

**T.C.**  
**BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM**  
**DALI**



**LORAWAN TABANLI IOT HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE**  
**PERFORMANS ANALİZİ VE SENSÖR UYGULAMALARI**  
**GELİŞTİRME**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MEHMET FURKAN SARIĞÜNEY**

**TEZ DANIŞMANI**  
**Doç. Dr. Nihat DALDAL**

**BOLU, TEMMUZ - 2023**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**MEHMET FURKAN SARIĞÜNEY** tarafından hazırlanan  
“**LORAWAN TABANLI IOT HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE  
PERFORMANS ANALİZİ VE SENSÖR UYGULAMALARI  
GELİŞTİRME**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik Elektronik  
Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul  
edilmiştir 5/07/2023.

### Jüri Üyeleri

### İmza

Danışman  
Doç. Dr. Nihat DALDAL  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye  
Prof. Dr. Kemal POLAT  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Reşit KAVSAOĞLU  
Karabük Üniversitesi

.....

### Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

**Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü**

## ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım 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,

Aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 21/07/2023 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %24 olarak tespit edilmiştir.

.....

**MEHMET FURKAN SARIĞÜNEY**

## ÖZET

**LORAWAN TABANLI IOT HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE  
PERFORMANS ANALİZİ VE SENSÖR UYGULAMALARI GELİŞTİRME  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MEHMET FURKAN SARIĞÜNEY  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. NİHAT DALDAL)**

**BOLU, TEMMUZ - 2023  
XV + 92 sayfa**

Nesnelerin İnterneti (IoT), nesnelerin internete bağlanması ve birbirleriyle iletişim kurmasıyla oluşturulan bir ağdır. IoT sistemleri, çeşitli cihazların veri toplamasını, paylaşmasını ve analiz etmesini sağlar. LoRaWAN ise IoT iletişim sistemlerinde kullanılan bir kablosuz iletişim protokolüdür. LoRaWAN, düşük güç tüketimi ve geniş kapsama alanıyla düşük veri hızları ve uzun menzil gerektiren uygulamalar için idealdir. Bu sistemde, düşük güç tüketen ve uzun pil ömrüne sahip LoRaWAN düğümleri, LoRaWAN ağ geçitlerine veri gönderir. Ağ geçitleri, verileri toplar ve merkezi bir ağa ileterek yönlendirir. Veriler daha sonra LoRaWAN ağı sunucusunda işlenir ve uygulama sunucusuna iletilir. Bu sayede, IoT cihazları arasında uzun mesafeli ve enerji verimli iletişim sağlanır ve çeşitli sektörlerdeki uygulamalar için kullanılabilir hale gelir. Bu tez çalışmasında Nesnelerin İnterneti ekosisteminde yer alan uzak menzil ve düşük güç tüketimine sahip, LoRaWAN teknolojisinin detayları ve modülasyon incelenmesi sağlanmıştır. LoRaWAN protokolünün ağ mimarisi, enerji tüketim sınıflandırmaları, katılım prosedürleri, veri paketlerinin formları, güvenlik tanımları ve bölgesel sınıflandırmaları detaylı olarak açıklanmıştır. Çalışmaya konu olan protokol ile geliştirilmiş olan ağ geçitleri ve sensörlerden bir ağ kurarak, izlemesi sağlanmıştır. Çeşitli model ve serilerden, uç birimler kullanarak elde edilen bulgular değerlendirilerek LoRaWAN teknolojinin ve sunduğu imkanlar dahilinde ortaya çıkan ürünlerin performans analizleri yapılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Nesnelerin İnterneti, LoRaWAN, Ağ Geçidi, Sensör

