlerinin optimizasyonu ve karar verme mekanizmalarının etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Ancak geleneksel veri toplama yöntemleri, günümüz endüstrisinin artan ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Geleneksel veri toplama yöntemleri, endüstriyel ortamlarda yoğun kablolama ihtiyaçları, yüksek enerji tüketimi ve sınırlı veri iletim mesafeleri gibi çeşitli kısıtlamalar içerir. Bu yöntemler, özellikle geniş alanlarda veri toplama gereken büyük tesislerde, kablolama maliyetlerini artırır ve kurulum sürecini karmaşık hale getirir. Aynı zamanda bu sistemler, veri aktarım sürecinde gecikmelere ve yüksek maliyetlere neden olabilir. Bu durum endüstriyel otomasyon sistemlerinin verimliliğini olumsuz etkiler [8].

Geleneksel sistemlerde her bir sensör, ayrı bir kablolama altyapısına ihtiyaç duyar, bu da esneklik sorunlarına yol açar. Özellikle hızlı değişen endüstriyel ihtiyaçlar ve hareketli ekipmanların bulunduğu üretim ortamlarında kablolu sistemler uygun olmayabilir. Ayrıca, geniş alanlarda kablolama ihtiyacı yalnızca ilk kurulum maliyetlerini değil, aynı zamanda bakım ve yenileme maliyetlerini de artırır. Bu zorluklar, geleneksel veri toplama yöntemlerinin sınırlı ölçeklenebilirliğine işaret eder, çünkü sistemin genişletilmesi ve yeni sensörlerin eklenmesi maliyetli ve zaman alıcıdır [7, 9].

Kablosuz sistemler ise genellikle Wi-Fi veya bluetooth gibi kısa mesafeli protokollere dayanır. Bu protokoller, sınırlı kapsama alanı ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle geniş alanlı ve uzun süreli veri toplama uygulamaları için uygun değildir. Ek olarak, hücreli ağ tabanlı sistemler yüksek veri iletim maliyetleri ve enerji tüketimi nedeniyle IoT uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmez [10].

LoRa teknolojisi, bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için etkili bir çözüm sunmaktadır. LoRa, düşük güç tüketimi, geniş kapsama alanı ve düşük maliyet özellikleriyle öne çıkar. LoRa teknolojisi, düşük veri iletim hızına ihtiyaç duyan ve/veya geniş alan kapsama

gerektiren uygulamalar için idealdir. Endüstriyel ortamda kablosuz veri toplama ile veri iletişimini kablolama gerektirmeden geniş alanlara yayabilen LoRa, bu sayede kurulum ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. LoRa'nın basit ve maliyet etkin yapısı, fabrikalarda IoT tabanlı otomasyon ve izleme uygulamalarını mümkün kılarak, üretim süreçlerini optimize etmeye ve verimliliği artırmaya olanak sağlar [6, 11].

LoRa'nın sunduğu en büyük avantajlardan biri de geniş alanlarda kablosuz kapsama sağlama yeteneğidir. Uzun menzilli iletişim kapasitesi sayesinde, fabrikalarda geniş bir alanı tek bir ağ geçidiyle kapsayabilir ve veri toplama sürecini büyük ölçüde kolaylaştırır [4]. LoRa'nın frekans yayılımı tabanlı modülasyonu, sinyalin parazitlere karşı dayanıklılığını artırarak güvenilir bir iletişim altyapısı sağlar [5].

Ek olarak, LoRa'nın kablosuz bağlantı protokolleri, geleneksel sistemlerde karşılaşılan esneklik eksikliği sorununa da çözüm sunar. LoRa cihazları, sistemin gereksinimlerine göre kolayca yer değiştirilebilir ve sistemin genişletilmesi gerektiğinde kablo altyapısı ile uğraşmak yerine yeni cihazlar hızlıca eklenebilir. Bu durum, üretim tesislerinin dinamik ihtiyaçlarına uyum sağlamayı kolaylaştırır ve endüstriyel otomasyon projelerinin daha esnek hale gelmesine yardımcı olur [8].

Sonuç olarak, geleneksel veri toplama yöntemlerinin maliyet, esneklik ve kapsama alanı gibi sınırlamalarına karşılık, LoRa teknolojisi endüstriyel ortamlarda daha verimli, ekonomik ve güvenilir bir çözüm sunar. Bu tez çalışması, LoRa tabanlı veri toplama sistemlerinin, geleneksel yöntemlerin kısıtlamalarını nasıl aştığını ve endüstriyel otomasyon sistemlerinde nasıl bir avantaj sağladığını incelemeyi hedeflemektedir.

1.2. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının temel amacı, endüstriyel üretim ortamlarında LoRa haberleşme protokolü kullanılarak gerçek zamanlı veri toplama ve analiz sisteminin geliştirilmesidir. Çalışma, özellikle pres makinelerinden veri toplanması üzerine odaklanarak, üretim süreçlerinin verimlilik ve optimizasyonunu artırmayı hedeflemektedir.

Geleneksel veri toplama yöntemlerinin yüksek kurulum maliyeti ve karmaşık kablolama gereksinimleri gibi dezavantajlarına karşın, LoRa teknolojisi düşük güç tüketimi ve geniş kapsama alanı özellikleriyle alternatif bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda çalışma, LoRa protokolünün endüstriyel otomasyondaki potansiyelini pratik bir uygulama üzerinden değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında, LoRa tabanlı veri toplama modüllerinin tasarımı ve pres makinelerine entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Makinelerin çalışma süreleri, duruş zamanları ve hata verilerinin toplanması için gerekli donanım ve yazılım sistemleri geliştirilmiştir. Toplanan tüm veriler SQL tabanlı bir veri tabanı sisteminde depolanmış ve yönetilmiştir. Ayrıca, bu verilerin analizi ve görselleştirilmesi için özel bir kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır.

Geliştirilen sistemin güvenilirlik ve enerji verimliliği açısından testleri yapılarak, endüstriyel ortamdaki performansı değerlendirilmiştir. Bu sistem sayesinde, üretim süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve optimize edilmesi mümkün olmuş ve aynı zamanda operasyonel maliyetlerin düşürülmesi ile üretim kalitesinin artırılması sağlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, LoRa teknolojisinin endüstriyel otomasyon alanındaki uygulamalarına örnek teşkil ederek, benzer sistemlerin geliştirilmesine rehberlik edecektir.

1.3. İlgili Çalışmalar

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde kablosuz teknolojiler, veri toplama ve iletişim altyapılarında devrim yaratarak operasyonel süreçleri optimize etmeyi mümkün kılmıştır. LoRa ve diğer kablosuz teknolojiler, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmakta ve düşük maliyet, enerji verimliliği ve geniş kapsama alanı avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Bu konulara ilişkin yapılan bazı temel çalışmalar şunlardır:

Raza ve diğ. [3] tarafından yapılan çalışmada, LPWAN teknolojilerinin detaylı bir incelemesi gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, LPWAN'ın IoT ve makineden makineye iletişim (M2M) alanlarındaki kritik rolünü ortaya koymuşlardır. Çalışma, LPWAN teknolojilerinin düşük enerji tüketimi, geniş kapsama alanı ve düşük maliyet gibi önemli avantajlarını vurgularken, aynı zamanda düşük veri hızları ve yüksek gecikme gibi sınırlamalarını da ele almıştır. Araştırmacılar, LPWAN teknolojilerinin akıllı şehir uygulamaları, lojistik, tarım ve endüstriyel izleme gibi çeşitli alanlarda büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada, LoRa, Sigfox ve dar bant nesnelerin interneti (NB-IoT) gibi farklı LPWAN çözümlerinin teknik özellikleri incelenmiş ve standartlaştırma çabalarının bu teknolojilerin birlikte çalışabilirliğini artırmadaki önemi vurgulanmıştır.

Augustin ve diğ. [4] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, LoRa teknolojisinin IoT uygulamalarındaki kapsamlı bir analizi yapılmıştır. Araştırmacılar, LoRa'nın chirp yayılım spektrumu (CSS) modülasyon tekniği ile parazitlere karşı dayanıklılığını ve uzun mesafelerde düşük enerji tüketimini ortaya koymuşlardır. Deneysel analizler, banliyö alanlarında 3 km'ye kadar tatmin edici bir ağ kapsama alanı sunduğunu ve yüksek yayılma faktörlerinin kapsama

alanını artırdığını ancak bunu veri hızından ödün vererek gerçekleştirdiğini göstermiştir. LoRaWAN protokolünün düşük güç tüketimi ve nadir veri iletimi için uygunluğu vurgulanırken, yük altında çarpışma oranlarının artması ve kanal kapasitesinin düşmesi gibi sınırlamaları da tespit edilmiştir. Çalışma, LoRa teknolojisinin enerji verimliliğinin ön planda olduğu IoT uygulamaları için uygun olduğunu ancak performansın artırılmasına yönelik optimizasyonlara ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur.

Adelantado ve diğ. [5] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, LoRaWAN teknolojisinin IoT uygulamalarındaki rolü kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar, yıldız-topolojili ağ yapısına sahip LoRaWAN'ın düşük güç tüketimi ve uzun menzil özellikleriyle tarım, çevre izleme ve akıllı şehir uygulamaları için uygun olduğunu ancak yüksek cihaz yoğunluklarında çarpışma oranlarının artması ve görev döngüsü sınırlamaları gibi önemli kapasite sorunları yaşadığını ortaya koymuşlardır.

Sinha ve diğ. [10] tarafından yapılan çalışmada, LPWAN teknolojileri olan LoRa ve NB-IoT üzerine detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır. Araştırmacılar, LoRa'nın lisanssız spektrum kullanımı sayesinde düşük maliyet, uzun batarya ömrü ve geniş kapsama alanı sağladığını, NB-IoT'nin ise lisanslı spektrumda çalışarak yüksek veri hızı, düşük gecikme ve güvenilir hizmet kalitesi (QoS) sunduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışma, LoRa'nın akıllı tarım, lojistik takibi ve akıllı şehir uygulamaları gibi düşük veri hızları gerektiren alanlarda; NB-IoT'nin ise akıllı sayaçlar ve sağlık izleme gibi düşük gecikme ve yüksek QoS gerektiren uygulamalarda tercih edildiğini göstermiştir. Ayrıca, LoRa'nın kırsal ve banliyö bölgelerde daha etkin ve esnek bir seçenek olduğu, NB-IoT'nin ise mevcut uzun dönem evrimi (LTE) altyapısına dayandığı ve daha yüksek maliyetli olduğu vurgulanmıştır.

Ali [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ZigBee ve LoRa tabanlı kablosuz haberleşme teknolojilerinin enerji verimli akıllı bina sistemlerindeki rolü kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacı, ZigBee'nin düşük güç tüketimi ve yüksek veri aktarım kapasitesi ile iç mekân uygulamalarında, LoRa'nın ise uzun menzil ve düşük enerji tüketimi özellikleri ile dış mekân uygulamalarında etkin kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Çalışma, sıcaklık, nem ve ışık verilerini toplayan sensörlerden oluşan çok protokollü bir ağ geçidi sistemi tasarlamış ve saha testleri gerçekleştirmiştir. Test sonuçları, ZigBee'nin iç mekân uygulamalarında düşük güç tüketimi avantajını, LoRa'nın ise uzun menzil ve geniş kapsama alanı gereksinimlerini karşılama açısından üstünlüğünü göstermiştir. Araştırma, bu iki teknolojinin birlikte kullanımının IoT uygulamalarında tamamlayıcı bir çözüm sunduğunu vurgulamaktadır.

Haxhibeqiri ve diğ. [12] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, LoRaWAN teknolojisinin IoT uygulamalarındaki rolü kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar, LoRaWAN'ın düşük güç tüketimi, geniş kapsama alanı ve düşük veri hızları ile akıllı şehirler, tarım, sağlık, trafik yönetimi ve akıllı şebekeler gibi alanlardaki kullanım potansiyelini ortaya koymuşlardır. Çalışma, ağ kapasitesini artırmak ve paraziti azaltmak için adaptif veri hızları (ADR), çoklu ağ geçitleri ve zamanlama mekanizmaları gibi öneriler sunarak, teknolojinin ölçeklenebilirlik, güvenlik ve trafik yoğunluğuna karşı dayanıklılık alanlarındaki iyileştirme ihtiyaçlarını vurgulamıştır. LoRaWAN'ın güçlü yönlerini (düşük maliyet, esneklik) ve sınırlamalarını (yüksek trafik altında kapasite sorunları) ele alan araştırma, mobilite ve iç mekan kullanım senaryolarındaki performans sınırlamalarını detaylandırarak, IoT ekosistemindeki geleceğine dair önemli bir değerlendirme sunmuştur.

Centenaro ve diğ. [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, lisanssız bantlardaki uzun menzilli iletişim teknolojileri, özellikle LoRa olmak üzere LPWAN IoT ve akıllı şehir uygulamalarındaki rolü kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar, LPWAN teknolojilerinin kentsel alanlarda 2-5 km, kırsal alanlarda 10-15 km menzil, düşük enerji tüketimi ve düşük maliyet gibi özellikleriyle IoT uygulamaları için ideal bir çözüm sunduğunu ortaya koymuşlardır. LoRa'nın CSS modülasyonu sayesinde yüksek alıcı hassasiyeti ve parazitlere karşı dayanıklılık sağladığı, akıllı şehir hizmetleri, atık yönetimi, enerji tasarrufu, akıllı park ve su yönetimi gibi çeşitli senaryolarda etkin kullanılabileceği vurgulanmıştır. Saha testleri, LoRa teknolojisinin zorlu kentsel ortam koşullarında bile güvenilir bağlantı sağlayabildiğini göstermiş ve LPWAN'ın IoT ekosistemindeki dönüştürücü potansiyelini ortaya koymuştur.

São José ve diğ. [14] çalışmasında, LoRa ve LoRaWAN teknolojilerinin elektromanyetik girişimlere (EMI) karşı dayanıklılığı, özellikle demiryolu ortamında incelenmiştir. Araştırmacılar, elektrik arklarından kaynaklanan geçici gerilim dalgalanmaları ve kasıtlı karıştırıcı sinyalleri gibi EMI kaynaklarının etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, düşük yayılma faktörlü ($SF=7$) LoRa sistemlerinin EMI'ye karşı daha hassas olduğunu, yüksek yayılma faktörlerinin ($SF=12$) ise dayanıklılığı artırdığını göstermiştir. LoRaWAN'ın ise kanal değişikliği gibi protokol önlemleri sayesinde ADR özelliği kapalı olduğunda bile LoRa'dan daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir.

Mekki ve diğ. [15] çalışmasında, IoT uygulamalarında kullanılan Sigfox, LoRa ve NB-IoT gibi LPWAN teknolojileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmacılar, bu teknolojilerin teknik özelliklerini, performans faktörlerini ve uygulama alanlarını

değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, her teknolojinin farklı kullanım senaryolarında avantajlar sunduğunu göstermiştir. Sigfox ve LoRa'nın akıllı tarım ve akıllı bina gibi düşük veri gereksinimli uygulamalarda, NB-IoT'nin ise elektrik sayaçları ve perakende satış terminalleri gibi düşük gecikme gerektiren uygulamalarda daha uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca LoRa'nın hem özel hem de halka açık ağlarda kullanılabilmesi, onu esnek bir çözüm haline getirdiği vurgulanmıştır.

Yasintimur'un [16] çalışmasında, LoRa ve NB-IoT teknolojilerinin kent içi ve kırsal alanlardaki performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmacı, Eyüpsultan ilçesindeki su ve gaz sayaçlarının uzaktan okunması için test senaryoları tasarlamıştır. Çalışmanın sonuçları, LoRa'nın kent içinde 2-5 km, kırsal alanda 10-20 km; NB-IoT'nin ise kent içinde 1 km, kırsal alanda 10 km kapsama alanı sağladığını göstermiştir. Her iki teknolojinin de düşük enerji tüketimi ve güvenilir paket iletimi sunduğu ancak farklı uygulama senaryolarında birbirlerine göre üstünlükler gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca gecikmeye toleranslı IoT uygulamalarında bu iki teknolojinin hibrit olarak kullanılabileceği önerilmiştir.

Suhermanto ve diğ. [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, LoRa teknolojisinin IoT tabanlı sistemlerde motor izleme ve kontrol uygulamaları için potansiyeli detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar, Arduino tabanlı LoRa modülleri, DHT11 sıcaklık sensörü, INA219 akım sensörü ve bir DC motor kullanarak geliştirdikleri sistemde, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak motor hızının PWM yöntemiyle kontrol edildiği bir yaklaşım sunmuşlardır. Engelli ve engelsiz ortamlarda LoRa iletişim performansını değerlendiren çalışmada, her iki senaryoda da başarılı veri iletimi gözlemlenmiş ve sensörlerin hata oranının %0,04 gibi düşük bir seviyede olduğu tespit edilmiştir. Araştırma, LoRa teknolojisinin akıllı tarım, enerji yönetimi ve sanayi otomasyonu gibi alanlarda uygulanabilirliğini vurgularken, teknolojinin iletişim sınırlarına ve farklı coğrafi ortamlardaki performansına yönelik daha fazla çalışma yapılması gerektiğine işaret etmiştir.

Noreen ve diğ. [18] çalışmasında, LPWAN protokolü olan LoRa teknolojisinin performansı, kod oranı (CR), yayılma faktörü (SF) ve bant genişliği (BW) gibi temel parametreler üzerinden analiz edilmiştir. Çalışmada, ileri hata düzeltme mekanizmaları sayesinde CR'nin, bozulan bilgi bitlerinin kurtarılmasına olanak tanıdığı ve daha yüksek SF değerlerinin uzun mesafe iletişimi desteklediği belirtilmiştir. Bununla birlikte, CR ve SF değerlerindeki artışların veri hızını düşürdüğü ve paketlerin havadaki süresini artırdığı gözlemlenmiştir. Bant genişliğinin ise veri hızını ve havada kalma süresini doğrudan etkilediği, daha yüksek bant

genişliklerinin bu süreyi azalttığı vurgulanmıştır. Araştırma, LoRa'nın ağ parazitlerine karşı bağışıklığını artıran geniş bant yayılma spektrum teknolojilerini kullanarak bağlantı bütçesini geliştirdiğini ve çoklu çerçeve iletişimde kullanılabilecek ortogonal yayılma kodları sunduğunu göstermiştir.

Rizzi ve [19] çalışmasında, LoRaWAN teknolojisinin, dağıtık ölçüm sistemleri (DMS) için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışma, LoRaWAN'ın DMS senaryolarına uygunluğunu, özellikle zamanla ilgili performans göstergeleri üzerinden deneysel olarak değerlendirmiştir. Araştırma, düşük maliyetli alıcı-vericilerin 3 mikro saniyeden az bir standart belirsizlikle çerçeve iletimini planlayabildiğini ve ticari olarak temin edilebilen paket yönlendiricilerin uzun vadeli saat kararlılığının (Allan Sapması $\approx 10^{-8}$) kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, LoRaWAN'ın akıllı sayaçlama, akıllı bina izleme ve endüstriyel süreç uygulamaları gibi alanlarda DMS uygulamaları için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, zaman senkronizasyonu ve veri iletim doğruluğu açısından bazı sınırlamaların olduğu vurgulanmıştır.

Ghosh ve diğ. [20] çalışmasında, uzak bölgelerde ağ iletişimini desteklemek için LoRa tabanlı çok atlamalı (multihop) bir yönlendirme sistemi olan LoRaute geliştirilmiştir. Araştırmada, düşük enerji tüketimiyle uzun mesafeli iletişim kurabilen LoRa cihazlarının, WiFi-LoRa köprüleme ve iletim kontrol protokolü/internet protokolü (TCP/IP) mesajlaşma yetenekleri üzerinden mesaj yönlendirme mekanizmaları incelenmiştir. Gerçek donanım ile yapılan deneysel sonuçlar, önerilen sistemin mesaj yönlendirme sürelerini düşürdüğünü (24,45 ms) ve yüksek paket teslim oranları (PDR: %96-%100) sağladığını göstermiştir. Ayrıca, sistemin enerji verimliliği artırılarak mevcut literatürdeki sistemlere kıyasla %20 daha az güç tüketimi sağlandığı belirtilmiştir. Bu sonuçlar, LoRaute'un uzak bölgelerde düşük maliyetli, sürdürülebilir ağ altyapıları oluşturmak için etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur.

Özdemir ve Gökrem'in [21] çalışmasında, LoRaWAN teknolojisi kullanılarak erken uyarı sistemi tasarlanmış ve bu sistemin yangın ve sel gibi doğal afetlere karşı uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, Dragino şirketinin ürettiği DLOS8 ağ geçidi, LDDS75 mesafe sensörü ve LHT65 sıcaklık ve nem sensörleri kullanılarak gerçek zamanlı verilerle çalışan bir sistem geliştirilmiştir. Sensörler, ormanlık alanlarda yangınları ve dere yataklarında taşkınları tespit etmek için konumlandırılmıştır. Sistem, sensörlerden gelen verileri Cayenne myDevices kullanıcı arayüzüne ileterek yetkililerin kolayca erişebilmesini sağlamıştır. Testler, sensörlerin doğru yerleştirilmesinin iletişim mesafesi ve veri iletim başarısı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca veri aktarımında ağ geçidi ile sensörler arasındaki en

uzun mesafe 4,22 km olarak kaydedilmiş ancak yoğun ormanlık alanların iletişim üzerinde sınırlayıcı etkisi olduğu belirtilmiştir. Çalışma, ağ geçidi yüksekliğini artırarak ve sensör sabitleyici tasarımları yaparak sistemin verimliliğini artırmayı önermektedir.

Sundaram ve diğ. [22] çalışması, LoRa ağları üzerine kapsamlı bir inceleme sunarak bu teknolojinin karşılaştığı araştırma sorunlarını, mevcut çözümleri ve açık sorunları ele almıştır. Çalışma, düşük maliyet, geniş ölçekli dağıtım ve yüksek enerji verimliliği gibi IoT uygulamalarının temel gereksinimlerini karşılayan LoRa'nın, özerk ağ kurulumunu destekleyen açık standart bir teknoloji olarak öne çıktığını vurgulamaktadır. Çeşitli gerçek dünya uygulamalarında kullanımı ele alınarak enerji tüketimi, iletişim menzili, hata düzeltme, çoklu erişim ve güvenlik gibi temel zorluklar ve bunlara yönelik güncel çözümler değerlendirilmiştir. Araştırmada, enerji hasadı, geri saçılım sinyalleri kullanımı ve düşük güçlü donanım tasarımlarının enerji verimliliğini artırdığı; ağ yoğunluğunu artırmak için daha fazla geçit yerleştirmenin önerildiği; hata düzeltme ve girişim iptali tekniklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Ayrıca LoRa'nın geniş kapsama alanına rağmen sinyal karışıklığı, güvenlik açıkları ve kaynak tahsisi gibi sorunların, teknolojinin yaygın IoT uygulamalarında daha verimli kullanılabilmesi için çözülmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Cattani ve diğ. [23] çalışmasında, LoRa teknolojisinin güvenilirliği ve enerji verimliliği, fiziksel katman (PHY) ayarlarının etkisi ve çevresel faktörlerin performansa olan etkisi açısından değerlendirilmiştir. Araştırma, iç mekân, dış mekân ve yer altı ortamlarında deneyler yaparak PHY ayarlarının paket alım oranı (PRR) üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Çalışmanın sonuçları, hızlı ancak kırılgan ayarların, yavaş ve dayanıklı ayarlara kıyasla enerji verimliliğini artırdığını ve yeniden iletim mekanizmaları ile kullanılmasının daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca sıcaklık değişimlerinin LoRa sinyal gücünü düşürdüğü ve özellikle iletişim aralığının sınırındaki bağlantılarda paket kaybını artırdığı tespit edilmiştir. Çalışma, farklı PHY ayarlarının performans etkilerini karşılaştırarak veri iletim oranını artırmak için yüksek iletim gücü ve hızlı ayarların birlikte tercih edilmesi gerektiğini önermektedir.

Mikhaylov ve diğ. [24] çalışmasında, LoRa'nın LPWAN teknolojisinin kapasite ve ölçeklenebilirliği Avrupa frekans düzenlemeleri çerçevesinde incelenmiştir. Araştırmada, tek bir LoRaWAN baz istasyonunun hizmet verebileceği maksimum uç cihaz sayısı, yukarı bağlantı kanal kapasitesi ve cihazların mekansal dağılımı analiz edilmiştir. Sonuçlar, teorik olarak bir LoRaWAN hücresinin milyonlarca cihazı destekleyebileceğini ancak bu cihazların

çoğunun baz istasyonuna yakın konumlanması gerektiğini ortaya koymuştur. Yüksek SF değerlerinin düşük veri hızlarına neden olduğu ancak iletişim menzilini artırdığı vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca frekans düzenlemelerinin ve görev döngüsü sınırlamalarının LoRa'nın veri iletim performansı ve paket çakışma riskleri üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda, LoRa'nın düşük veri trafiği gereksinimlerine sahip, gecikme ve güvenilirlik açısından kritik olmayan uygulamalar için uygun bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır.

Varsier ve Schwoerer'in [25] çalışmasında, LoRaWAN teknolojisinin akıllı sayaç uygulamalarındaki kapasite limitleri gerçekçi bir ağ simülatörü kullanılarak analiz edilmiştir. Araştırmacılar, Paris şehir merkezinde 17 km²'lik bir alanda, her biri 1 km mesafede konumlandırılmış 19 ağ geçidi ile yapılan simülasyonlarda derin iç mekânlara yerleştirilmiş sayaçlar için uplink ve downlink iletişimini incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçları, yalnızca uplink iletişimi göz önüne alındığında ve frekansta başka trafik olmadığında %98'lik bir QoS hedefine ulaşılabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, cihazların sadece LoRa cihazları olmayacağı ve özellikle downlink iletişiminin kapasite üzerindeki önemli etkisi düşünüldüğünde bu limitlere çok hızlı bir şekilde ulaşılabileceği tespit edilmiştir. Araştırmacılar, bu sınırlamaların üstesinden gelmek için mesaj tekrarı, anten yoğunlaştırma veya nano-ağ geçitlerinin kullanımı gibi farklı çözümler önermişlerdir.

Bor ve diğ. [26] çalışmasında, LoRa LPWAN ölçeklenebilirliği hem deneysel hem de simülasyon yaklaşımıyla incelenmiştir. Araştırmacılar, pratik deneylerle LoRa haberleşme davranışını modelleyerek, bir LoRa simülatörü (LoRaSim) geliştirmişler ve bu simülatörle kapsamlı ölçeklenebilirlik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları, tipik bir LoRaWAN kurulumunun 3,8 hektarlık bir alanda sadece 120 cihazı destekleyebildiğini ve bunun gelecekteki IoT uygulamaları için yetersiz olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, dinamik iletişim parametre seçimi ve/veya çoklu ağ geçidi kullanımı gibi stratejilerle LoRa ağlarının oldukça iyi ölçeklenebildiği tespit edilmiştir. Araştırmacılar ayrıca, yakalama etkisinin (capture effect) veri alım oranı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve ağ planlaması yapılırken bu etkinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Gregora ve diğ. [27] çalışmasında, LoRa teknolojisinin bina içi sinyal yayılım karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmacılar, Prag'da bulunan betonarme bir binada sabit konumlu bir alıcı ve hareketli bir verici kullanarak iki farklı senaryo için ölçümler gerçekleştirmişlerdir. İlk senaryoda alıcı binanın bodrum katına, ikinci senaryoda ise çatıya yerleştirilmiş ve her iki durum için de sinyal kapsama alanı analiz edilmiştir. Sonuçlar,

alıcının çatıda konumlandırıldığı durumda sinyalin daha kolay ve geniş bir alana yayıldığını, komşu bina girişlerinin de kapsama alanına dâhil olabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, kullanılan LoRa cihazlarının betonarme binanın tamamını kapsayamadığı alıcının bulunduğu giriş bölümünde en iyi kapsama alanı elde edilirken diğer girişlerde paket kayıplarının hızla arttığı tespit edilmiştir.

Lavric ve Popa'nın [28] çalışmasında, IoT kavramı çerçevesinde LoRa teknolojisinin performansı ve zorlukları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar, IoT'nin karşılaştığı bağlantı, verimli enerji yönetimi, güvenlik, karmaşıklık ve hızlı gelişim gibi temel zorlukları belirledikten sonra LoRaWAN protokolünün bu zorluklara nasıl çözüm sunabileceğini analiz etmişlerdir. Çalışmada, LoRa'nın geniş kapsama alanı, düşük veri hızı, çift yönlü iletişim imkânı, yüksek güvenlik seviyesi ve enerji verimliliği gibi avantajları vurgulanmış ve bu özellikleriyle IoT uygulamaları için uygun bir aday olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle, LoRa'nın SF7'den SF12'ye kadar değişen yayılım faktörleriyle çoklu erişim imkânı sunması ve ADR mekanizmasıyla ağ kapasitesini optimize edebilmesi teknolojinin IoT zorluklarını aşmadaki potansiyelini göstermektedir.

Haxhibeqiri ve diğ. [29] çalışmasında, LoRa teknolojisinin endüstriyel bir ortamdaki iç mekân kapsama alanı ve performansı incelenmiştir. Araştırmacılar, bir çiçek mezatı deposunda 34000 m²'lik bir alanı kapsayan tek ağ geçidi ve tek ağ sunucusuna sahip bir LoRaWAN ağı kurmuşlardır. Çoğunlukla metalik çiçek taşıma arabalarının iletişim yolunu engellediği bu zorlu ortamda yapılan ölçümlerde SF7 yayılım faktörü ile tüm alanın kapsanabildiği görülmüş ve iç mekânda paket kayıpları ihmal edilebilir düzeyde (%0,5-0,8) gerçekleşmiştir. Bina dışında 400 metreye kadar olan noktalarda ise sadece SF12 ile iletişim sağlanabilmiş ve %6'ya varan paket hata oranları gözlemlenmiştir. Yapılan simülasyonlar, önerilen sistemin tek bir ağ geçidi ile %10'un altında paket kaybı oranıyla 6000 cihaza kadar hizmet verebileceğini göstermiştir.

Zhang ve diğ. [30] çalışmasında, plastik örtü altında taze pazar domatesi üretiminde hassas sulama için LoRaWAN tabanlı bir IoT sistemi geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, mahsul evapotranspirasyonu (ET), -60 kPa ve -40 kPa'da toprak matrik potansiyeli sensörleri (Watermark 200SS-5) ve GesCoN fertigasyon karar destek sistemi olmak üzere dört farklı sulama planlaması yaklaşımını test etmişlerdir. Sistem uygulanabilirliği, sulama suyu kullanım verimliliği (iWUE) ve mahsul verimi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, MP60 ve GesCoN uygulamalarının ET'ye kıyasla sırasıyla %15,2 ve %22,1 daha yüksek pazarlanabilir meyve verimi sağladığını, MP40'ın ise ET'ye

göre %12,5 daha düşük pazarlanabilir verim gösterdiğini ortaya koymuştur. Genel olarak, LoRaWAN tabanlı IoT sisteminin güç tüketimi, iletişim, sensör okuması ve vana kontrolü açısından iyi performans gösterdiği ve bu sistemin sebze ve diğer bahçe bitkilerinin hassas ve otomatik sulama işlemleri için uygulanabileceği, böylece mahsulün su kullanım verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırabileceği sonucuna varılmıştır.

Nguyen ve diğ. [31] çalışmasında, LoRaWAN ağlarında cihaz yazılımının havadan güncellenmesi (FUOTA) için modül tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Araştırmacılar, MCU tabanlı IoT cihazlarının yazılım geliştirmesi için modüler bir yapı ve LoRaWAN üzerinden iletişim kuran cihazlar için yeni bir FUOTA yöntemi sunmuşlardır. Önerilen yöntem, sistem yeniden başlatma gerektirmeden, modüllerin dinamik yüklenmesi ve bağlanması teknikleri sayesinde kısmi ve artımlı yazılım güncellemelerini desteklemektedir. STM32 MCU'lar üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçlar, geleneksel monolitik yaklaşıma kıyasla güncelleme boyutu ve ağ trafiği açısından 17 kata kadar iyileştirme sağlandığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca modüler tasarımın ve ilgili güncelleme mekanizmasının gömülü sistem belleği, update boyutu ve ağ yükü üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir.

Mevcut araştırmalar, LoRa'nın endüstriyel otomasyon sistemlerinde düşük maliyet, esneklik ve enerji verimliliği ile diğer teknolojilere kıyasla önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, LoRa'nın sınırlı veri iletim hızı ve lisanssız spektrum kullanımı nedeniyle oluşabilecek parazit sorunları, daha fazla araştırma ve optimizasyon gerektirmektedir. Bu teknolojinin gelişimi, endüstriyel otomasyonun daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak üretim süreçlerinde daha fazla verimlilik ve sürdürülebilirlik elde edilmesini mümkün kılacaktır.

2. ENDÜSTRİYEL OTOMASYON

2.1. Endüstri 4.0 ve Akıllı Üretim

Endüstriyel üretimin tarihsel gelişimi, teknolojik ilerlemelerin üretim süreçlerini nasıl dönüştürdüğünün çarpıcı bir örneğini sunmaktadır. Bu dönüşüm süreci, basit mekanik sistemlerden günümüzün karmaşık akıllı üretim sistemlerine uzanan bir yolculuktur.

2.1.1. Endüstriyel devrimlerin evrimi

Endüstriyel devrimlerin tarihsel sürecine bakıldığında her bir aşamanın üretim sistemlerinde önemli değişimlere yol açtığı görülmektedir. Birinci Endüstri Devrimi, 18. yüzyılın sonlarında su ve buhar gücünün mekanik üretimde kullanılmasıyla başlamıştır. Bu dönemde, insan ve hayvan gücüne dayalı üretimden mekanik üretime geçiş, üretkenlikte önemli bir artış sağlamıştır. İkinci Endüstri Devrimi 19. yüzyılın sonlarında elektrik enerjisinin kullanımı ve seri üretimin başlamasıyla gerçekleşmiştir. Henry Ford'un üretim hattı konsepti, bu dönemin en önemli yeniliklerinden biridir. 20. yüzyılın ortalarında başlayan Üçüncü Endüstri Devrimi, programlanabilir mantık kontrolörü (PLC) ve bilgisayar kontrollü sistemlerin üretimde kullanılmasıyla karakterize edilmiştir. Bu dönemde, dijital teknolojiler ve otomasyon sistemleri üretim süreçlerinde giderek daha fazla rol oynamaya başlamıştır [1, 32].



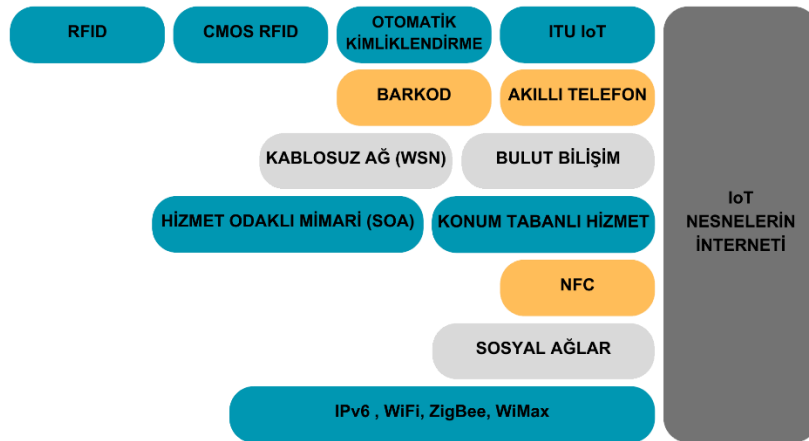
Şekil 2.1. Endüstri 1.0'dan Endüstri 4.0'a evrim [1]

Endüstri 4.0, bu gelişim sürecinin en son aşamasını temsil etmekte olup siber-fiziksel sistemler, IoT, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonunu içermektedir. Bu yeni endüstriyel yapı, üretim sistemlerinin dijitalleşmesini ve akıllı hale gelmesini sağlayarak veri odaklı karar verme süreçlerini mümkün kılmaktadır [2]. Endüstriyel devrim süreçlerinin tüm aşamaları Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde dijital dönüşümü teşvik ederek işletmelerde verimliliği artırmayı, maliyetleri düşürmeyi ve üretim esnekliğini geliştirmeyi hedefleyen yeni nesil endüstriyel devrim olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu dönüşüm süreci, geleneksel üretim yöntemlerini akıllı ve bağlantılı sistemlerle entegre ederek üretim süreçlerinin daha verimli, esnek ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlamaktadır.

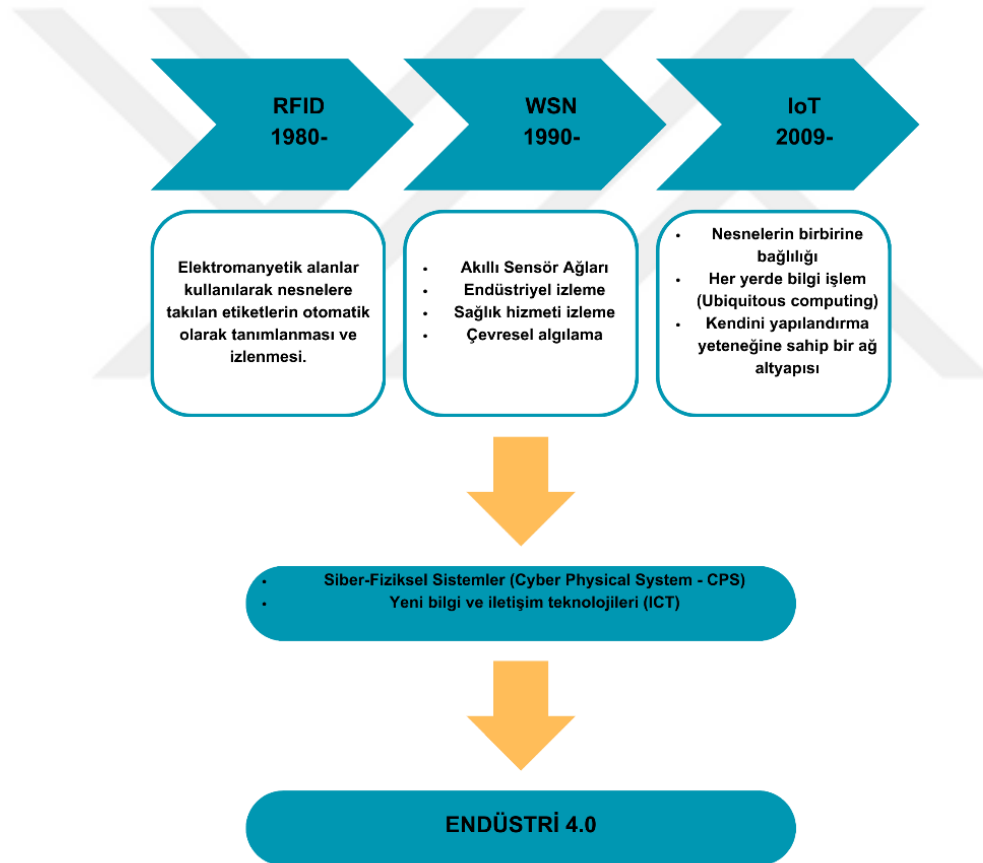
2.1.2. Endüstri 4.0’ın getirdiği yenilikler

Endüstri 4.0, dijital dönüşüm ve akıllı üretim sistemlerini içeren yeni bir sanayi devrimidir. Bu devrim, siber-fiziksel sistemler (CPS), IoT, büyük veri analitiği, yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi ileri teknoloji bileşenlerini kullanarak üretim süreçlerini dijitalleştirir ve otomatikleştirir. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinin daha hassas ve esnek hale getirilmesini sağlar ve akıllı fabrikalar olarak bilinen sürekli izlenebilir ve kendi kendini optimize eden üretim tesislerinin temelini oluşturur [2, 32]. Şekil 2.2’de nesnelerin interneti sistemlerinde kullanılan teknoloji ve cihazlara yer verilmektedir.



Şekil 2.2. IoT'yi desteklemek için kullanılan teknolojiler ve cihazlar [1]

Endüstriyel otomasyon, Endüstri 4.0'ın temel bileşenlerinden biridir ve akıllı üretimde verimlilik artırma hedefiyle makine ve sistemlerin birbiriyle entegre çalışmasını sağlar. Bu doğrultuda, sensörler, aktüatörler ve kontrol sistemleri gibi bileşenler kullanılarak süreçlerin etkin bir şekilde yönetilmesi hedeflenmiştir. Özellikle veri toplama teknolojilerinin gelişimi, otomasyon süreçlerinin etkin bir şekilde işlemesi için kritik bir rol oynar. Bu süreçlerde kullanılan denetleyici kontrol ve veri toplama (SCADA), PLC ve dağıtılmış kontrol sistemi (DCS) gibi sistemler operasyonel verileri toplar, izler ve üretim süreçlerini yönetir. Ancak bu geleneksel sistemlerin kablolu yapıları nedeniyle getirdiği yüksek maliyet ve karmaşıklık gibi sorunlar, bu sistemlerin geniş ölçekli uygulamalarını sınırlamıştır. Endüstri 4.0 ile birlikte çok daha kapsamlı veri toplama ve analiz yeteneklerine ihtiyaç duyulmaktadır [7]. Endüstri otomasyon sistemlerinin gelişimi ve kullanım alanları Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Endüstri 4.0'ın gelişimi [1]

Xu ve diğ. [1] tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirtildiği gibi Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri şunlardır:

Siber-Fiziksel Sistemler (CPS): Bu sistemler, fiziksel süreçleri dijital verilerle birleştirerek üretim sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesini ve kontrolünü sağlar. Örneğin, bir üretim

hattındaki sensörler, makine performansını sürekli olarak izleyebilir ve anormal durumları tespit edebilir.

Nesnelerin İnterneti (IoT): Üretim ekipmanları, sensörler ve kontrol sistemleri arasında kesintisiz iletişim sağlayarak veri toplama ve analiz süreçlerini otomatikleştirir. Bu sayede, üretim süreçlerinin her aşaması izlenebilir ve optimize edilebilir hale gelir.

Bulut Bilişim ve Büyük Veri: Toplanan verilerin depolanması, işlenmesi ve analiz edilmesi için güçlü bir altyapı sunar. Bu teknolojiler sayesinde, üretim süreçlerinde karmaşık analizler yapılabilir ve veriye dayalı kararlar alınabilir.