## **ABSTRACT**

### **PERFORMANCE ANALYSIS AND DEVELOPMENT SENSOR APPLICATIONS OF LORAWAN BASED IOT COMMUNICATION SYSTEMS**

#### **MSC THESIS**

**MEHMET FURKAN SARIGUNEY**

**BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY**

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. DR., NIHAT DALDAL)**

**BOLU, JULY 2023**

**XV + 92 pages**

The Internet of Things (IoT) is a network formed by connecting objects to the internet and enabling them to communicate with each other. IoT systems allow various devices to collect, share, and analyse data. LoRaWAN, on the other hand, is a wireless communication protocol used in IoT communication systems. LoRaWAN is ideal for applications that require low data rates and long-range coverage, thanks to its low power consumption and wide coverage area. In this system, low-power and long battery life LoRaWAN nodes send data to LoRaWAN gateways. The gateways collect and forward the data to a centralized network for routing. The data is then processed in the LoRaWAN network server and sent to the application server. This enables long-range and energy-efficient communication between IoT devices, making it suitable for various industry applications. In this thesis, the details and modulation analysis of LoRaWAN technology, which has a long range and low power consumption in the Internet of Things ecosystem, are reviewed. The network architecture, energy consumption classifications, participation procedures, forms of data packets, security definitions and regional classifications of the LoRaWAN protocol are explained in detail. By establishing a network of gateways and sensors developed with the protocol that is the subject of the study, monitoring was provided. By evaluating the findings obtained from various models and series, performance analysis of LoRaWAN technology and the products that emerged within the possibilities it offers were made.

**KEYWORDS:** Internet of Things, LoRaWAN, Gateway, Sensor

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                              |      |
|--------------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY SAYFASI .....                                  | iii  |
| ETİK BEYAN.....                                              | iv   |
| ÖZET.....                                                    | v    |
| ABSTRACT .....                                               | vi   |
| İÇİNDEKİLER .....                                            | vii  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                           | ix   |
| TABLO LİSTESİ .....                                          | xi   |
| FOTOĞRAF LİSTESİ .....                                       | xii  |
| KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ .....                          | xiii |
| TEŞEKKÜR .....                                               | xv   |
| 1. GİRİŞ.....                                                | 1    |
| 2. LoRaWAN TEKNOLOJİSİNE GENEL BAKIŞ .....                   | 4    |
| 2.1 LoRa ve LoRaWAN ile İlgili Literatür Çalışmaları .....   | 4    |
| 2.2 Geniş Alan Ağı (LPWAN) Teknolojileri .....               | 5    |
| 2.3 RF Haberleşme Parametreleri ve LoRa Modülasyonu .....    | 8    |
| 2.3.1 RF Haberleşme Parametreleri ve Friis Denklemleri ..... | 8    |
| 2.3.2 LoRa Modülasyonu .....                                 | 13   |
| 2.3.3 LoRa Yayılma Faktörleri.....                           | 14   |
| 2.4 LoRaWAN Teknolojisi ve Cihaz Çeşitleri .....             | 20   |
| 2.4.1 LoRaWAN Ağ Mimarisi .....                              | 24   |
| 2.4.2 LoRaWAN Sınıfları.....                                 | 26   |
| 2.4.3 LoRaWAN Katılım Prosedürleri ve Paket Formları .....   | 29   |
| 2.4.4 LoRaWAN Bölgesel Sınırlamaları.....                    | 33   |
| 2.4.5 LoRaWAN Güvenlik Anahtarlaması.....                    | 37   |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                  | 43   |
| 3.1 Materyal .....                                           | 43   |
| 3.1.1 LPS8 Ağ Geçidi.....                                    | 44   |
| 3.1.2 LG308 Ağ Geçidi .....                                  | 45   |
| 3.1.3 RAK7268 Ağ Geçidi .....                                | 46   |
| 3.1.4 LT-22222-L I/O Denetleyici Sensör.....                 | 47   |
| 3.1.5 LHT65 Sıcaklık ve Nem Sensörü.....                     | 48   |
| 3.1.6 LWL02 Su Sızıntısı Tespit Sensörü .....                | 48   |
| 3.1.7 LDS02 Kapı Sensörü .....                               | 49   |
| 3.1.8 LDDS75 Mesafe Algılama Sensörü .....                   | 50   |
| 3.1.9 LSN50v2-D20 Dış Ortam Sıcaklık Sensörü.....            | 50   |
| 3.1.10 LSE01 Toprak Nemi ve EC Sensörü .....                 | 51   |
| 3.1.11 LGT92 GPS İzleyici Sensörü.....                       | 52   |
| 3.2 Yöntem .....                                             | 52   |