2.1.3. Endüstriyel otomasyon ve veri toplama teknolojilerinin gelişimi

Endüstri 4.0'ın temel taşlarından biri olan endüstriyel otomasyon, üretim ekipmanlarından gerçek zamanlı veri toplayarak bu verilerin analizini mümkün kılar. Geleneksel sistemlerde veri toplama, sınırlı veri türleri ve yerel yönetim sistemleri üzerinden gerçekleştirilirken Endüstri 4.0 ile birlikte veri türleri çeşitlenmiş ve veri hacmi büyük ölçüde artmıştır. Bu kapsamda, IoT tabanlı sensör ağları üretim tesislerinin geniş alanlarında gerçek zamanlı veri toplayarak makinelerin ve süreçlerin dijital ikizlerini oluşturur. Bu dijital ikizler, işletmelere sürecin daha hassas bir kontrolünü sağlar ve karar destek sistemlerini güçlendirir [8, 9].

Veri toplama teknolojilerinin gelişimi Şekil 2.4'te gösterilmektedir ve üç ana aşamada incelenebilir:

- Geleneksel Kablolı Sistemler: PLC ve SCADA sistemleri gibi klasik endüstriyel otomasyon çözümleri
- Kablosuz Sensor Ağları: Bluetooth, WiFi gibi kısa mesafeli kablosuz iletişim teknolojileri
- IoT Tabanlı Çözümler: LoRa, NB-IoT gibi düşük güç tüketimli geniş alan ağ teknolojileri



Şekil 2.4. Veri toplama teknolojilerinin tarihsel gelişimi [1, 7, 10]

IoT'nin yükselişi, endüstriyel otomasyonu yeniden tanımlayarak kablosuz iletişim protokollerine dayalı daha esnek ve ölçeklenebilir sistemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. LPWAN teknolojileri, bu dönüşümde önemli bir rol oynamıştır. Modern endüstriyel ortamlarda, özellikle LoRa gibi düşük güç tüketimli geniş alan ağ teknolojileri veri toplama süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu teknolojiler, düşük maliyetli kurulum, geniş kapsama alanı ve düşük enerji tüketimi özellikleriyle öne çıkmaktadır [4]. LoRaWAN, ağ geçitleri aracılığıyla cihazların bir merkezi sunucuya iletişim kurmasını sağlayarak veri toplama ve analiz süreçlerini kolaylaştırır [5]. Ayrıca, bu teknoloji geleneksel sistemlere kıyasla daha esnek ve ölçeklenebilir. Çalışmalar, LoRa'nın IoT tabanlı endüstriyel otomasyon sistemlerinde başarılı sonuçlar verdiğini ve üretim süreçlerinin izlenmesinde önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir [12, 13].

2.1.4. Akıllı üretim sistemleri

Akıllı üretim sistemleri, Endüstri 4.0 vizyonunu gerçekleştirmek için IoT, yapay zekâ ve veri analitiği gibi teknolojileri kullanır. Bu sistemler, makine ve cihazların birbirleriyle iletişim kurmasını ve kendi aralarında karar almasını sağlar. Örneğin, bir üretim hattında bir arıza tespit edildiğinde akıllı sistemler diğer hatları devreye alarak üretimde aksama yaşanmasını önleyebilir.

Akıllı üretim, Endüstri 4.0'ın temel bileşenlerinden biri olarak üretim süreçlerinin optimize edilmesini ve kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Akıllı üretim sistemleri, geleneksel otomasyon sistemlerinden önemli farklılıklar göstermektedir. Modern akıllı üretim sistemleri şu özelliklere sahiptir [32]:

Otonom Karar Verme: Yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmaları, üretim süreçlerinde otomatik karar verme mekanizmalarını mümkün kılar. Sistemler, toplanan verileri analiz ederek optimum üretim parametrelerini belirleyebilir.

Kestirimci Bakım: Sensörlerden toplanan veriler kullanılarak ekipman arızaları önceden tahmin edilebilir. Bu sayede, plansız duruşlar minimize edilir ve bakım maliyetleri optimize edilir.

Dinamik Optimizasyon: Üretim süreçleri, gerçek zamanlı veri analizine dayalı olarak sürekli optimize edilir. Örneğin, enerji tüketimi, hammadde kullanımı ve üretim planlaması dinamik olarak ayarlanabilir.

Akıllı üretim, bu teknolojilerin entegrasyonu ile üretim süreçlerinin daha verimli, esnek ve özelleştirilebilir hale gelmesini sağlamaktadır. Büyük veri analitiği ve yapay zekâ, toplanan verilerin işlenmesinde kritik rol oynar. Bu sayede üretim süreçleri optimize edilerek kaynak kullanımı azaltılır, maliyetler düşürülür ve ürün kalitesi artırılır.

Bu bağlamda, Endüstri 4.0 ve akıllı üretim, veri toplama ve analiz süreçlerinde önemli bir paradigma değişikliğini temsil etmektedir. Kablosuz iletişim teknolojilerinin ve IoT tabanlı sistemlerin benimsenmesi endüstriyel otomasyonun kapsamını genişletmekte ve üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirmektedir.

2.2. IoT ve Endüstriyel Uygulamaları

IoT, fiziksel cihazların ve sensörlerin internet üzerinden birbirine bağlanarak veri paylaşmasını sağlayan bir ağ sistemidir. IoT, verilerin toplanması, iletilmesi ve analiz edilmesi süreçlerini otomatikleştirerek endüstriyel otomasyonda verimliliği artırır. Bu sayede, arızaların önceden tespit edilmesi, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesi mümkün hale gelir. Bu teknoloji, üretim ekipmanlarından enerji sistemlerine, lojistik operasyonlardan kalite kontrol süreçlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [1]. Endüstriyel IoT (IIoT), bu teknolojiyi üretim süreçlerine uygulayarak üretim verimliliğini artırmak ve operasyonel maliyetleri azaltmak için güçlü bir araç haline gelmiştir [33].

2.2.1. Mevcut otomasyon sistemleri

Geleneksel otomasyon sistemleri, SCADA, PLC ve DCS gibi merkezi kontrol sistemlerini içerir. Bu sistemler, üretim süreçlerini izlemenin ve kontrol etmenin yanı sıra operasyonel verileri toplama işlevini yerine getirir. Ancak bu geleneksel veri toplama yöntemleri

genellikle yüksek kablolama maliyetleri ve sınırlı esneklik ile ilişkilidir. Ayrıca, veri toplamanın yerel olarak yapıldığı bu sistemlerde, veri depolama ve işleme kapasiteleri sınırlıdır. Bu nedenle, IoT tabanlı veri toplama sistemleri, mevcut otomasyon sistemlerine kıyasla daha esnek, ölçeklenebilir ve verimli bir alternatif sunar.

Günümüz endüstriyel ortamlarında kullanılan başlıca otomasyon sistemleri şunlardır [34, 35]:

- PLC: Endüstriyel süreçlerin kontrolünde kullanılan temel birimlerdir. Modern PLC'ler, gelişmiş işlemci kapasiteleri ve zengin haberleşme seçenekleriyle IoT sistemlerine entegre olabilmektedir. Örneğin, bir pres makinesinin kontrolünü sağlayan PLC, makinenin çalışma parametrelerini sürekli olarak izleyebilir ve bu verileri üst seviye sistemlere aktarabilir.
- DCS: Büyük ölçekli proseslerin kontrolünde kullanılan entegre sistemlerdir. DCS, proses kontrolü, veri toplama, alarm yönetimi gibi fonksiyonları tek bir platform üzerinde birleştirir. Modern DCS, bulut tabanlı çözümlerle entegre çalışabilmekte ve gelişmiş analitik yetenekler sunmaktadır.
- SCADA Sistemleri: Endüstriyel süreçlerin izlenmesi ve kontrolü için kullanılan yazılım platformlarıdır. Modern SCADA sistemleri, web tabanlı arayüzler, mobil erişim imkânları ve gelişmiş raporlama özellikleri sunar. Bu sistemler, IoT platformlarıyla entegre çalışarak gerçek zamanlı veri analizi ve kestirimci bakım gibi ileri fonksiyonlar sağlar.

2.2.2. IoT tabanlı veri toplama teknolojileri

IoT, mevcut otomasyon sistemlerine kıyasla daha esnek ve ölçeklenebilir bir çözüm sunar. IoT cihazları, geniş bir yelpazede sensörleri ve kablosuz iletişim protokollerini kullanarak üretim süreçlerinden gerçek zamanlı veri toplar. Bu veriler, bulut tabanlı analiz platformlarında işlenerek operasyonların iyileştirilmesi ve karar alma süreçlerinin desteklenmesi için kullanılır. Örneğin, IoT cihazları ile donatılmış bir üretim hattında, sensörler makinelerin durumunu sürekli olarak izleyebilir ve bu verileri merkezi bir yönetim sistemine iletebilir [10].

IoT tabanlı veri toplama teknolojileri arasında Wi-Fi, ZigBee, NB-IoT ve LoRaWAN gibi protokoller öne çıkmaktadır. Wi-Fi ve ZigBee, yüksek bant genişliği gerektiren kısa mesafeli uygulamalar için uygundur, ancak enerji verimliliği ve kapsama alanı bakımından sınırlıdır.

[9, 36]. NB-IoT ve LoRaWAN gibi LPWAN ise uzun mesafelerde enerji verimli iletişim sağlayarak IoT'nin endüstriyel uygulamalarında daha uygun bir alternatif sunar [3].

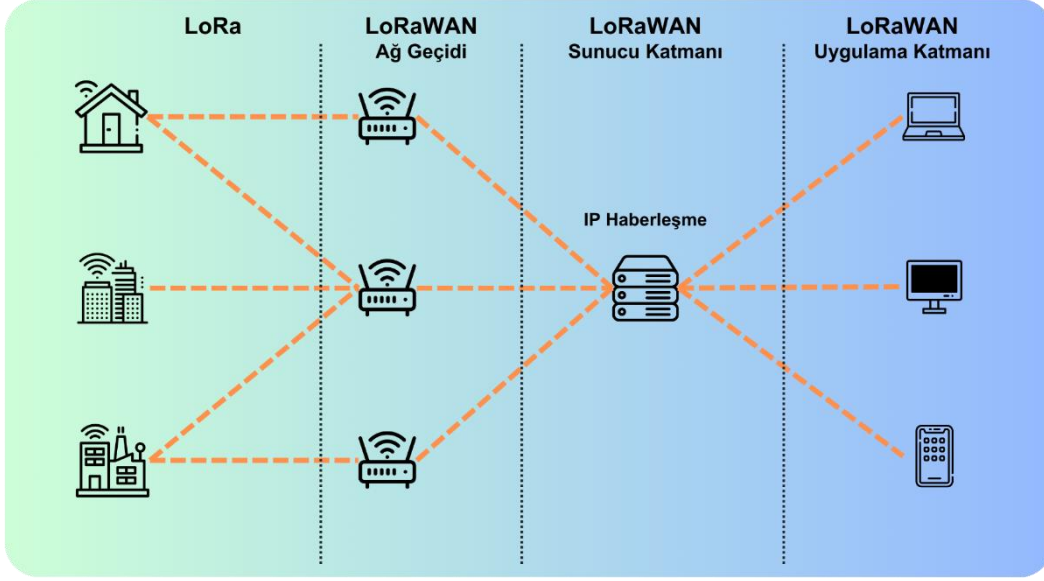
IoT'nin endüstriyel uygulamalarda kullanımı, üretim süreçlerinde büyük avantajlar sağlamaktadır:

- Gerçek Zamanlı İzleme: IoT cihazları, üretim süreçlerinden sürekli veri toplayarak gerçek zamanlı izleme imkânı sunar.
- Enerji Verimliliği: LPWAN protokollerinin kullanımı, IoT cihazlarının enerji tüketimini minimize eder.
- Düşük Maliyet: Kablosuz iletişim altyapısı, kablolu sistemlere kıyasla daha düşük kurulum maliyetleri sağlar.
- Esneklik ve Ölçeklenebilirlik: IoT cihazları, geniş bir coğrafi alana yayılan fabrikalar için esnek ve kolay ölçeklenebilir bir çözüm sunar.

IoT'nin endüstriyel uygulamalardaki bu avantajları, veri toplama ve analiz süreçlerini optimize ederek üretim süreçlerini daha verimli hale getirmektedir. Literatür, IoT'nin endüstriyel üretimde verimlilik, esneklik ve maliyet avantajları sunduğunu açıkça göstermektedir. Gelecekte, IoT'nin yapay zekâ ve blok zinciri (blockchain) gibi teknolojilerle entegrasyonu, daha da güçlü ve akıllı üretim sistemlerinin oluşmasını sağlayacaktır [32, 36].

2.3. LoRa Teknolojisi ve Çalışma Prensibi

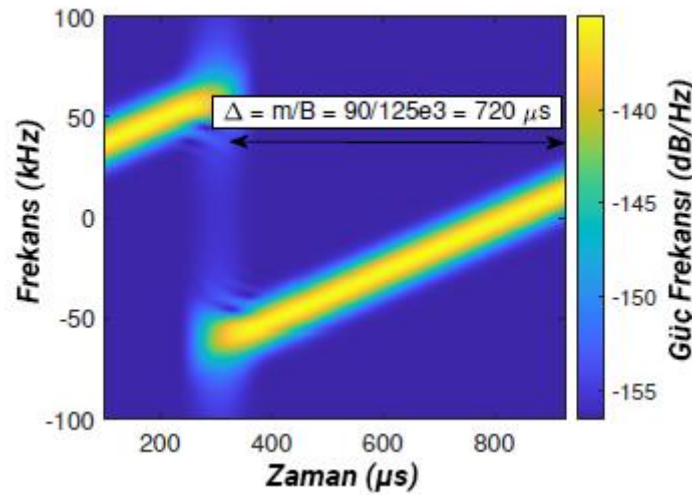
LoRa, özellikle geniş alanlarda düşük güç tüketimiyle veri iletimini sağlamak için geliştirilmiş bir kablosuz haberleşme protokolüdür. 2014 yılında Semtech tarafından patentlenen bu teknoloji, PHY, ortam erişim kontrolü (MAC) ve uygulama katmanı olmak üzere üç katmandan oluşur [14, 37]. LoRa katman yapısı Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Fiziksel katman özel bir modülasyon tekniği kullanırken, MAC katmanı LoRaWAN olarak bilinen açık bir iletişim protokolünü kullanır.



Şekil 2.5. LoRa katmanları ve çalışma prensibi [22]

2.3.1. LoRa fiziksel katman (PHY)

LoRa PHY, kablosuz haberleşme teknolojisinin temel bileşenlerinden birini oluşturur. Bu katmanda kullanılan tekniklerin başında, CSS modülasyonu gelir. CSS, belirli bir zaman aralığında frekansı doğrusal olarak değişen sinyaller (chirp) kullanılarak verilerin kodlanmasını sağlar. LoRa'da baz chirp ve down-chirp olmak üzere iki ana chirp tipi bulunur. Baz chirp, minimum frekanstan ($f_{\min} = -BW/2$) maksimum frekansa ($f_{\max} = +BW/2$) doğru artan bir profildeyken; down-chirp, bunun tersi bir yönde frekans azalmasını temsil eder [14, 38].



Şekil 2.6. LoRa sembolü, indeks 90 (SF = 7, B = 125 kHz, SF = 7 ve $T_s = 1$ ms) [14]

LoRa modülasyonunda kullanılan BW, SF ve CR gibi parametreler, haberleşme performansını doğrudan etkiler. Bant genişliği, veri hızını ve hassasiyeti belirleyen bir parametredir ve genellikle 125 kHz, 250 kHz veya 500 kHz olarak seçilir. Daha geniş bir bant genişliği daha yüksek bir veri hızı sağlasa da bu durum hassasiyette azalmaya neden olabilir. Yayılma faktörü ise her sembolde taşınan bit sayısını belirler ve 7 ile 12 arasında değişir. SF değeri arttıkça, haberleşme menzili artar ancak veri hızı ve sinyal-gürültü oranı düşer. Kod oranı, hata düzeltme kapasitesini belirler ve genellikle 4/5, 4/6, 4/7 veya 4/8 olarak ifade edilir. Daha yüksek bir kod oranı, daha güvenilir bir iletişim sağlar ancak bu durum veri hızında bir düşüşe yol açar [38, 39]. LoRa alıcısının farklı bant genişlikleri ve yayılım faktörlerindeki hassasiyeti Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Semtech SX1276 LoRa alıcısının farklı bant genişlikleri ve yayılım faktörlerindeki hassasiyeti (dBm cinsinden) [4]

BW \ SF	7	8	9	10	11	12
125 kHz	-123	-126	-129	-132	-133	-136
250 kHz	-120	-123	-125	-128	-130	-133
500 kHz	-116	-119	-122	-125	-128	-130

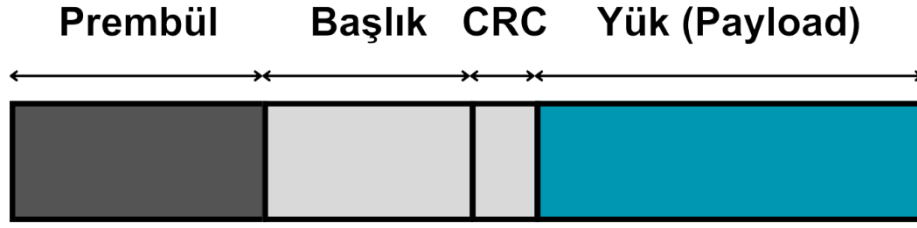
Sembol süresi (T_s), Denklem (2.1) ile hesaplanır [40]:

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

Veri hızı (R_b) ise Denklem (2.2) ile hesaplanır [40]:

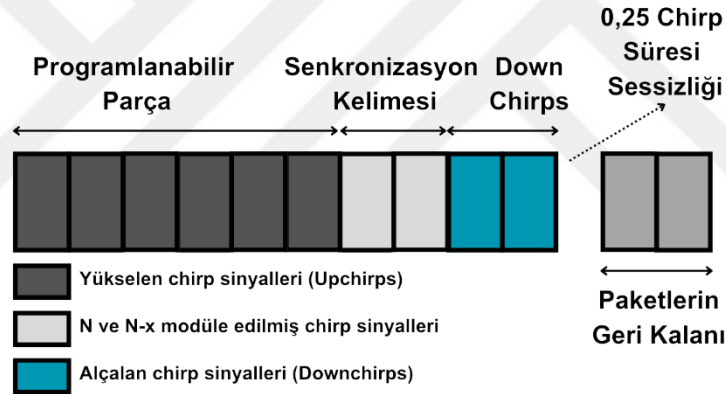
$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \quad (2.2)$$

LoRa paket yapısı Şekil 2.7’de gösterildiği gibi üç ana bölümden oluşur: preambül, operasyonel başlık ve veri yükü (payload). Preambül, alıcı ve verici arasındaki senkronizasyonu sağlar. Bu bölümde, belirli bir sembol dizisi kullanılarak sinyal senkronizasyonu gerçekleştirilir. Operasyonel başlık ise veri yükünün uzunluğu, hata düzeltme oranı ve doğruluk kontrolü için gerekli bilgileri içerir. Veri yükü bölümü, asıl bilgiyi taşıyan kısmı temsil eder ve bu bölüm maksimum 255 byte boyutunda olabilir.



Şekil 2.7. LoRa çerçeve yapısı [14]

LoRa paket yapısı, paketin başında yer alan preambül ile başlar. Preambül, alıcı ve verici arasındaki senkronizasyonun sağlanmasında kritik bir rol oynar. Bu bölüm, belirli bir sembol dizisinden oluşur ve uzunluğu 10 ile 65536 sembol arasında değişebilir. Preambülün uzunluğu, kullanılan uygulamaya ve iletişim ortamına bağlı olarak optimize edilebilir. Bu yapı, vericiden gönderilen sinyallerin alıcı tarafından doğru bir şekilde algılanmasını sağlar ve paket iletişiminin temel taşı oluşturur [13].



Şekil 2.8. Preambül yapısı [13]

Preambül yapısı Şekil 2.8’de gösterilmektedir ve şu bileşenlerden oluşur:

- Programlanabilir upchirp sekansı
- Senkronizasyon kelimesini kodlayan iki chirp sembolü
- Frekans senkronizasyonu için iki downchirp
- 0,25 sembol süresi kadar sessizlik periyodu

Operasyonel başlık bölümü, iletişimin düzenlenmesi ve verilerin doğru bir şekilde iletilmesi için gerekli olan meta verileri içerir. Bu bölümde, veri yükünün uzunluğu (byte cinsinden) belirtilir ve veri yükü için kullanılan ileri hata düzeltme (FEC) kod oranı tanımlanır. Ayrıca, başlık bölümünün doğruluğunu kontrol etmek için bir döngüsel artıklık denetimi (CRC)

değeri bulunur. Bu bilgiler, paketin içeriğinin anlaşılması ve işlenmesi için alıcı cihaz tarafından kullanılır. Paket büyüklüğünü (n_s) hesaplamak için aşağıdaki Denklem (2.3) kullanılır [4]:

$$n_s = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL-4SF+8+CRC+H}{4 \times (SF-DE)} \right\rceil \times \frac{4}{CR}, 0 \right) \quad (2.3)$$

Paketin veri yükü bölümü, gönderilecek asıl bilgiyi içerir ve maksimum 255 byte boyutunda olabilir. Bu bölüm, uygulama verilerini taşır ve isteğe bağlı olarak bir CRC kontrol değeri eklenebilir. CRC kontrolü, veri yükünün iletim sırasında bozulup bozulmadığını doğrulamak için kullanılır. Veri yükünün boyutu ve içeriği, uygulamaya özgü gereksinimlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir ve bu bölüm, LoRa paketinin temel işlevini yerine getirir.

2.3.2. Veri şifreleme ve hata düzeltme

LoRa, veri iletiminin güvenilirliğini artırmak ve iletim sırasında oluşabilecek hataları en aza indirmek için birden fazla hata düzeltme mekanizması kullanır. Bu mekanizmalar, LoRa'nın uzun mesafelerde düşük güçlü iletişim sağlama yeteneğini destekler ve sinyalin düşük sinyal-gürültü oranı (SNR) ortamlarında bile başarılı bir şekilde iletilmesini mümkün kılar [38, 39].

FEC yöntemi ile iletilen verilere ek hata düzeltme bitleri ekleyerek alıcı cihazın hata içeren verileri kendi başına düzeltmesini sağlar. Bu yöntem, iletim sırasında meydana gelebilecek veri kayıplarını ve bozulmaları telafi etmeye yardımcı olur. FEC oranı, güvenilirlik ve veri hızı arasında bir denge sağlar; daha yüksek bir FEC oranı, daha fazla hata düzeltme kapasitesi sunarken veri hızını düşürür.

Çapraz serpiştirme yöntemi ise veri bitlerini farklı zaman dilimlerine ve frekanslara dağıtarak hata direncini artırır. Bu yöntem, ardışık hataların etkisini azaltır ve veri kaybının birden fazla sembole yayılmasını önler. Böylece, iletilen veri paketlerinin bütünlüğü daha iyi korunur ve veri kurtarma ihtimali artar.

CRC yöntemi ise verinin doğruluğunu kontrol etmek için kullanılan bir hata algılama mekanizmasıdır. Gönderici, verinin sonuna bir CRC değeri ekler ve alıcı, gelen veriyle birlikte bu değeri kontrol eder. CRC, iletim sırasında meydana gelen hataların algılanmasını sağlar ve veri güvenilirliğini artırır. LoRa, başlık ve veri yükü bölümleri için ayrı CRC kontrolleri uygulayarak veri iletiminde ek bir güvenlik katmanı sunar [38, 39].

Bu hata düzeltme mekanizmaları, LoRa'nın LPWAN teknolojilerinde güvenilir veri iletimi sağlamasını mümkün kılar. Her bir mekanizma, farklı türdeki hata senaryolarına karşı etkin bir çözüm sunar ve uygulama ihtiyaçlarına göre optimize edilebilir.

2.3.2. LoRaWAN ağ mimarisi

LoRaWAN ağı, uzun mesafeli ve düşük güç tüketimli veri iletimi sağlamak için birbirleriyle entegre çalışan üç temel bileşenden oluşur: uç cihazlar, ağ geçitleri ve ağ sunucusudur. Bu bileşenler, veri iletiminin uç noktadan buluta kadar güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar.

Uç cihazlar, LoRaWAN ağındaki veri toplama veya komut uygulama süreçlerinin başladığı noktayı temsil eder. Bu cihazlar genellikle sensörler ve aktüatörlerden oluşur. Sensörler, çevresel veya operasyonel verileri toplarken (örneğin sıcaklık, nem, basınç), aktüatörler, alınan komutlara göre fiziksel bir işlem gerçekleştirir. LoRaWAN uç cihazları düşük güç tüketimine sahiptir ve batarya ömrünü uzatacak şekilde tasarlanmıştır. Cihazlar, uygulama gereksinimlerine göre üç farklı sınıfa ayrılır [39]:

- Sınıf A: Enerji verimliliği ön planda olan cihazlar. İletim sonrası zamanlanmış iki kısa dinleme penceresi açarak veri alır.
- Sınıf B: Sınıf A'ya ek olarak zaman senkronizasyonu ile planlı dinleme pencerelerine sahiptir. Bu sınıf, daha sık iletişim gereksinimleri için uygundur.
- Sınıf C: Sürekli alıcı modunda çalışan cihazlar. Enerji tüketimi daha yüksektir ancak düşük gecikme gerektiren uygulamalar için idealdir.

Ağ geçitleri, uç cihazlar ve ağ sunucusu arasındaki iletişimde bir köprü görevi görür. LoRa sinyallerini alır ve bunları IP paketlerine çevirerek ağ sunucusuna iletir. Çoklu alıcı yapısına sahip ağ geçitleri, aynı anda birçok uç cihazın sinyalini işleyebilir. LoRaWAN ağları yıldız topolojisine dayalıdır ve ağ geçitleri, bu topolojide merkezi bir rol oynar. Verici ve alıcı cihazlar arasında fiziksel bir bağlantı olmaksızın ağ geçitleri geniş bir alanı kapsayarak veri iletimini destekler.

Ağ sunucusu, LoRaWAN ağının yönetim ve kontrol merkezidir. Aşağıdaki temel işlevleri yerine getirir:

- Güvenlik Yönetimi: Verilerin şifrelenmesi ve ağda kimlik doğrulamanın sağlanması.
- Veri Yönlendirme: Uç cihazlardan gelen verilerin işlenerek doğru hedefe yönlendirilmesi.
- Cihaz Yönetimi: Uç cihazların kayıtlarının tutulması, güncellemelerin yapılması ve ağ performansının izlenmesi.

Ağ sunucusu, ağ geçitlerinden aldığı verileri analiz ederek bulut uygulamalarına aktarır ve uç cihazlara geri bildirim gönderir. Bu bileşen, ağın genel performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu üç bileşenin uyumlu çalışması, LoRaWAN ağlarının uzun mesafelerde daha enerji verimli, güvenilir ve ölçeklenebilir bir iletişim sunmasını sağlar.

LoRaWAN protokolünde veri iletimi, belirli bir paket formatı üzerinden gerçekleştirilir. Bu format, farklı iletişim ihtiyaçlarını karşılamak ve güvenli veri aktarımını sağlamak amacıyla çeşitli alanlardan oluşur. Aşağıdaki bölümlerde, LoRaWAN paketinin genel yapısı ve bileşenleri detaylandırılmıştır [38, 39].

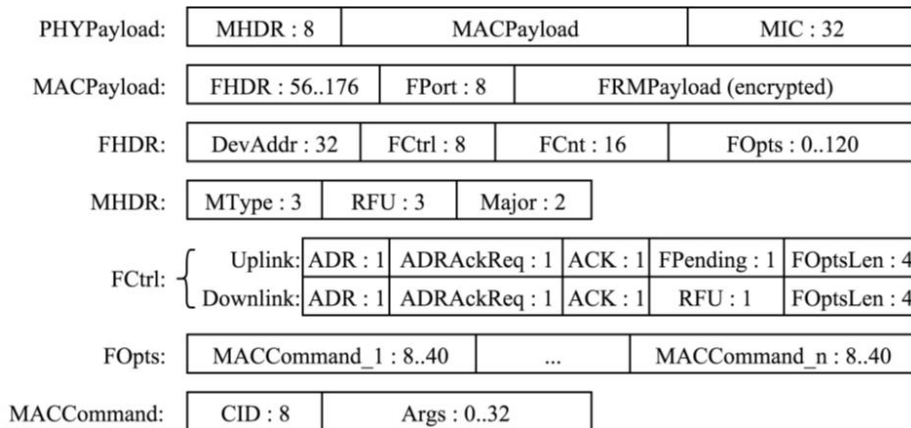
LoRaWAN paketi, üç ana bileşenden oluşur:

MAC Başlığı (MHDR): Paket iletiminin türünü ve mesaj tipini belirten bilgileri içerir. Bu başlık, ağın veri çerçevesini nasıl işleyeceğini anlamasını sağlar ve genellikle birkaç bitlik bir alandan oluşur.

MAC Payload: Paketin ana veri yükünü taşır ve aşağıdaki bileşenleri içerir:

- **Frame Başlığı (FHDR):** Cihaz kimliği, ağ adresi ve iletim parametreleri gibi meta verileri barındırır.
- **Port Alanı (FPort):** Veri yükünün hangi uygulamaya veya servise ait olduğunu belirtir. Bu alan, uygulama katmanında farklı veri türlerini ayırt etmek için kullanılır.
- **Frame Payload:** Gerçek kullanıcı verisinin bulunduğu alandır. Şifrelenmiş bir şekilde taşınarak güvenlik sağlanır.

MAC Footer (MIC): Mesaj bütünlük kodu değerini içerir. Bu değer, paket iletiminin güvenliğini ve doğruluğunu sağlamak için kullanılır. MIC, paket üzerinde yapılan herhangi bir değişikliği algılayarak veri güvenilirliğini artırır.



Şekil 2.9. LoRaWAN çerçeve formatı [4]

Şekil 2.9’da gösterilen LoRaWAN paket formatı, LPWAN ihtiyaçlarına uygun şekilde tasarlanmıştır. Paket içeriği, güvenli veri iletimi ve ağ yönetimi için optimize edilmiştir. MAC Başlığı, Payload ve Footer bileşenlerinin uyumlu bir şekilde çalışması, LoRaWAN’ın veri iletiminde güvenilirlik, esneklik ve ölçeklenebilirlik sunmasını sağlar.

2.3.3. Uygulama katmanı

LoRaWAN ağlarında uygulama katmanı, veri iletiminden sonra bu verinin işlenmesi, yönetilmesi ve güvenliğinin sağlanması için kritik bir rol oynar. Bu katman, protokolün işlevselliğini genişletmek ve uçtan uca bir çözüm sunmak amacıyla çeşitli araç ve mekanizmalar içerir [39].

LoRaWAN ağlarında uygulama protokolleri, cihazlar ve sunucular arasındaki veri iletiminin nasıl organize edildiğini belirler. En yaygın kullanılan protokoller:

- Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşıma Protokolü (MQTT): MQTT, düşük bant genişliği gereksinimlerine uygun bir yayınlama/abone olma modeline dayanır. Sensörlerin küçük boyutlu veriler göndermesi için idealdir. QoS seviyeleri ile veri iletiminin güvenilirliğini artırır ve bant genişliğini en verimli şekilde kullanır.
- Kısıtlı Uygulama Protokolü (CoAP): CoAP, hafif bir iletişim protokolü olup, REST benzeri bir yapı sunar. UDP tabanlı olduğundan daha az ağ kaynağı gerektirir ve düşük bellek tüketimiyle sınırlı cihazlarda kullanılabilir. Veri iletimi sırasında hem hız hem de enerji verimliliği sağlar.

Uygulama katmanında veri yönetimi, verinin formatlanması, işlenmesi ve depolanması süreçlerini içerir. Bu süreçler, LoRaWAN ağının etkinliği ve kullanılabilirliği açısından hayati öneme sahiptir [39]. Yaygın kullanılan veri formatları:

- JSON: İnsan tarafından okunabilir ve yaygın olarak kullanılan bir format. Veri esnekliği sağlar ancak daha büyük bir boyuta sahiptir.
- Protocol Buffers: Google tarafından geliştirilmiş, hafif ve yüksek performanslı bir format. JSON'a göre daha az yer kaplar ve daha hızlıdır.
- Kompakt İkili Nesne Temsilcisi (CBOR): İkili bir format olup, hem kompakt hem de enerji tasarrufludur. IoT cihazlarında sıklıkla tercih edilir.

Yaygın kullanılan veri işleme yöntemleri:

- Uç Nokta İşleme: Verinin, uç cihaz üzerinde işlenmesi. Bu yöntem, gecikmeyi azaltır ve cihazın işlem gücünü etkin bir şekilde kullanır.
- Bulut Tabanlı İşleme: Verinin bulut sunucularına gönderilerek işlenmesi. Daha karmaşık analizler ve depolama için idealdir.
- Edge Computing: Verinin, ağ geçidi gibi ara cihazlarda işlenmesi. Hem uç cihazın hem de bulutun iş yükünü azaltır.

LoRaWAN ağlarında veri güvenliği, uçtan uca şifreleme ve kimlik doğrulama mekanizmaları ile sağlanır [38, 39]. Yaygın kullanılan uçtan uca şifreleme yöntemleri:

- Uygulama Oturum Anahtarı (AppSKey): Uygulama katmanı şifrelemesi için kullanılır ve cihaz ile sunucu arasında veri güvenliği sağlar.
- AES-128 Şifreleme: Verilerin şifrenmesi için kullanılan standart bir algoritma olup yüksek güvenlik sunar.

Yaygın kullanılan kimlik doğrulama yöntemleri:

- Ağ Oturumları Anahtarı (NwkSKey): Ağ katmanında cihazların kimlik doğrulamasını yapar. Bu anahtar, cihazın doğru bir şekilde ağa bağlanmasını sağlar.
- Mesaj Bütünlük Kodu (MIC) Hesaplama: Mesajın doğruluğunu kontrol eder ve veri bütünlüğünü korur. Bu mekanizma, mesaj üzerinde yetkisiz bir değişiklik yapıldığını algılayabilir.

2.4. Diğer IoT Haberleşme Protokolleri

2.4.1. NB-IoT

NB-IoT, 3. nesil ortaklık projesi (3GPP) tarafından standartlaştırılmış bir LPWAN teknolojisidir ve özellikle geniş ölçekli IoT uygulamaları için geliştirilmiştir. LTE ağlarının altyapısını kullanarak geniş kapsama alanı, düşük enerji tüketimi ve maliyet etkinliği sunan NB-IoT, uzun pil ömrüne sahip cihazlar için idealdir [10]. Düşük veri hızları gerektiren uygulamalarda etkili bir çözüm olan bu teknoloji, lisanslı spektrum üzerinde çalışır ve genellikle LTE ağları ile uyumlu 200 kHz genişliğindeki kanalları kullanır. Frekans bantları, frekans bölmeli çift yönlü iletişim (FDD) modunda çalışır ve veri iletimi için uplink ve downlink ayrı kanallar üzerinden sağlanır [15].

NB-IoT, üç farklı iletim modu sunar. Stand-alone mode, GSM taşıyıcılarının bulunduğu bantları kullanırken; guard band mode, LTE taşıyıcılarının koruma bantlarını kullanır. In-band

mode ise LTE taşıyıcılarıyla aynı bant içerisinde çalışır [16]. Bu iletim modları, esneklik sağlayarak farklı ağ altyapılarına uyum sağlar. Veri hızları açısından, NB-IoT genellikle 250 kbps'ye kadar veri iletimi sunar ve sensör verileri gibi küçük veri paketlerinin iletimi için oldukça uygundur. Ayrıca, tek bir hücre baz istasyonu yaklaşık 50.000 cihaza kadar bağlantıyı destekleyebilir. Bu da yoğun cihaz dağılımına sahip IoT uygulamaları için büyük bir avantaj sağlar [16].

Veri iletimini optimize etmek için NB-IoT, uplink modunda ortogonal frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) ve downlink modunda tek taşıyıcılı frekans bölmeli çoklu erişim (SC-FDMA) kullanır. Bu yöntemler, spektrum kullanımını ve enerji verimliliğini artırarak düşük güç tüketimi ile etkili bir veri iletişimi sağlar [16].

2.4.2. Sigfox

Sigfox, LPWAN teknolojilerinden biridir ve IoT cihazları için düşük maliyetli, düşük enerji tüketimli bir iletişim çözümü sunar. 2010 yılında Fransa merkezli Sigfox şirketi tarafından geliştirilmiş ve dünya genelinde geniş bir kullanıcı tabanına ulaşmıştır. Bu teknoloji, özellikle küçük veri paketlerinin gönderilmesi gereken uygulamalar için tasarlanmıştır [3]. Sigfox, lisanssız endüstriyel, bilimsel ve medikal (ISM) bantlarında çalışır. Avrupa'da 868 MHz, Amerika'da ise 902 MHz frekanslarında iletişim sağlayarak enerji verimliliğini artıran 100 Hz gibi çok dar bir bant genişliği kullanır [41].

İletim kapasitesi açısından, Sigfox hem uplink hem de downlink iletim modlarını destekler. Uplink iletimde 12 byte veri boyutunda 140 mesaja kadar gönderim yapılabilirken, downlink iletimde 8 byte veri boyutunda 4 mesaja kadar alım sağlanır. Bu sınırlamalar, düşük bant genişliği ve enerji tüketimini optimize etmek için tasarlanmıştır. Ayrıca, Sigfox'un düşük bant genişliği kullanımı cihazların pil ömrünü 10 yıla kadar uzatabilir. Bu durum özellikle batarya ile çalışan cihazlar için büyük bir avantajdır. Ancak 100 bps gibi düşük bir veri hızı sunması nedeniyle Sigfox, gerçek zamanlı olmayan ancak süreklilik gerektiren uygulamalar için uygundur.

Sigfox ağı, üç ana bileşenden oluşur. Uç cihazlar, sensörlerden veya diğer IoT cihazlarından gelen verileri toplar ve iletir. Baz istasyonları, uç cihazlardan gelen sinyalleri alarak Sigfox bulutuna aktarır. Sigfox bulutu ise bu verileri işleyerek kullanıcılara ve uygulama arayüzlerine sunar. Sigfox, ultra dar bant teknolojisini kullanarak spektrum verimliliğini artırır ve parazit seviyelerini düşürür. Ayrıca, veri iletimi sırasında kullanılan FEC mekanizması, sinyal güvenilirliğini artırarak veri kaybını minimuma indirir [41].

2.4.3. WiFi

WiFi, kablosuz yerel ağ bağlantısı sağlamak için kullanılan en yaygın teknolojilerden biridir. İlk olarak IEEE 802.11 standardı ile tanımlanan WiFi, yüksek veri hızları ve geniş bir cihaz yelpazesi için destek sunar. Hem ev kullanıcıları hem de endüstriyel uygulamalar için ideal bir çözüm olarak kabul edilen bu teknoloji yaygın kullanım alanı ile dikkat çeker [42]. WiFi, genellikle 2,4 GHz ve 5 GHz frekans bantlarında çalışır. Yeni nesil WiFi 6 (802.11ax) standardı ise 6 GHz bandını da desteklemektedir. Kullanılan standarda bağlı olarak kanal genişlikleri 20 MHz ile 160 MHz arasında değişiklik göstermektedir [43].

Veri hızları açısından WiFi teknolojisi oldukça yüksek performans sunar. Örneğin, WiFi 4 (802.11n) 600 Mbps'ye kadar, WiFi 5 (802.11ac) 1,3 Gbps'ye kadar ve WiFi 6 (802.11ax) ise 9,6 Gbps'ye kadar veri hızlarına ulaşabilir [44]. Bağlantı kapasitesi bakımından WiFi ağları aynı anda yüzlerce cihazı destekleyebilir. Özellikle WiFi 6, OFDMA teknolojisi sayesinde daha fazla cihaz bağlantısını etkin bir şekilde yönetebilir. Bununla birlikte, WiFi, yüksek veri hızları sunmasına rağmen enerji tüketimi açısından diğer LPWAN teknolojilerinden daha yüksek değerlere sahiptir. Ancak enerji tasarrufu modları sayesinde cihazların batarya ömrü uzatılabilir [42, 43].

WiFi, radyo frekansları üzerinden veri iletimini sağlar ve iletişim, bir erişim noktası veya yönlendirici aracılığıyla gerçekleştirilir. İki ana modda çalışır. Altyapı Modu, erişim noktasının cihazlar arasındaki iletişimi yönettiği bir yapı sunarken; Ad-hoc Modu, cihazların bir erişim noktası olmadan doğrudan birbirleriyle iletişim kurmasını sağlar. WiFi ağları, taşıma algılama çoklu erişim/çarpışma önleme (CSMA/CA) protokolünü kullanarak çakışmaları engeller ve veri iletiminin güvenilirliğini artırır. Ayrıca WiFi korumalı erişim 3 (WPA3) gibi gelişmiş şifreleme protokolleri ile yüksek düzeyde güvenlik sağlar [42, 43].

2.4.4. ZigBee

ZigBee, düşük güç tüketimi ve düşük maliyetle kablosuz ağ oluşturmayı sağlayan bir iletişim protokolüdür. IEEE 802.15.4 standardına dayanan ZigBee, özellikle kısa mesafeli ve düşük veri hızları gerektiren uygulamalar için tasarlanmıştır. Akıllı evler, endüstriyel otomasyon ve tarım gibi çeşitli alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir [45]. ZigBee, ISM bandında çalışır ve çoğunlukla 2,4 GHz frekansında iletişim sağlarken bazı bölgelerde 868 MHz ve 915 MHz frekanslarını da kullanır. Kanal genişliği 600 kHz ile 2 MHz arasında değişiklik göstermektedir [45, 46].

Veri hızları açısından ZigBee, düşük performanslı uygulamalar için idealdir. Örneğin, 2,4 GHz bandında 250 kbps, 868 MHz bandında 20 kbps ve 915 MHz bandında 40 kbps hızlarında veri iletimi yapabilir. Düşük güç tüketimi sayesinde ZigBee cihazlarının pil ömrü yıllarca uzatılabilir. Özellikle uyku modunda çalışabilen düğümleri, enerji verimliliğini artırarak uzun süreli kullanım sağlar.

ZigBee, esnek ağ topolojileri sunarak çeşitli yapılandırmalarla çalışabilir. Yıldız topolojisinde tüm cihazlar bir koordinatör ile iletişim kurarken, ağaç topolojisinde hiyerarşik bir yapı ile cihazlar arasında iletişim sağlanır. Mesh topolojisi ise her cihazın diğer cihazlarla çoklu yollar üzerinden iletişim kurmasını mümkün kılarak ağın güvenilirliğini artırır [45, 46].

ZigBee, düşük güçte çalışan ve kısa süreli iletişim sağlayan cihazlar için tasarlanmıştır. Veri iletimi, IEEE 802.15.4 standardında belirtilen fiziksel ve MAC katmanları üzerinden gerçekleştirilir. ZigBee protokolü, uygulama katmanında cihazlar arası iletişimi kolaylaştırırken, 128-bit AES şifreleme ile güvenliği sağlar. Bu özellikleri, ZigBee'yi hem güvenilir hem de maliyet etkin bir çözüm haline getirmektedir [45, 46].

2.4.5. BLE

Düşük Enerjili Bluetooth (BLE), Bluetooth teknolojisinin düşük enerji tüketimine odaklanan bir sürümüdür. 2010 yılında Bluetooth 4.0 standardı ile tanıtılan BLE, özellikle düşük veri aktarımı gereksinimi olan IoT cihazları için tasarlanmıştır. Kısa mesafelerde yüksek enerji verimliliği sunan bu teknoloji, batarya ömrünü uzatarak geniş bir uygulama yelpazesi için uygun bir çözüm sunmaktadır. BLE, 2,4 GHz ISM bandında çalışır ve 1 MHz genişliğinde 40 kanal kullanır. Bu kanal yapısı, parazit riskini azaltırken güvenilir bir iletişim sağlar.

Veri hızları açısından BLE, genellikle 1 Mbps veri hızını destekler. Ancak, Bluetooth 5.0 ve üzeri sürümlerde bu hız 2 Mbps'ye kadar çıkmıştır. Enerji tüketimi oldukça düşük olan BLE, cihazların yıllarca bataryayla çalışmasını mümkün kılar. Özellikle uyku modları ve bağlantı süresi azaltılarak enerji tasarrufu sağlanır. Ayrıca, BLE aynı anda birden fazla cihaz ile iletişim kurabilir ve Bluetooth 5.0 ile birlikte cihaz başına daha fazla bağlantı kapasitesi sunulmuştur.

BLE, kısa mesafeli iletişim sağlamak için düşük güçte radyo dalgalarını kullanır ve iki ana modda çalışır. Broadcasting mode, verilerin birden fazla cihaza yayınlanmasını sağlarken; connection mode, bir merkez cihaz (örneğin bir akıllı telefon) ile uç cihaz arasında güvenli bir bağlantı kurarak veri iletimini gerçekleştirir. BLE, genel öznitelik profili (GATT) protokolünü kullanarak veri alışverişini gerçekleştirir. GATT, özelliklerin ve hizmetlerin tanımlandığı bir

profil yapısı sunar. Ayrıca, AES-128 şifreleme ile yüksek düzeyde güvenlik sağlar. Bu özellikler, BLE'yi düşük güç tüketimi ve güvenli iletişim için ideal bir çözüm haline getirmektedir [47].

2.5. LoRa'nın Endüstriyel Avantajları

LoRa, geniş kapsama alanı, düşük veri hızı ve düşük enerji tüketimi gerektiren IoT uygulamaları için ideal bir çözümdür. Kırsal alanlarda 15-30 kilometreye, kentsel alanlarda ise 2-5 kilometreye kadar ulaşabilen kapsama alanı, özellikle geniş üretim tesisleri veya kırsal alanlardaki veri toplama projeleri için uygundur. LoRa'nın en büyük avantajlarından biri olan düşük güç tüketimi, cihazların batarya ömrünü uzatır, bu da bakım maliyetlerini azaltır ve sistemin uzun süre sorunsuz çalışmasını sağlar. Ayrıca, lisanssız spektrumda çalışması kullanıcılar için daha düşük işletim maliyetleri anlamına gelir [10].

Tablo 2.2. LoRa'nın diğer protokollerle karşılaştırılması

Özellik	LoRa	Zigbee	Wi-Fi	BLE	NB-IoT	Sigfox
Kapsama Alanı	2-30 km	10-100 m	50-100 m	10-100 m	1-10 km	3-50 km
Enerji Tüketimi	Çok düşük	Düşük	Yüksek	Çok düşük	Düşük	Çok Düşük
Veri Hızı	0.3-50 kbps	250 kbps	1 Mbps-1 Gbps	1 Mbps	250 kbps	100 bps
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Orta
Kullanım Alanı	IoT, otomasyon	IoT, sensörler	Veri yoğunluğu	IoT, Mobil cihazlar	IoT, geniş alan	Basit veri iletimi gereken uygulamalar

Tablo 2.2 'de gösterilen LoRa'nın diğer kablosuz haberleşme protokolleri ile temel özellikleri açısından karşılaştırması şu şekildedir:

Sigfox: Sigfox, tıpkı LoRa gibi uzun menzilli ve düşük veri hızına sahip bir protokoldür ve düşük güç tüketimi sunar. Ancak Sigfox, sabit bir bant genişliğinde çalışır ve ağ altyapısına bağımlıdır. Bu yüzden, LoRa'nın sunduğu yerel kontrol ve ağ esnekliği Sigfox'a kıyasla daha avantajlıdır. Sigfox, belirli bir altyapıya bağlı olduğu için kurulum ve veri yönetimi açısından sınırlı bir esneklik sunar. Buna karşın LoRa, kullanıcıların özel ağ geçitleri kurarak kendi iletişim ağlarını kurmalarına imkân tanır [10].

NB-IoT: NB-IoT, hücresel altyapıya dayalı bir protokoldür ve veri iletim güvenliği ve kalitesi açısından LoRa'ya göre avantaj sağlar. Ancak, NB-IoT'nin yüksek enerji tüketimi ve hücresel altyapı gereksinimi özellikle geniş alanlarda maliyetli olabilir. LoRa'nın aksine NB-IoT,

lisanslı spektrumda çalışır ve hücresel operatörlerin kontrolündedir. Bu da kullanıcılara ağ üzerinde daha az kontrol sunar. NB-IoT, büyük veri iletim gereksinimleri ve yüksek güvenlik ihtiyaçları olan uygulamalarda tercih edilirken, LoRa düşük enerji gerektiren, geniş alanda kapsama sağlaması gereken sistemlerde avantajlıdır [16].

ZigBee: ZigBee, kısa mesafeli veri iletimi ve düşük güç tüketimi ile öne çıkar, ancak menzil sınırlamaları nedeniyle büyük endüstriyel tesislerde veri toplama için sınırlı bir seçenek sunar. ZigBee, bina içi uygulamalarda veya kısa mesafelerde yüksek veri iletim hızı gerektiren sistemlerde kullanılırken, LoRa daha geniş alan kapsama gerektiren dış mekân veya endüstriyel tesislerde daha uygundur. ZigBee, cihazlar arasında ağ geçitleri aracılığıyla veri aktarımı yapar. Ancak sınırlı mesafesi nedeniyle geniş alan uygulamalarında yeterli kapsama sunmaz [11, 48].

Wi-Fi: Wi-Fi, yüksek veri aktarım hızına sahip bir protokol olarak öne çıkar ve kısa mesafeli, yüksek bant genişliği gerektiren uygulamalar için idealdir. Ancak Wi-Fi protokolünün yüksek enerji tüketimi ve sınırlı kapsama alanı, geniş endüstriyel alanlarda veri toplama için uygun değildir. Wi-Fi, özellikle veri yoğunluğu yüksek ve gerçek zamanlı analiz gerektiren uygulamalarda tercih edilirken, LoRa gibi düşük bant genişliği gerektiren uygulamalarda etkisiz kalır. LoRa, Wi-Fi'nin aksine düşük enerji tüketimi ile uzun süre veri toplama ve aktarım imkânı sunar. Bu da onu daha geniş alanlar ve düşük enerji gereksinimi olan sistemler için avantajlı hale getirir [49].

BLE: BLE, kısa mesafeli veri iletimi, düşük güç tüketimi ve mobil cihazlarla uyumluluğu ile öne çıkmaktadır. Ancak menzil sınırlamaları nedeniyle büyük endüstriyel tesislerde veri toplama için sınırlı bir seçenek sunar. BLE, mobil cihaz bağlantılı uygulamalarda veya kısa mesafelerde çok yüksek veri iletim hızı gerektiren sistemlerde kullanılırken, LoRa daha geniş alan kapsama gerektiren dış mekân veya endüstriyel tesislerde daha uygundur [50, 51].

2.6. Kısıtlamalar ve Zorluklar

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde kablosuz iletişim teknolojilerinin kullanımı her ne kadar birçok avantaj sunsa da çeşitli zorluklar ve kısıtlamalar barındırır. Geniş kapsama alanı, düşük güç tüketimi ve güvenilir veri iletimi gibi talepler, kablosuz teknolojiler için çözülmesi gereken önemli sorunlardır. Bu bağlamda LoRa teknolojisi, endüstriyel ortamların gerektirdiği bazı temel zorlukları ele alarak çeşitli çözümler sunmaktadır.

2.6.1. Çekim alanı ve mesafe sorunları

Geleneksel kablosuz iletişim teknolojilerinde çekim alanı, yüksek sinyal kalitesi için sınırlı kalmaktadır. ZigBee ve Wi-Fi gibi protokoller, kısa mesafelerde yüksek veri iletimi sağlarken, geniş alanlarda sinyal gücü düşebilir ve veri iletimi güvenilir hale gelebilir. Endüstriyel tesislerde ise kablosuz veri toplama sistemlerinin fabrika sahası içinde geniş alanlarda çalışması gereklidir. LoRa, geniş menzil kapasitesi ile bu sorunu aşar ve yaklaşık 15-30 kilometreye kadar veri iletimi sağlayarak endüstriyel tesislerin tamamını kapsama altına alır. Bu durum, özellikle büyük tesisler ve uzak alanlara yayılmış üretim sahaları için avantaj sunar [10-12, 33].

2.6.2. Parazit ve sinyal girişimi

Endüstriyel ortamlarda çok sayıda makine ve cihazdan yayılan elektromanyetik sinyaller, kablosuz iletişimde parazit ve girişimlere neden olabilir. Bu durum, veri iletiminde kesintilere yol açar ve güvenilirliği düşürür. LoRa, CSS modülasyon tekniğini kullanarak sinyal parazitine karşı dayanıklılık sağlar. CSS, sinyalin geniş bir frekans bandına yayılmasını sağladığından parazit seviyelerini azaltır ve veri iletiminde daha kararlı bir performans sunar. Böylece LoRa, parazit oranının yüksek olduğu sanayi ortamlarında veri iletiminin güvenilirliğini artırır [10-12, 33].

2.6.3. Enerji tüketimi ve pil ömrü

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde uzun süreli çalışması gereken sensörler ve cihazlar için düşük enerji tüketimi kritik bir gereksinimdir. Wi-Fi ve NB-IoT gibi protokoller yüksek güç tüketimine sahiptir, bu da bataryalı cihazlarda pil ömrünü kısaltır ve sık bakım gereksinimi doğurur. LoRa, düşük enerji tüketimi ile uzun süreli veri iletimi sağlar ve batarya ömrünü önemli ölçüde artırır [5]. LoRa tabanlı sensörler, tek bir batarya ile yıllarca çalışabilir. Bu durum büyük endüstriyel tesislerde bakım maliyetlerini azaltır ve cihazları uzun süreli operasyonel hale getirir [10-12, 33].

2.6.4. Bant genişliği ve veri hızı sınırlamaları

Kablosuz iletişimde veri hızının yüksek olması istenirken aynı zamanda düşük enerji tüketimi ve geniş alan kapsama gibi gereksinimlerle birlikte sağlanması zordur. LoRa'nın veri hızı, düşük bant genişliğine sahip olduğundan yüksek veri hızına ihtiyaç duyulan uygulamalarda sınırlayıcı olabilir. Ancak endüstriyel IoT uygulamaları genellikle sıcaklık, basınç, nem gibi düşük veri hızında ve küçük paketlerde veri iletimi gerektiren parametreler için LoRa, yeterli

bir çözüm sunar. Veri hızının öncelikli olmadığı uzun mesafeli, düşük bant genişliğine sahip uygulamalarda LoRa etkili bir seçenek olarak öne çıkar [4, 12, 33].

2.6.5. Güvenlik ve gizlilik

Kablosuz iletişimde veri güvenliği, özellikle hassas endüstriyel verilerin toplandığı ve iletiildiği sistemlerde önem taşır. LoRa protokolü, veri güvenliği sağlamak için şifreleme teknikleri kullanır [3]. LoRaWAN, uçtan uca şifreleme ve ağ güvenliği sunarak yetkisiz erişimlere karşı koruma sağlar. Ancak diğer hücresel tabanlı protokollere kıyasla daha az gelişmiş güvenlik önlemleri sunduğu için kritik güvenlik gereksinimlerine sahip alanlarda LoRa'nın güvenlik altyapısının geliştirilmesi gerekebilir. Buna rağmen genellikle endüstriyel veri toplama için yeterli güvenlik sağladığı ve maliyet açısından avantaj sunduğu kabul edilmektedir [10-12, 33].

2.6.6. Çevresel zorluklar ve fiziksel engeller

Endüstriyel tesislerdeki kalın duvarlar, metal yapılar ve ekipmanlar kablosuz sinyallerin yayılmasını zorlaştırır ve sinyal gücünü zayıflatabilir. LoRa, geniş alan kapsama özelliği sayesinde bu tür fiziksel engelleri daha kolay aşar. Ancak yapı malzemesi veya yerleşim düzeni LoRa sinyallerinin menzilini yine de etkileyebilir. Bu tür durumlarda, sinyal güçlendiriciler veya ek ağ geçitleri kullanılarak LoRa'nın kapsama alanı genişletilebilir ve güvenilir veri iletimi sağlanabilir [10-12, 33].

Sonuç olarak, kablosuz iletişimde karşılaşılan kısıtlamalar, LoRa'nın sunduğu çözümlerle aşılmakta ve bu teknoloji endüstriyel otomasyon için avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. LoRa'nın düşük enerji tüketimi, geniş kapsama alanı, parazite dayanıklılık ve güvenlik özellikleri, endüstriyel veri toplama süreçlerinde karşılaşılan zorlukları hafifletmekte ve verimli bir operasyonel yapı sağlamaktadır. Bu avantajlar, endüstriyel tesislerin verimliliklerini artırırken aynı zamanda operasyonel maliyetlerini de düşürmektedir.



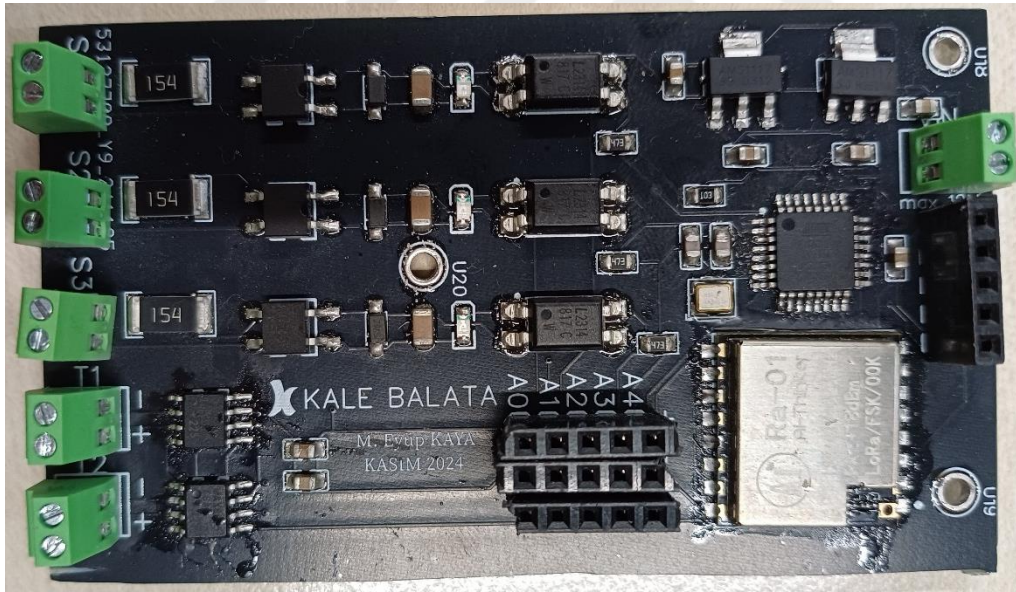
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Sistem Tasarımı ve Bileşenler

Bu çalışmada kullanılan sistem, endüstriyel pres makinelerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve verilerin analizi için tasarlanmış olup veri toplama donanımı, ana ağ geçidi, analiz sunucusu ve kullanıcı arayüzü olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Sistem genel mimarisi, her bir bileşenin birbiriyle etkileşim içinde çalışmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır.

3.1.1. Veri toplama donanımı

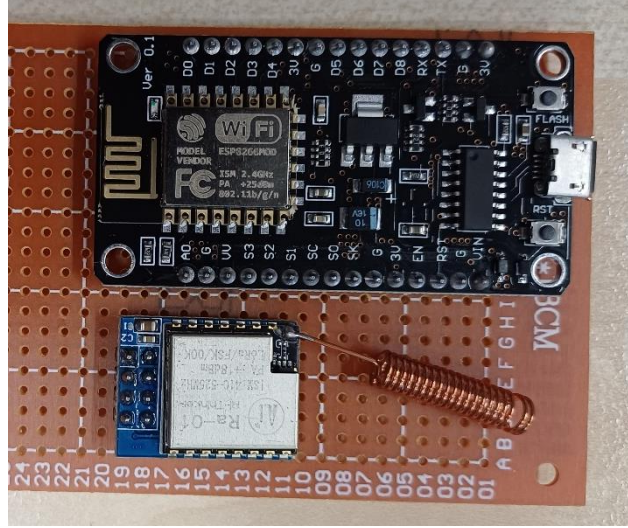
Pres makinelerine entegre edilen optokuplör tabanlı donanım, makinelerin çalışma durumlarını izlemek ve ilgili verileri kaydetmek amacıyla tasarlanmıştır. Donanım, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi ATMEGA328P-AU mikrodenetleyicisi ve RA-01 LoRa modülünden oluşmaktadır. Optokuplörler, makine çalışma ve durma sinyallerini algılayarak mikrodenetleyiciye iletir ve bu veriler LoRa modülü aracılığıyla ana ağ geçidine gönderilir.



Şekil 3.1. Veri toplama donanımı

3.1.2. Ana ağ geçidi

ESP8266 Wi-Fi modülü ve RA-01 LoRa modülünü içeren bu cihaz, veri toplama donanımından alınan sinyalleri COM portu aracılığıyla bilgisayara iletir. Ağ geçidi, geniş kapsamlı veri iletimi sağlamak için kritik bir rol oynar. Ana ağ geçidi Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Ana ağ geçidi (Gateway)

3.1.3. Analiz sunucusu

Verilerin depolandığı ve analiz edildiği SQL tabanlı bir veritabanı sistemidir. Sunucu, gelen verileri işleyerek kullanıcı arayüzü ile entegrasyon sağlar.

3.1.4. Kullanıcı arayüzü

Visual Studio kullanılarak C# programlama diliyle geliştirilen bir Windows Form uygulaması, tüm pres makinelerinin anlık durumlarının ve üretim geçmişlerinin görüntülenmesini sağlar. Bu arayüz, kullanıcıların üretim süreçlerini kolayca izlemesine ve gerektiğinde müdahale etmesine olanak tanır.

3.2. Donanım ve Yazılım Altyapısı

3.2.1. Donanım

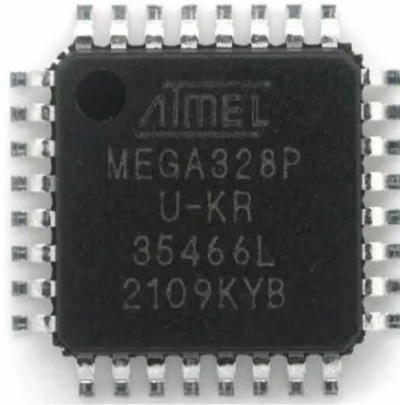
Sistemin donanım altyapısı, veri toplama donanımından ve ana ağ geçidinden oluşmaktadır. Bu donanımlar, pres makinelerinin çalışma durumlarını algılayıp veriyi işlemek ve iletmek üzere tasarlanmıştır.

Veri toplama donanımı üzerinde yer alan optokuplörler, 220V'luk sinyalleri algılayarak mikrodenetleyiciye güvenli bir şekilde ileten bileşenlerdir. Çalışma sırasında elektriksel izolasyon sağlar ve sinyalleri anlamlı verilere dönüştürerek mikrodenetleyiciye iletir. Pres makinelerinden sinyal izolasyonu için Şekil 3.3'te gösterilen 817 serisi optokuplörler kullanılmıştır. Bu optokuplörler, 5000 V izolasyon gerilimi ve 80 V maksimum çalışma gerilimine sahip olup endüstriyel elektrik gürültüsüne karşı etkili koruma sağlamaktadır.



Şekil 3.3. EL817 Optokuplör entegresi [52]

Veri toplama donanımlarının merkezi işlem birimi olarak Şekil 3.4’te gösterilen ATMEGA328P-AU mikrodeneetleyici kullanılmıştır. Bu mikrodeneetleyici, 16 MHz çalışma frekansı, 32KB flash bellek ve 2KB SRAM kapasitesi ile sistem gereksinimlerini karşılamaktadır. Optokuplörlerden gelen sinyalleri işleyip LoRa modülü aracılığıyla ana ağ geçidine ileten mikroişlemcidir. Bu mikrodeneetleyici, sistemin kontrol merkezi olarak çalışır.



Şekil 3.4. ATMEGA328P-AU entegresi [53]

Donanım üzerinde yer alan RA-01 modülü ise veriyi kablosuz olarak uzun mesafelere iletmek için kullanılan düşük güç tüketimli iletişim modülüdür. Verilerin güvenilir bir şekilde aktarılmasını sağlar. Kablosuz haberleşme için tercih edilen RA-01 LoRa modülü, SX1278 çipine dayalı olup 868 MHz çalışma frekansına ve +20 dBm’e kadar ayarlanabilir veri gücüne sahiptir. -148 dBm alıcı hassasiyetine sahip bu modüller düşük güç tüketimi (uyku modunda $<1 \mu A$) ile öne çıkmaktadır. Sistemde kullanılan RA-01 LoRa modülü Şekil 3.5’te gösterilmektedir.



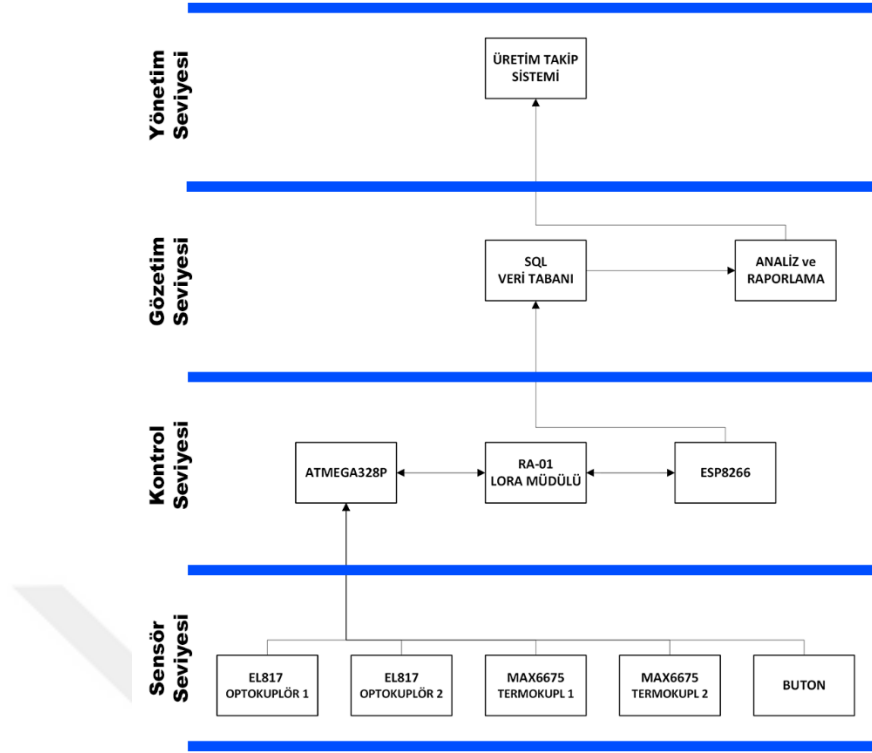
Şekil 3.5. RA-01 LoRa entegresi [54]

Donanım üzerinde yer alan termokupl girişleri pres makinelerinin kalıp sıcaklıklarını izlemek için kullanılır. Kalıp sıcaklıkları, üretim kalitesini etkilediği için kritik öneme sahiptir. Donanım üzerinde, K-tipi termokupl sıcaklık sensörlerinden sıcaklık ölçümü yapabilen MAX6675 entegreleri kullanılmıştır.

Temel olarak kullanılan modül ve bileşenlerin dışında, donanım üzerinde 5 adet analog giriş pini yer almaktadır. Yedek olarak kullanılan bu girişler, ihtiyaç halinde farklı sensörlerden veri toplamak için sisteme eklenmiştir.

Ana ağ geçidi donanımı üzerinde ESP8266 WiFi modülü ve RA-01 LoRa modülü kullanılmaktadır. Ana ağ geçidinde kullanılan ESP modülü, LoRa'dan gelen verileri COM portu aracılığıyla bilgisayara iletir.

Sistem donanımı, düşük güç tüketimi ve güvenilir veri aktarımı için optimize edilmiştir. Donanım bileşenlerinin her biri, sistemin genel performansını artırmak ve fabrika ortamına uyum sağlamak amacıyla seçilmiştir.



Şekil 3.6. Sistemin endüstriyel otomasyon piramidinde gösterimi

Şekil 3.6’da gösterilen sistem, endüstriyel otomasyon piramidi çerçevesinde modellenmiştir. Sensör seviyesi, EL817 optokuplörler, MAX6675 termokupl sensörleri ve buton gibi bileşenlerden oluşarak veri toplama işlemini gerçekleştirir. Kontrol seviyesi, ATMEGA328P mikrodenetleyici ve RA-01 LoRa modülü ile bu sensörlerden gelen verileri işler ve kablosuz iletişimi yönetir. Gözetim seviyesi, ESP8266 modülü aracılığıyla verileri SQL veri tabanına ileterek analiz ve raporlama süreçlerini destekler. Yönetim seviyesi, üretim takip sistemini içerir ve SQL veri tabanı üzerinden analiz edilen verileri kullanarak süreçleri optimize etmeye yönelik kararlar almayı sağlar. Bu yapı, sistemin hiyerarşik bir düzen içinde etkin bir şekilde çalışmasını sağlayarak endüstriyel otomasyon süreçlerinde verimlilik artışı sunmaktadır.

3.2.2. Yazılım

Sistemin yazılım altyapısı, veri toplama, iletim, depolama ve analiz işlemlerini gerçekleştiren bir yazılım paketiyle desteklenmiştir.

Veri toplama ve analiz süreçlerini gerçekleştiren yazılım, Visual Studio geliştirme ortamında C# programlama dili kullanılarak hazırlanmıştır. COM bağlantısı ve SQL entegrasyonunu içeren kapsamlı bir çözüm sunar. Ana ağ geçidinden COM portu üzerinden gelen verileri işleyecek SQL sunucusuna kaydeder.

LoRa modüllerinden gelen veriler, SQL veri tabanına kaydedilir. Veri tabanı tasarımı, başlangıç ve bitiş zamanlarını, makine kimlik bilgilerini ve diğer önemli parametreleri içerir. Gelen verinin tipine göre gerekli triggerlar çalıştırarak düzenleme ve güncellemeleri otomatik olarak yapar.

Kullanıcı arayüzü yazılımı, kullanıcıların üretim verilerini gerçek zamanlı olarak izlemelerine olanak tanır. Bu uygulama, makinelerin anlık durumlarını, geçmiş verilerini ve performans analizlerini bir arayüzde sunar.

Yazılım ve donanımın uyum içinde çalışması, sistemin fabrika ortamındaki gereksinimlere cevap vermesini sağlar. Veri toplama ve analiz süreçlerinin güvenilir ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için yazılım altyapısı optimize edilmiştir.

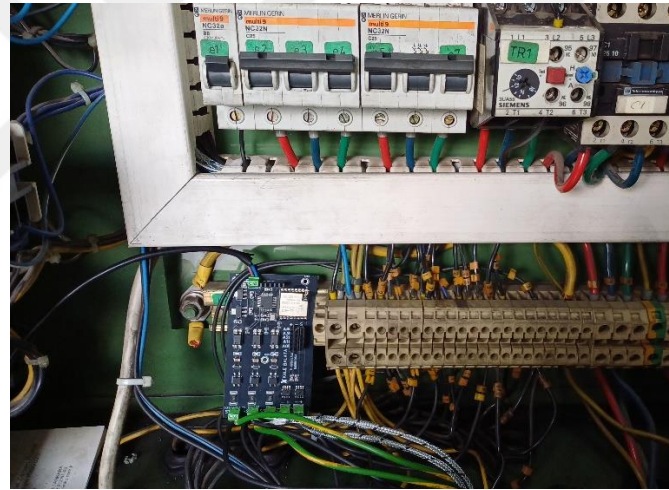
3.3. Veri Toplama ve İletim Süreci

3.3.1. Pres makinelerinden veri toplama işlemi

Pres makinelerinden veri toplama işlemi, her makineye özel olarak konumlandırılmış sensörler ve veri toplama modülleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Veri toplama süreci, pres makinelerinin çalışma ve durma durumlarını takip etmek için özel olarak tasarlanmış bir sistem üzerinden yürütülmektedir. Bu sistemde, Şekil 3.7’de gösterilen pres üzerinde yer alan ana zaman sayacı başlangıç sinyali (220V AC) birinci optokuplör tarafından okunur ve aynı şekilde bitiş sinyali ikinci optokuplör tarafından okunur. Üçüncü optokuplör ise yedek olarak kullanılmaktadır. Optokuplörler, gelen sinyalleri ATMEGA328P-AU mikrodenetleyiciye iletir. Ayrıca, iki adet MAX6675 entegresi, K-tipi termokupllardan veri okuma işlemini gerçekleştirir ve bu veri, kalıp sıcaklıklarının takibi için kullanılır. Veri aktarımı, SPI haberleşme protokolü ile mikrodenetleyiciye yapılır. Sistemde ayrıca beş adet analog giriş portu bulunmaktadır ve bu girişler, ilave sensörler için yedek olarak tasarlanmıştır. Bu portlar, ATMEGA328P-AU'nun ADC kanallarına bağlıdır. Veri toplama modülünün pres üzerinde yer alan panoya yerleşimi Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Üretimde kullanılan pres makinesi



Şekil 3.8. Veri toplama donanımı pano yerleşimi

3.3.2. LoRa protokolü ile kablosuz veri iletim altyapısı

LoRa protokolü, veri toplama modülleri ile ana ağ geçidi arasında kablosuz veri iletimi sağlar. Mikrodenetleyici tarafından işlenen veriler, RA-01 LoRa modülü aracılığıyla ana ağ geçidine kablosuz olarak gönderilir. Her veri iletimi, Tablo 3.1.'de yer alan ilgili bilgilerle birlikte paketlenir.

Tablo 3.1. LoRa paket içeriği

PAKET PARÇACIĞI	BOYUT	
Cihaz ID	2 byte	HEADER
Paket Sıra No	2 byte	
Zaman Damgası	4 byte	
Durum Bilgisi	2 byte	PAYLOAD
Sıcaklık Değeri 1	4 byte	
Sıcaklık Değeri 2	4 byte	
CRC	2 byte	

Ana ağ geçidi, ESP8266 Wi-Fi modülü ve RA-01 LoRa modülünden oluşur. Bu geçit, LoRa modüllerinden gelen verileri COM portu üzerinden bilgisayardaki yazılıma iletir ve veriler SQL tabanlı bir veritabanına kaydedilir. SQL sunucusunda önceden tasarlanmış tablo yapısı, makine kimliği, başlangıç ve bitiş zamanları, sıcaklık verileri ve durum bilgilerini içerir. Depolanan veriler, kullanıcı arayüzü aracılığıyla gerçek zamanlı olarak görüntülenebilir ve analiz edilebilir.

LoRa protokolü, düşük güç tüketimi ve geniş kapsama alanı ile veri iletiminin güvenilirliğini artırır. Parazit önleme mekanizmaları ve veri doğrulama algoritmaları, veri kaybını ve hatalarını minimize eder. Sistem, fabrika ortamında güvenilir veri iletişimi sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Veri kaybını önlemek için paket doğrulama mekanizmaları kullanılmakta ve her veri paketi benzersiz kimlik bilgisi ile işaretlenmektedir. Bu sayede, hangi verinin hangi makineye ait olduğu kesin olarak belirlenmekte ve üretim sürecinin doğru şekilde takibi sağlanmaktadır. LoRa protokolü ile gerçekleştirilen kablosuz veri iletimi, sistemin hem güvenilirliğini hem de esnekliğini artırarak geniş alanlarda kesintisiz iletişim imkânı sunmaktadır. Bu altyapı, geleneksel kablolu sistemlere kıyasla daha düşük maliyet ve kurulum kolaylığı sağlamaktadır.

3.4. Veri Tabanı Tasarımı ve Yönetimi

3.4.1. SQL tabanlı veri tabanı tasarımı

Sistemde kullanılan SQL tabanlı veri tabanı, pres makinelerinden toplanan verilerin güvenilir bir şekilde depolanması ve analiz edilmesi için tasarlanmıştır. Veritabanında kullanılan tablo tasarımı Tablo 3.2.'de yer alan unsurları içerir.

Tablo 3.2. SQL tablo tasarımı

SÜTUN	VERİ TİPİ	AÇIKLAMA
TAKIPID	int	Her bir kaydı benzersiz şekilde tanımlayan birincil anahtar
TARİH	smalldatetime	Verinin kaydedildiği tarih
PRESID	varchar(10)	Verinin geldiği pres makinesinin kimlik numarası
BAS_SAAT	datetime	Makinenin çalışma başlangıç saati
BIT_SAAT	datetime	Makinenin çalışma bitiş saati
DURUM	int	Makinenin çalışma durumu (ör. Çalışıyor, Bitti, Fire)
SICAKLIK_1 SICAKLIK_2	varchar(30)	Pres makinesinin sıcaklık verileri
ANALOG_1 ANALOG_2 ANALOG_3 ANALOG_4 ANALOG_5	varchar(30)	Analog girişlerden gelen veriler
OPTO_YEDEK	varchar(30)	Ek sinyal bilgileri için yedek alan

Tablo, her makine kimliği için ayrı kayıtlar oluşturur ve çalışma durumları ile zaman bilgilerini birincil anahtar olan TAKIPID üzerinden izler.

3.4.2. Veri yönetimi süreçleri

Verilerin doğru bir şekilde işlenmesi ve saklanması için çeşitli süreçler uygulanmaktadır. İlk olarak, veritabanına yazılmadan önce gelen veriler doğruluk açısından kontrol edilir. Hatalı veya eksik veriler tespit edildiğinde sistem uyarı verir ve gerekli düzeltmeleri talep eder. LoRa modüllerinden gelen veriler, Windows Form uygulaması aracılığıyla doğrudan veritabanına kaydedilir. Yeni bir pres döngüsü başladığında tabloda yeni bir kayıt oluşturulur ve bu kaydın durumu “Çalışıyor” (DURUM = 1) olarak, başlangıç zamanı ve sıcaklık verileriyle birlikte kaydedilir. Pres döngüsü bittiğinde ilgili kayıt “Bitti” (DURUM = 0) olarak güncellenir ve bitiş zamanı eklenir. Yeni oluşturulan bir kayıt satırında bitiş sinyali gelmeden art arda iki başlangıç sinyali geldiği durumda ise ilk kaydın durum bilgisi “Fire” (DURUM = 3) olarak güncellenir ve ikinci oluşan kayıt için normal pres döngüsü süreci işletilir.

Veritabanındaki tablolar, düzenli yedekleme ve indeksleme süreçleri ile performans açısından optimize edilir. Eski veya gereksiz veriler arşivlenir ya da temizlenerek, tüm verilerin SQL tabanlı sunucuda yapılandırılmış bir şekilde saklanması sağlanır. Bu işlemler sırasında veri kaybını önlemek için düzenli olarak yedekleme yapılır. Veri tabanı, kullanıcı arayüzü üzerinden gelen sorgulara hızlı cevap verecek şekilde optimize edilmiştir. Kullanıcılar, veritabanındaki verilere erişerek pres makinelerinin çalışma durumu, üretim geçmişi ve performans analizlerini görebilir. Veritabanındaki veriler, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre anlamlı raporlara dönüştürülür ve bu raporlar, kullanıcı arayüzü aracılığıyla gerçek zamanlı olarak görüntülenebilir.

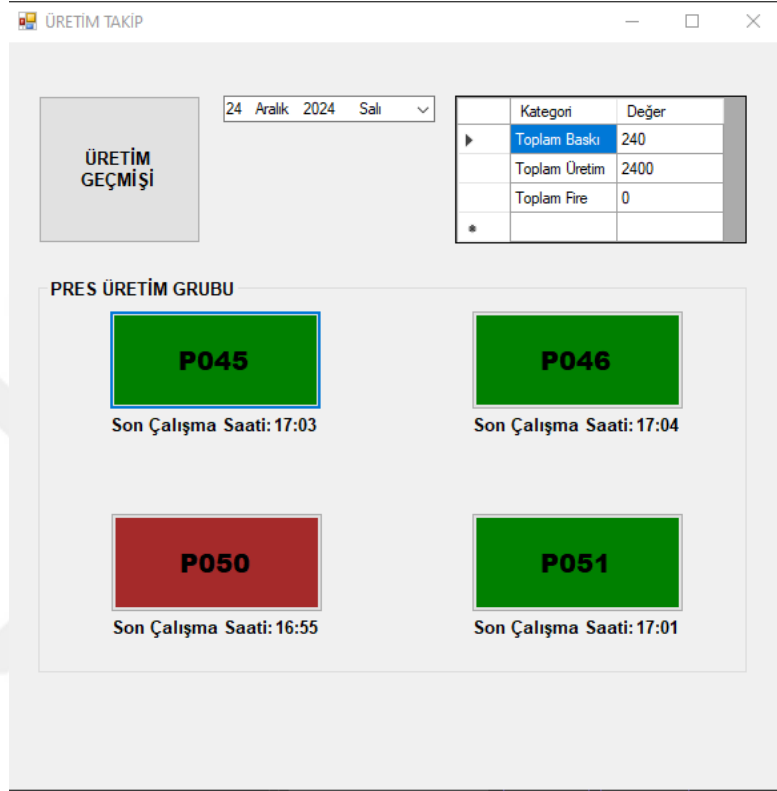
Bu yapı, pres makinelerinden gelen verilerin tutarlı ve güvenilir bir şekilde saklanmasını sağlar. Aynı zamanda, toplanan verilerin analiz edilerek üretim süreçlerinin optimize edilmesine olanak tanır.

3.5. Kullanıcı Arayüzü ve Veri Görselleştirme

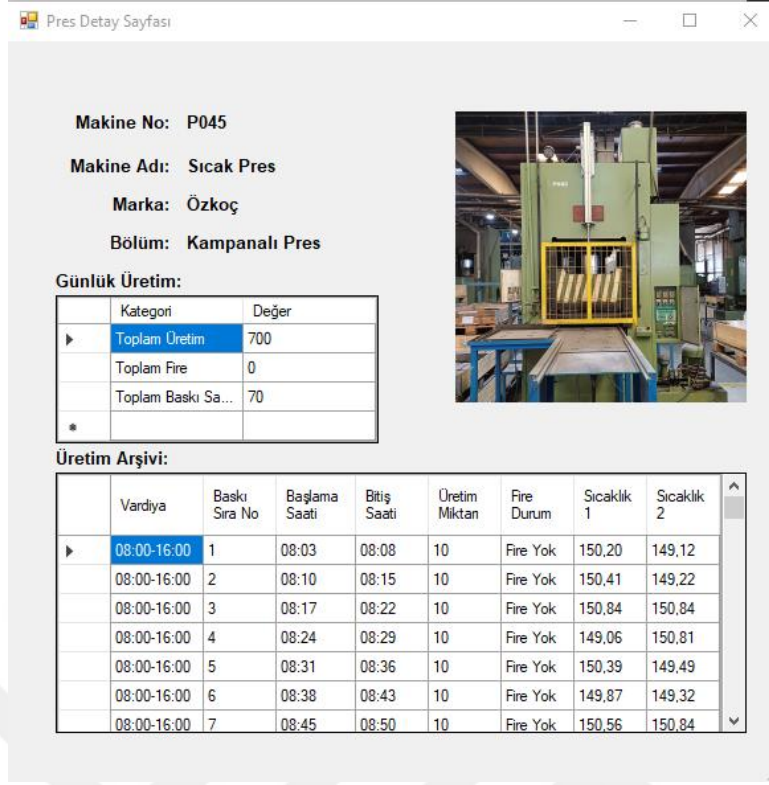
3.5.1. Kullanıcıların arayüz tasarımı ve yazılım geliştirilmesi

Kullanıcı arayüzü, üretim süreçlerinin kolayca izlenebilmesi ve analiz edilebilmesi amacıyla kullanıcı dostu bir şekilde tasarlanmış ve Visual Studio ortamında C# programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Ana panel, tüm pres makinelerinin durumlarının tek bir ekranda görüntülendiği bir kontrol paneli olarak işlev görür ve makine kimlikleri, çalışma durumları,

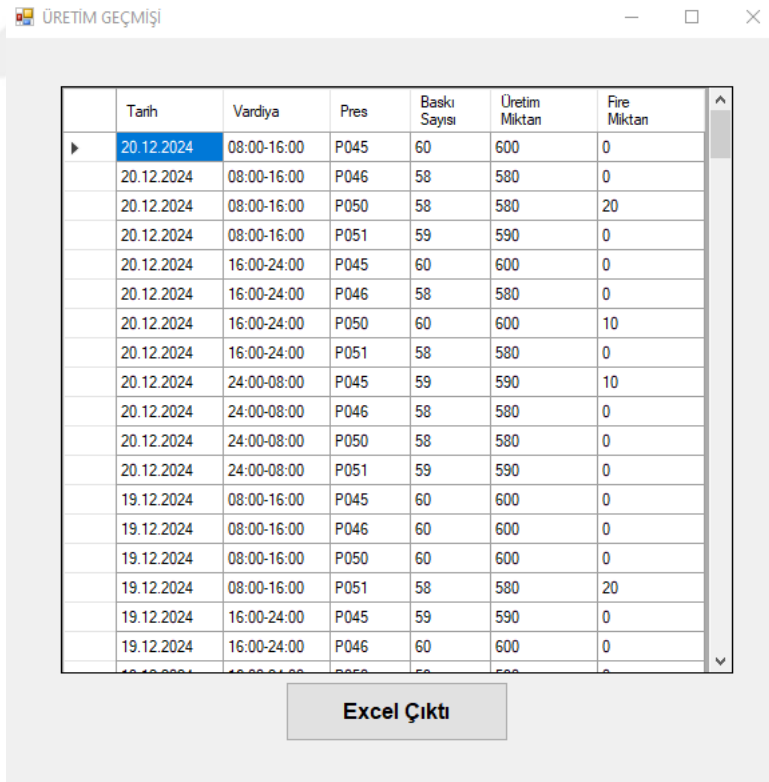
tarikh ve saat bilgilerini içerir. Detay görünümü ise seçilen bir pres makinesine ait üretim geçmişi, çalışma süreleri, duruş süreleri, sıcaklık değerleri ve fire oranları gibi detaylı bilgileri sunar. şekil 3.9.'da kullanıcı arayüz sayfası, şekil 3.10.'da pres makinasına ait detay bilgiler ve şekil 3.11.'de ise üretim arşivi gösterilmiştir.



şekil 3.9. Kullanıcı arayüzü anasayfası



Şekil 3.10. Pres detay sayfası



Şekil 3.11. Üretim arşiv sayfası

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Sistem Performans Analizi

Sistem, fabrika ortamında kapsamlı bir şekilde test edilmiş ve doğrulanmıştır. Test süreci, veri toplama modülleri ve yazılım olmak üzere iki ana bileşene odaklanmıştır.

Veri toplama modüllerinde, optokuplörlerin 220V sinyalleri doğru şekilde algılayıp mikrodenetleyiciye ilettiği, başlangıç ve bitiş sinyallerinin hatasız algılandığı doğrulanmıştır. RA-01 LoRa modülü, veri paketlerini ana ağ geçidine doğru bir şekilde iletmış ve herhangi bir veri kaybı olmadan sunucuya aktarmıştır. Ayrıca, termokupl girişlerinin de sağlıklı bir şekilde çalıştığı, sıcaklık verilerinin doğru bir şekilde sunucuya iletildiği gözlemlenmiştir.

Yazılım testlerinde ise, Windows Forms kullanıcı arayüzünün doğru verileri gösterdiği ve gerçek zamanlı güncellemeleri başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür. SQL veri tabanına verilerin hatasız kaydedildiği, sorguların doğru sonuç verdiği ve yazılımın hatalı veri girişleri veya sistem hatalarına karşı kullanıcıyı doğru şekilde bilgilendirdiği doğrulanmıştır.

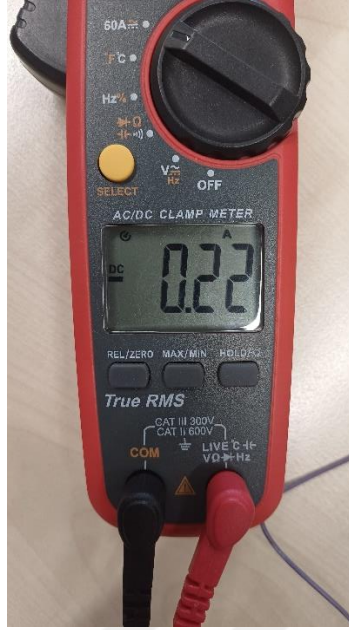
Sistem performansı güvenilirlik, doğruluk ve enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde, LoRa protokolünün düşük parazit oranı ve geniş kapsama alanı özelliklerinden yararlanarak %98 başarı oranıyla veri iletimi gerçekleştirdiği görülmüştür. Çeşitli çevresel koşullarda yapılan testlerde, veri toplama ve iletim süreçlerinin güvenilir bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Toplanan veriler, fiziksel ölçümlerle karşılaştırıldığında herhangi bir sapma göstermemiş ve optokuplörlerin başlangıç ve bitiş sinyallerini doğru algıladığı doğrulanmıştır. Termokupl verilerinin tutarlılık gösterdiği de ayrıca belirlenmiştir. LoRa modüllerinin düşük güç tüketimi sayesinde sistem enerji tüketimini minimum seviyede tutarak operasyonel maliyetleri düşürmüştür. Optokuplörlerin ve mikrodenetleyicinin enerji tüketimi de fabrika koşullarında düşük seviyelerde kalarak sistemin uzun süreli çalışmasını sağlamıştır.

Testler sırasında tespit edilen yazılım hataları düzeltilmiş, LoRa iletişim parametreleri sinyal kararlılığını artırmak ve parazitleri azaltmak için optimize edilmiş, yazılımda veri tabanı sorgu sürelerini azaltan geliştirmeler gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, test sonuçları sistemin yüksek güvenilirlik, doğruluk ve enerji verimliliği sağladığını ortaya koymuştur. LoRa tabanlı veri toplama sistemi, pres makinelerinin üretim süreçlerini optimize etmek ve izlemek için etkili bir çözüm olarak başarıyla uygulanmıştır.

Sistem, optokuplörlerden gelen başlangıç ve bitiş sinyallerini %98 oranında başarıyla algılamış ve kaydetmiştir. Bu oran 12046 adet başarılı pres döngüsü kaydına karşılık 246 adet kayıp veri olduğu anlamına gelmektedir. 12046 adet başarılı kaydın içerisinde ise toplam 24092 adet başarılı optokuplör okuması yer almaktadır. Buna karşın 48 adet başarısız optokuplör okuması ile optokuplörlerin başarılı okuma oranı %99,8 olarak ölçülmüştür. Pres makinelerinin başlangıç ve bitiş zamanları ± 1 ms hassasiyetle tespit edilmiş, bu da sistemin endüstriyel otomasyon için gerekli hassasiyet seviyelerini karşıladığını göstermektedir. Termokupllar tarafından ölçülen ve SQL 'e kaydedilen sıcaklık değerleri, pres üzerinde yer alan sıcaklık göstergesi ile karşılaştırılmış ve yapılan sıcaklık ölçümlerinin $\pm 0,5$ °C hassasiyetle gerçekleştirildiği ve bu verilerin analiz için güvenilir bir şekilde kaydedildiği gözlemlenmiştir.

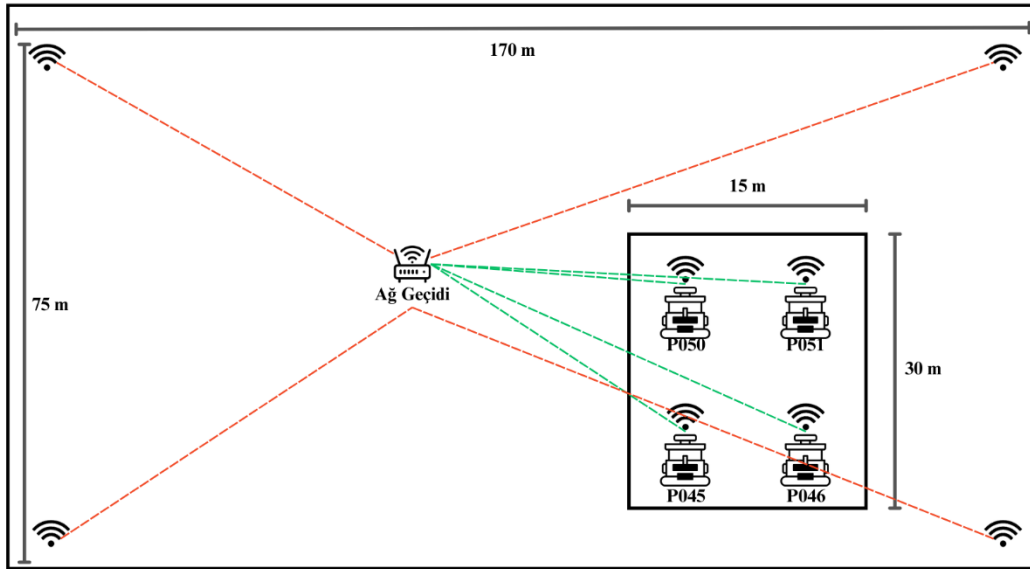
LoRa modüllerinin veri iletiminde %98 oranında başarı sağlaması, elektromanyetik girişimlerin yoğun olduğu fabrika ortamında dahi sinyal kalitesini koruduğunu göstermektedir. CSS modülasyon tekniği sayesinde parazit etkisi minimuma indirilmiş, düşük sinyal seviyelerinde (-120 dBm) bile başarılı veri iletimi gerçekleştirilmiştir. Verilerin ana ağ geçidine ortalama 1,2 saniye içinde iletilmesi, endüstriyel otomasyon için yeterli bir hız sağlamıştır.

LoRa modülleri, uyku modunda 1 μA 'nın altında enerji tüketimi ile çalışmıştır. Tüm sistemin enerji tüketimi ise günlük ortalama 60-90 Wh olarak hesaplanmıştır. Bu durum, uzun süreli çalışmalarda enerji maliyetlerini minimize etmektedir. Enerji tüketimine dair ölçüm, veri toplama donanımına 12V DC besleme verilerek gerçekleştirilmiştir. Donanım 12V DC besleme ile çalıştığında, veri gönderme durumunda Şekil 3.12 'de görüldüğü gibi 0,22 A akım çektiği gözlemlenmiştir. Bu da 2,4 Wh güç tüketimine denk gelmektedir. Bu da sistemin günlük enerji tüketiminin 60-90 Wh olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.12. Sistemin çektiği akımın ölçümü

Tez çalışması kapsamında 4 adet pres makinesine Şekil 3.13'te görüldüğü gibi kurulum gerçekleştirilmiş ve yaklaşık 500 m²'lik bir alanda çalışma yürütülmüştür. Ancak sistemin yaygınlaştırılması ve diğer pres makinelerine de kurulum öngörüldüğünden 12000 m²'lik fabrika kapalı alanının farklı uzaklıklardaki noktalarından ana ağ geçidine sinyal gönderimi gerçekleştirilmiş ve tüm alanı tek bir ağ geçidi ile kapsama altına alındığı gözlemlenmiştir. Fabrika içerisinde yer alan metal yapıların ve ekipmanların yoğun olduğu bölgelerde dahi kesintisiz iletişimin sağlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13. Ağ geçidi ve pres fabrika yerleşim şeması

Bu bulgular, geliştirilen sistemin hem veri toplama hem de iletim güvenilirliği açısından endüstriyel otomasyon uygulamalarında başarılı bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. LoRa teknolojisinin geniş kapsama alanı, düşük enerji tüketimi ve güvenilir veri iletimi özellikleri ile sistemin endüstriyel ortamda güvenilir ve sürdürülebilir bir çözüm olduğunu göstermiştir. Bu sistem, üretim süreçlerinin kesintisiz izlenmesini ve verimliliğin artırılmasını mümkün kılmıştır.

4.2. Verimlilik ve Optimizasyon

Geliştirilen LoRa tabanlı veri toplama ve analiz sistemi, pres makinelerinin üretim süreçlerinde ölçülebilir verimlilik artışı ve optimizasyon fırsatları sağlamıştır. Gerçek zamanlı veri toplama ve analiz yetenekleri, üretim süreçlerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımış ve bu sayede operasyonel performansın artırılmasına yönelik somut iyileştirmeler elde edilmiştir.

Sistem sayesinde pres makinelerinin çalışma döngüsü %9 oranında artmış ve günlük üretim miktarında %9'luk bir artış sağlanmıştır. Örneğin, daha önce bir vardiyada 55 pres döngüsü gerçekleştirilirken, bu sayı 60'a çıkarılmıştır. Bu durum, vardiya süresi değişmeden üretim kapasitesinin artırılmasını mümkün kılmıştır. Operatörlerin sistem tarafından izlenmesi ve doğru presleme şartları ile üretimin gerçekleştirilip-gerçekleştirilmediğinin kontrol edilmesi ile birlikte fire oranları azaltılmıştır.

Sistem, makine başına enerji tüketimine doğrudan etki etmese de verimlilik artışı sağlayarak maliyetlerin düşmesine katkıda bulunmuştur. Pres makinelerinin çalışma döngüsünde gerçekleştirilen %9 artış ile aynı vardiya süresinde daha çok baskı alınmasıyla birlikte iş gücü verimliliğinin %9 oranında artırılması sağlanmıştır. Bu optimizasyonlar, üretim süreçlerini daha sürdürülebilir ve ekonomik hale getirmiştir. Genel Ekipman Etkinliği (OEE), bir üretim sisteminin verimliliğini ölçmek için kullanılan ve kullanılabilirlik, performans ve kalite bileşenlerini içeren bir metriktir. Uygulama öncesi OEE değeri %75 seviyesinden uygulama sonrası %80 seviyesine çıkarılmıştır.

LoRa tabanlı sistem, makine duruşlarını ve arıza durumlarını anında izlenebilir hale getirmiştir. Özellikle belirli bir durma süresi (örneğin 15 dakika) aşıldığında amirlere otomatik olarak uyarı verilmesi, arıza tespit süresini 45 dakikadan 20 dakikaya düşürmüştür. Bu durum, hızlı müdahalelere olanak sağlayarak üretim kayıplarını azaltmıştır. Operatörlere yönelik performans skorlarının oluşturulması, daha verimli çalışma alışkanlıklarını teşvik etmiş ve kalite kontrol süreçlerini %25 hızlandırmıştır.

Sistem, sağladığı izlenebilirlik ile plansız duruşların ayda ortalama 10 saatten 8,2 saate düşürülerek %18 oranında azalmasını sağlayarak makine kullanım oranını %85'ten %90'a yükseltmiştir. Üretim çevrim sürelerinin %8 oranında kısalması, üretim hızında ve kapasitesinde kayda değer bir artış sağlamıştır. Bu iyileştirmeler, işletmenin hem maliyetlerini azaltmış hem de müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verebilmesini mümkün kılmıştır.

Bu sonuçlar, geliştirilen LoRa tabanlı sistemin endüstriyel üretimde önemli bir verimlilik artışı sağladığını ve operasyonel süreçleri optimize ettiğini göstermektedir. Sistemin yatırım maliyetleri, yaklaşık 1 ay içerisinde geri ödenmiş ve işletmeye sürekli bir ekonomik avantaj sağlamıştır. Sistem sayesinde, üretim hatalarından kaynaklanan kayıplar azaltılmış, enerji ve kaynakların etkin kullanımı sağlanmıştır.

Gelecekte, yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin entegrasyonu ile üretim süreçlerinin daha otomatik hale getirilmesi ve verimliliğin daha da artırılması hedeflenmektedir. Bu geliştirmeler, sistemin hem yerel hem de küresel rekabet gücünü artıracak ve endüstriyel otomasyonun daha ileri seviyelere taşınmasını sağlayacaktır. LoRa tabanlı bu sistem, yenilikçi ve ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

4.3. Avantajlar ve Zorluklar

Geliştirilen LoRa tabanlı veri toplama ve analiz sistemi, endüstriyel otomasyon uygulamalarında maliyet etkinliği, esneklik ve operasyonel verimlilik açısından birçok avantaj sunmuş, ancak belirli teknik ve operasyonel zorluklarla da karşılaşmıştır. Sistemin sağladığı avantajlar ve zorluklar, gözlemlenen performans verileri ve uygulama deneyimleri doğrultusunda detaylandırılmıştır.

4.3.1. Sistemin avantajları

Maliyet etkinliği: LoRa tabanlı sistem, kablolama ihtiyacını tamamen ortadan kaldırarak kurulum maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüştür. Her bir modülün düşük donanım maliyeti (yaklaşık 30\$) ve minimum bakım gereksinimi, işletme maliyetlerinde belirgin bir azalma sağlamıştır. Sistemin sunduğu %9 oranındaki üretim verimliliği artışı uzun vadede sürdürülebilir ekonomik avantajlar yaratmıştır. Ayrıca, sistemin yatırım maliyetinin 1 ay gibi kısa bir sürede geri ödenmesi, işletmeye finansal kazanç sağlamıştır.

Kurulum ve esneklik: Makine başına ortalama 2 saatlik kurulum süresi, sistemin hızlı bir şekilde devreye alınmasını sağlamıştır. LoRa'nın kablosuz yapısı, yeni makinelerin kolayca sisteme entegre edilmesine veya mevcut makinelerin yer değiştirilmesine olanak tanımıştır.

Bu özellikler, sistemin farklı endüstriyel ortam ve uygulamalara kolayca uyarlanmasını mümkün kılmıştır. Minimum altyapı gereksinimi, büyük ölçekteki fabrikalarda dahi sistemi ideal bir çözüm haline getirmiştir.

Operasyonel verimlilik: Gerçek zamanlı veri izleme, hızlı arıza tespiti ve otomatik raporlama özellikleri, üretim süreçlerini daha etkin bir şekilde yönetmeyi mümkün kılmıştır. Sistem sayesinde plansız duruşlar %18 oranında azalmış, arıza tespit süreleri 45 dakikadan 20 dakikaya düşürülmüştür. Ayrıca, operatörlere yönelik verimlilik skorları oluşturularak performans yönetimi kolaylaştırılmış ve kalite kontrol süreçleri %25 oranında hızlandırılmıştır. Kesintisiz veri toplama ve analiz yetenekleri, karar alma süreçlerini hızlandırarak işletmenin operasyonel gücünü artırmıştır.

4.3.2. Sistemin karşılaştığı zorluklar

Sinyal iletimi: Fabrika ortamındaki metal yapıların ve ekipmanların sinyal zayıflamasına neden olduğu bazı durumlar gözlemlenmiştir. Elektromanyetik girişimlerin yoğun olduğu bölgelerde sinyal kalitesinde dalgalanmalar yaşanmıştır. LoRa'nın 50 kbps ile sınırlı veri iletim hızı, yüksek veri hacmi gerektiren uygulamalarda kısıtlayıcı olmuştur. Bu zorluklar, özellikle karmaşık ve yoğun üretim hatlarında dikkat edilmesi gereken noktalar arasında yer almaktadır.

Operasyonel zorluklar: Sistemin ilk kurulumu sırasında optimum anten konumlandırması için detaylı planlama yapılması gerekmiştir. Ayrıca, personelin yeni sisteme adaptasyonu ve bakım personelinin eğitimi zaman almıştır. Bazı makinelerde sinyal erişimini artırmak için ek antenler kullanılmış ve bu, kurulum maliyetlerine küçük bir ek yük getirmiştir. Sistem, yüksek eğitim ve dokümantasyon gereksinimleriyle operasyonel geçiş sürecini uzatmıştır.

4.4. Değerlendirme ve Gelecek Perspektifleri

Sistem, karşılaşılan zorluklara rağmen endüstriyel otomasyon uygulamalarında güçlü bir performans sergilemiş ve avantajları dezavantajlarına kıyasla çok daha ağır basmıştır. Sinyal zayıflığı ve veri iletim hızına yönelik sorunların, optimize anten yerleşimi, ek ağ geçitleri ve hibrit sistem entegrasyonu gibi çözümlerle aşılabileceği görülmüştür. Personel eğitimi ve sistem dokümantasyonunun geliştirilmesi, adaptasyon sürecini hızlandırmak ve operasyonel zorlukları minimize etmek için önerilmektedir.

Gelecekte, sistemin yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi teknolojilerle entegre edilmesi planlanmaktadır. Bu sayede, üretim süreçlerinin daha dinamik bir şekilde optimize edilmesi

ve sistemin daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılması hedeflenmektedir. LoRa tabanlı bu sistem, endüstriyel otomasyon için uygun maliyetli, esnek ve sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstriyel üretim yapan bir fabrikanın pres makinelerinde LoRa haberleşme protokolü kullanılarak gerçek zamanlı veri toplama ve analiz sistemi başarıyla geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Sistem, üretim süreçlerini optimize etmek, verimliliği artırmak ve üretim süreçlerini izlenebilir hale getirmek amacıyla tasarlanmıştır. Donanım altyapısı, pres makinelerine entegre edilen özel tasarım veri toplama modülleri ve ESP8266 tabanlı ana ağ geçidi cihazından oluşmuştur. Yazılım altyapısı ise Visual Studio C# ile geliştirilen bir uygulama ve SQL tabanlı veri tabanı sistemini içermiştir. Bu yazılım, veri toplama, izleme ve raporlama süreçlerini yönetmiş, otomatik veri analiz ve raporlama mekanizmaları ile üretim süreçlerinde anlık ve geçmişe dönük analiz imkânı sunmuştur.

Sistem, endüstriyel ortamda karşılaşılan zorluklara rağmen güvenilir ve verimli bir şekilde çalışmıştır. LoRa teknolojisinin sunduğu düşük güç tüketimi ve geniş kapsama alanı özellikleri, fabrika ortamında etkili bir veri toplama ve analiz çözümü sunmuştur. Geleneksel kablolu sistemlere kıyasla düşük kurulum maliyeti ve esnek entegrasyon imkanlarıyla sistem, hem ekonomik hem de operasyonel açıdan önemli avantajlar sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında geliştirilen LoRa tabanlı veri toplama sisteminin genel değerlendirmesi, elde edilen sonuçlar ve uygulama sırasında yapılan gözlemler ışığında ele alınmıştır. Sistem, hem teknik hem de operasyonel açıdan başarılı bir performans sergilemiş, endüstriyel otomasyon uygulamaları için etkili bir çözüm sunduğunu kanıtlamıştır.

Geliştirilen sistem, %98 veri iletim başarı oranıyla endüstriyel ortamlarda güvenilir bir performans sergilemiştir. LoRa teknolojisinin sunduğu geniş kapsama alanı sayesinde 12000 m²'lik fabrika alanı tek bir ağ geçidi kullanılarak sağlanmıştır. Elektromanyetik girişimlere rağmen kararlı bir iletişim sağlanmış, veri kaybı en aza indirilmiştir. Bu teknik başarılar, sistemin endüstriyel otomasyon uygulamaları için güçlü bir altyapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Sistem, üretim verimliliğinde %9 oranında artış sağlarken, arıza tespit sürelerinin 45 dakikadan 20 dakikaya düşmesi, üretim kayıplarını azaltmış ve müdahale süreçlerini hızlandırmıştır. Gerçek zamanlı veri toplama ve analiz yetenekleri, operatör performansının izlenmesi ve süreç optimizasyonunda önemli katkılar sunmuştur.

Sistemin düşük maliyetli donanım ve minimum bakım gereksinimi, sistemin ekonomik avantajlarını artırmıştır. Ayrıca enerji tüketiminde doğrudan bir etkisi olmamakla birlikte,

verimlilik artışı maliyetlerin düşmesine ve işletmeye operasyonel kâr sağlamasına olanak tanımıştır.

Geliştirilen sistem, veri iletim hızının 50 Kbps ile sınırlı olması nedeniyle yüksek veri hızına ihtiyaç duyulan uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Fabrika ortamında metal yapıların bazı durumlarda sinyal kalitesini olumsuz etkilediği gözlemlenmiş ve bazı bölgelerde ek anten kullanımı gerekmiştir. Bu kısıtlamalar, LoRa'nın WiFi, ZigBee ve BLE gibi kısa mesafeli ağ protokolleri ile hibrit bir şekilde kullanımı ile kolayca aşılabilmektedir. Özellikle iletilen verilerin kayıpsız olması gerektiği uygulamalarda hibrit sistemler tercih edilebilir.

Genel olarak sistem hedeflenen amaçlara ulaşmada başarılı olmuştur. LoRa teknolojisinin endüstriyel ortamda kullanılabilirliği kanıtlanmış ve geleneksel sistemlere kıyasla maliyet etkinliği, esneklik ve güvenilirlik gibi önemli avantajlar sağladığı görülmüştür. Geliştirilen sistem, pres makinelerinin izlenmesi ve kontrolü için düşük maliyetli, enerji bakımından verimli ve esnek bir çözüm sunarak endüstriyel otomasyon uygulamalarında örnek teşkil etmiştir. Bu çalışma, benzer sistemlerin geliştirilmesi ve uygulanması için bir referans model oluşturmuş, gelecekteki çalışmalar için değerli bir temel sağlamıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen deneyimler ve gözlemlenen gelişim alanları, gelecekteki araştırma ve geliştirme çalışmaları için bir yol haritası sunmaktadır. Mevcut sistemin daha verimli, esnek ve kapsamlı hale getirilmesi amacıyla bazı öneriler geliştirilmiştir. Sistemin kestirimci bakım özellikleri kazandırılması için yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarının entegrasyonu önerilmektedir. Bu durum, arıza tespitinde proaktif yaklaşımları mümkün kılacak ve bakım süreçlerini optimize edecektir. Veri iletim hızını artırmak için LoRa parametrelerinin daha iyi optimize edilmesi ve çoklu ağ geçidi kullanımıyla kapsama alanının genişletilmesi, sistem güvenilirliğini artıracaktır. Ayrıca veri işleme özelliklerinin eklenmesiyle veriler yerel olarak işlenerek, bulut sistemlerine daha az yük binmesi sağlanabilir. Yeni nesil LoRa modüllerinin kullanımıyla sistem performansı artırılabilirken, farklı sensör tiplerinin modüler donanım tasarımlarına entegre edilmesi, sistemi daha esnek hale getirebilir. Anten tasarımlarının optimize edilmesi, sinyal kalitesini artırarak sistemin daha kararlı çalışmasını sağlayabilir. Bulut tabanlı bir veri analiz platformunun geliştirilmesi, sistemin daha geniş çaplı ve uzun vadeli analizler için kullanılmasını mümkün kılabilir. Ayrıca mobil uygulama desteği eklenerek, sistemin kullanıcı dostu olması sağlanabilir. Görsel analiz araçlarının genişletilmesi ve otomatik raporlama sisteminin geliştirilmesi, karar alma süreçlerini hızlandıracaktır. Sistemin farklı endüstriyel süreçlere uyarlanması, LoRa tabanlı otomasyon çözümlerinin potansiyelini genişletecektir.

Diğer üretim ekipmanları için özelleştirilmiş çözümler sunulması, sistemin kullanım alanını artırabilir. Ayrıca akıllı fabrika konseptine uygun entegrasyon çalışmaları ve Endüstri 4.0 uygulamalarıyla sistemin daha bütünleşik çalışması hedeflenebilir.

LoRa teknolojisinin endüstriyel ortamlarda sinyal yayılım karakteristikleri üzerine daha kapsamlı analizler yapılması, sistem performansını artırmak için temel teşkil edebilir. Hibrit sistem tasarımıyla farklı kablosuz protokollerin birleştirilmesi, daha esnek ve güvenilir çözümler sunabilir. Güvenlik ve şifreleme mekanizmalarının geliştirilmesi, sistemin veri güvenliği açısından daha güçlü hale gelmesini sağlayacaktır. Ayrıca enerji verimliliğini optimize etmek için yeni yöntemler araştırılmalıdır.

Gelecekteki çalışmalar, endüstriyel IoT sistemlerinin performans ve güvenilirliğini artırmaya odaklanmalı ve yeni teknolojilerin entegrasyonu ile sistemin yeteneklerini genişletmelidir. Bu şekilde endüstriyel otomasyon sistemleri daha akıllı, verimli ve esnek hale gelebilir.



KAYNAKLAR

- [1] L. D. Xu, E. L. Xu, and L. Li, "Industry 4.0: state of the art and future trends," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, pp. 2941-2962, Mar. 2018.
- [2] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, "Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0," *Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, acatech – National Academy of Science and Engineering*, Apr. 2013.
- [3] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, Second Quarter 2017.
- [4] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of LoRa: Long range and low power networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, pp. 1466, Sep. 2016.
- [5] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melià-Seguí, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, Sep. 2017.
- [6] G. Sungur, "Endüstriyel kullanıma uygun LabVIEW ve gömülü sistem tabanlı yeni bir IoT çözümü," Yüksek Lisans Tezi, Mekatronik Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, Ağustos 2018, 511779.
- [7] Y. Çetinceviz, "Endüstriyel otomasyonda internet tabanlı kablosuz veri iletişimi," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Eğitimi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, Aralık 2010, 303549.
- [8] Ç. Kaynak, "Akıllı fabrikalara yönelik gerçek zamanlı konumlama destekli IoT ağ geçidinin yazılım tasarımlarının yapılması," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye, Nisan 2023, 802847.
- [9] B. N. Musungate, "Edge computing-based predictive maintenance middleware for industrial IoT," Master's Thesis, Computer Engineering, Yaşar University, Bornova, İzmir, Türkiye, August 2023, 832378.
- [10] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, pp. 14-21, Mar. 2017.
- [11] A. I. Ali, "Enerji verimli akıllı binalar için ZigBee ve LoRa tabanlı haberleşme," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, Temmuz 2020, 638989.
- [12] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, "A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application," *Sensors*, vol. 18, no. 11, pp. 3995, Nov. 2018.
- [13] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, Oct. 2016.
- [14] A. N. de São José, N. Chopinet, E. P. Simon, A. Boé, T. Vantrois, C. Gransart, and V. Deniau, "A comparative analysis of LoRa and LoRaWAN in the presence of jammers and transient interference," in *Proc. of the 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2022)*, Gothenburg, Sweden, Sep. 5–8, 2022, pp. 586–591.
- [15] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, pp. 1-7, March 2019.
- [16] S. Yasintimur, "NB-IoT ve LoRa haberleşme teknolojilerinin karşılaştırmalı performans analizi," Yüksek Lisans Tezi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021, 691005.

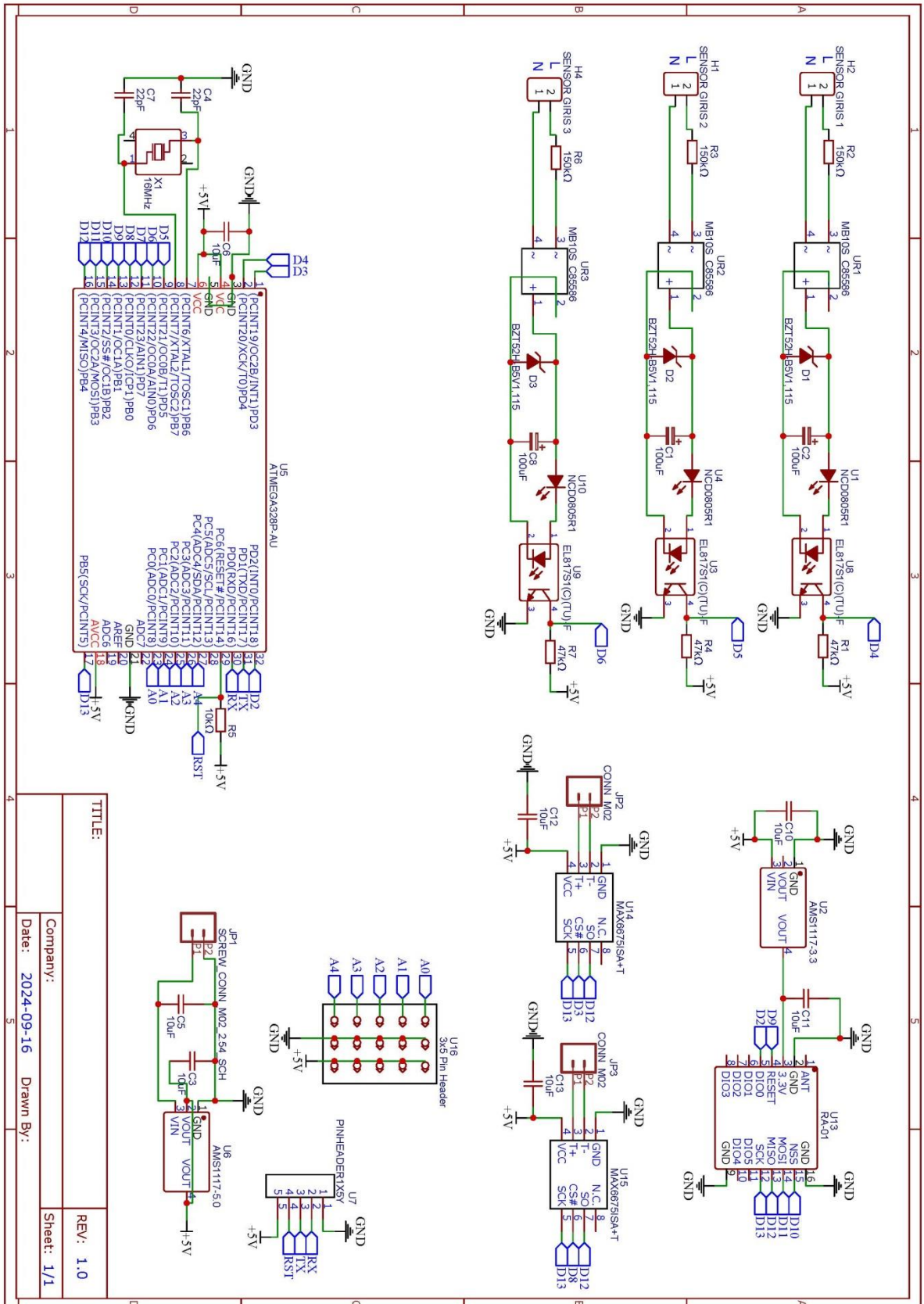
- [17] D. A. N. K. Suhermanto, W. Aribowo, H. A. Shehadeh, R. Rahmadian, M. Widyartono, A. L. Wardani, and A. C. Hermawan, "Monitoring DC motor based on LoRa and IoT," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 5, no. 1, pp. 54-61, 2024.
- [18] U. Noreen, A. Bounceur, and L. Clavier, "A study of LoRa: Low power and wide area network technology," in *Proc. of the 3rd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP'2017)*, Fez, Morocco, May 22–24, 2017, pp. 1–6.
- [19] M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, and E. Sisinni, "Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 12, pp. 3340–3349, Dec. 2017.
- [20] A. Ghosh, S. Misra, V. Udutalapally, and D. Das, "LoRaute: Routing messages in backhaul LoRa networks for underserved regions," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 22, pp. 19964–19971, Nov. 2023.
- [21] İ. H. Özdemir and L. Gökrem, "LoRaWAN teknolojisi kullanarak erken uyarı sistemi tasarımı ve uygulaması," *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD)*, vol. 11, no. 2, pp. 194–207, 2022.
- [22] J. P. Shanmuga Sundaram, W. Du, and Z. Zhao, "A survey on LoRa networking: Research problems, current solutions, and open issues," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 371–388, First Quarter 2020.
- [23] M. Cattani, C. A. Boano, and K. Römer, "An experimental evaluation of the reliability of LoRa long-range low-power wireless communication," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 6, no. 2, pp. 7–21, Jun. 2017.
- [24] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, and T. Hänninen, "Analysis of the capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology," in *European Wireless 2016*, pp. 119–124, Oulu, Finland, 2016.
- [25] Varsier, N., & Schwoerer, J. "Capacity Limits of LoRaWAN Technology for Smart Metering Applications". In *IEEE ICC 2017 SAC Symposium Internet of Things Track* (pp. 1-6). IEEE. 2017.
- [26] M. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso, "Do LoRa low-power wide-area networks scale?" in *Proc. of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM '16)*, Malta, Malta, Nov. 2016, pp. 1–10.
- [27] L. Gregora, L. Vojtech, and M. Neruda, "Indoor signal propagation of LoRa technology," in *Proceedings of the Department of Telecommunication Engineering*, Czech Technical University in Prague, 2016.
- [28] A. Lavric and V. Popa, "Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 724-740, 2017.
- [29] J. Haxhibeqiri, A. Karaagac, F. Van den Abeele, W. Joseph, I. Moerman, and J. Hoebeke, "LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study," in *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Paris, France, May 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCW.2017.7962757.
- [30] H. Zhang, L. He, F. Di Gioia, D. Choi, and A. Elia, "LoRaWAN-based internet of things (IoT) system for precision irrigation in plasticulture fresh-market tomato," *Smart Agricultural Technology*, vol. 2, 2022, Art. no. 100053.
- [31] H. D. Nguyen, N. Le Sommer, and Y. Maheo, "Over-the-air firmware update in LoRaWAN networks: A new module-based approach," in *21st International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC)*, Procedia Computer Science, vol. 241, pp. 154–161, Aug. 2024.
- [32] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239-242, Aug. 2014.

- [33] A. Pötsch and F. Hammer, "Towards end-to-end latency of LoRaWAN: Experimental analysis and IIoT applicability," in *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)*, Linz, Austria, 2019, pp. 206–213.
- [34] R. Langmann and L. Rojas-Peña, "PLCs as Industry 4.0 components in laboratory applications," *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 12, no. 7, pp. 37–44, May 2016.
- [35] EPCM Holdings, "Industrial IoT and SCADA integration," accessed Dec. 10, 2024. [Online]. Available: <https://epcmholdings.com/industrial-iot-and-scada-integration/> (Erişim Tarihi: 2 Aralık 2024).
- [36] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [37] O. B. A. Seller and N. Sornin, "Low Power Long Range Transmitter," U.S. Patent 9,252,834 B2, Feb. 2, 2016. Available: <https://patents.google.com/patent/US9252834B2/en>
- [38] LoRa Alliance Technical Committee, "LoRaWAN™ 1.1 Specification," LoRa Alliance, Final release, Version 1.1, Oct. 11, 2017. Available: https://loralliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/ (Erişim Tarihi: 3 Aralık 2024).
- [39] Semtech Corporation, "LoRa® and LoRaWAN®," Version 1.0, AN1200.86, Mar. 2024. Available: <https://semtech.com/resources/lora-and-lorawan>. (Erişim Tarihi: 3 Aralık 2024).
- [40] Semtech Corporation, "LoRa™ Modulation Basics," Application Note AN1200.22, Rev. 2, May 2015. Available: <https://www.semtech.com/resources/lora-modulation-basics>. (Erişim Tarihi: 3 Aralık 2024).
- [41] Sigfox, "Sigfox Device ETSI Mode White Paper," Version 5.0, Nov. 19, 2018. Available: <https://sigfox.com/resources/sigfox-device-etsi-mode-white-paper>.
- [42] A. Goldsmith, *Wireless Communications: Draft of Second Edition*, Chapters 1–16, Appendices A–C, Mar. 3, 2020. Available: <https://andrea.goldsmith.publications/wireless-communications>. (Erişim Tarihi: 4 Aralık 2024).
- [43] IEEE Computer Society, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Std 802.11ax™-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020), Approved February 2021. Available: https://standards.ieee.org/standard/802_11ax-2021.html. (Erişim Tarihi: 4 Aralık 2024).
- [44] E. Mozaffariahrar, F. Theoleyre, and M. Menth, "A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges," *Future Internet*, vol. 14, no. 10, p. 293, Oct. 2022. DOI: 10.3390/fi14100293. Available: <https://www.mdpi.com/1999-5903/14/10/293>. (Erişim Tarihi: 4 Aralık 2024).
- [45] ZigBee Alliance, "ZigBee Specification," ZigBee Document 05-3474-21, Aug. 5, 2015. Available: <https://zigbee.org/resources/zigbee-specification>. (Erişim Tarihi: 4 Aralık 2024).
- [46] B. Karasulu, L. Toker, and S. Korukoğlu, "ZigBee - IEEE 802.15.4 Standartı Temelli Kablosuz Algılayıcı Ağları," in *inet-tr'09 - XIV. Türkiye'de İnternet Konferansı Bildirileri*, Istanbul, Turkey, Dec. 12–13, 2009, pp. 41–48.
- [47] J. Yang, C. Poellabauer, P. Mitra, and C. Neubecker, "Beyond Beaconing: Emerging Applications and Challenges of BLE," *Ad Hoc Networks*, vol. 97, p. 102015, 2020. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870519308300>. (Erişim Tarihi: 4 Aralık 2024).

- [48] C. Gomez and J. Paradells, "Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 6, pp. 92-101, June 2010.
- [49] L. García, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "WiFi and LoRa energy consumption comparison in IoT ESP 32/SX1278 devices," in *SMART 2019: The Eighth International Conference on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies*, pp. 26-31, Nice, France, July 2019.
- [50] RAKwireless, "LoRaWAN vs Zigbee vs BLE vs WiFi vs NB-IoT," accessed Dec. 10, 2024. [Online]. Available: <https://news.rakwireless.com/lorawan-vs-zigbee-vs-ble-vs-wifi-vs-nb-iot/>. (Erişim Tarihi: 4 Aralık 2024).
- [51] MOKOSmart, "LoRaWAN beacons vs BLE beacons: Differences and applications," accessed Dec. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.mokosmart.com/lorawan-beacons-vs-ble-beacons/>. (Erişim Tarihi: 4 Aralık 2024).
- [52] "LTV-817S TA1 C SMD Transistor Çıkışlı Optokuplör Entegresi," Direnc.net. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.direnc.net/ltv-817s-ta1-c-smd-transistor-cikisli-optokuplor-entegresi> (Erişim Tarihi: 6 Aralık 2024).
- [53] "ATMEGA328P-AU SMD 8bit 20MHz Mikrodenetleyici TQFP32," Direnc.net. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.direnc.net/atmega328p-au-smd-8bit-20mhz-mikrodenetleyici-tqfp32> (Erişim Tarihi: 6 Aralık 2024).
- [54] "RA-01 Antenli LoRa Modülü," Direnc.net. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.direnc.net/ra-01-antenli-lora-modulu> (Erişim Tarihi: 6 Aralık 2024).

EKLER

Ek.1 - Devre Diyagramları



Ek.2 - Uygulama İzin Belgesi



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2015 yılında tam burslu olarak girdiği İstanbul Gedik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden 2019 yılında mezun oldu. 2022 yılından beri Yalova Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. 2023 yılında girdiği Kale Balata Otomotiv A.Ş. firmasında halen ARGE mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

M. E. Kaya ve A. Karafıl, "Fabrikalarda LoRa Haberleşme Protokolü ile Veri Toplama ve Analizi: Bir Uygulama Örneği," *12th International Congress on Engineering and Technology Management (ICETM)*, İstanbul, Türkiye, Kasım 2024, ss. 186-193.