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1 Nesnelerin Ağ Sunucusu (TTN) .....       | 53        |
| 3.2.2 Test Ortamı .....                        | 54        |
| <b>4. BULGULAR .....</b>                       | <b>61</b> |
| 4.1 I/O Denetleyici Sensör Testi.....          | 61        |
| 4.2 Sıcaklık ve Nem Sensör Testi.....          | 63        |
| 4.3 Su Sızıntısı Tespit Sensör Testi .....     | 66        |
| 4.4 Kapı Sensör Testi.....                     | 68        |
| 4.5 Mesafe Algılama Sensör Testi.....          | 71        |
| 4.6 Dış Ortam Sıcaklık Sensör Testi.....       | 74        |
| 4.7 Toprak Nemi ve EC Ölçüm Sensör Testi ..... | 75        |
| 4.8 GPS İzleyici Takip Sensör Testi.....       | 76        |
| <b>5. TARTIŞMA .....</b>                       | <b>80</b> |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>              | <b>87</b> |
| <b>7. KAYNAKLAR.....</b>                       | <b>88</b> |
| <b>8. EKLER.....</b>                           | <b>91</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 RF teknolojilerinin gerekli veri hızına karşı menzil kapasitesi (LPWAN konumlandırma) [11].....                              | 6  |
| Şekil 2.2 Kablosuz haberleşmede alıcı verici .....                                                                                     | 9  |
| Şekil 2.3 Serbest uzay yayılım modeli.....                                                                                             | 11 |
| Şekil 2.4 Desteklenen tüm yayılma faktörleri için AWGN altında LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı $SF \in \{7, \dots, 12\}$ . .... | 17 |
| Şekil 2.5 $SF = 7$ için üç farklı CFO değeri altında LoRa FER değeri .....                                                             | 18 |
| Şekil 2.6 Farklı SF değerleri ve $CR = 0$ ile LoRa tabanlı PHY katmanının BER performansı.....                                         | 19 |
| Şekil 2.7 LoRaWAN ağ katmanları [18] .....                                                                                             | 21 |
| Şekil 2.8 LoRaWAN ağ şeması .....                                                                                                      | 22 |
| Şekil 2.9 LoRaWAN uç cihazı .....                                                                                                      | 23 |
| Şekil 2.10 İç mekan(A) ve dış mekan(B) ağ geçitleri.....                                                                               | 23 |
| Şekil 2.11 LoRaWAN yıldız topolojisi [19].....                                                                                         | 24 |
| Şekil 2.12 LoRaWAN ağ topolojisi [20] .....                                                                                            | 25 |
| Şekil 2.13 LoRaWAN ağ mimarisi [21] .....                                                                                              | 26 |
| Şekil 2.14 A Sınıfı alım penceresi (receive windows).....                                                                              | 27 |
| Şekil 2.15 A Sınıfı alma pencerelerinin davranışı .....                                                                                | 27 |
| Şekil 2.16 B sınıfı alma pencereleri .....                                                                                             | 28 |
| Şekil 2.17 C sınıfı alma pencereleri.....                                                                                              | 29 |
| Şekil 2.18 LoRaWAN Katmanları.....                                                                                                     | 29 |
| Şekil 2.19 LoRaWAN paket yapısı [22].....                                                                                              | 30 |
| Şekil 2.20 LoRaWAN veri mesajı .....                                                                                                   | 32 |
| Şekil 2.21 LoRaWAN 1.1'de OTAA mesaj akışı .....                                                                                       | 38 |
| Şekil 2.22 LoRaWAN 1.1'de ABP için DevAddr ve oturum anahtarlarını önceden paylaşma.....                                               | 42 |
| Şekil 3.1 TTN Ağ Yığını .....                                                                                                          | 54 |
| Şekil 3.2 LPS8 WiFi bağlantısı.....                                                                                                    | 55 |
| Şekil 3.3 LPS8 web kullanıcı arayüzü giriş sayfası.....                                                                                | 55 |
| Şekil 3.4 LPS8 server arayüzü .....                                                                                                    | 56 |
| Şekil 3.5 LG308 server arayüzü.....                                                                                                    | 57 |
| Şekil 3.6 RAK7268 web kullanıcı arayüzü giriş sayfası .....                                                                            | 58 |
| Şekil 3.7 RAK ağ geçidi kullanıcı arayüzü.....                                                                                         | 58 |
| Şekil 3.8 RAK gateway ağ trafiği .....                                                                                                 | 59 |
| Şekil 3.9 TTN ağ geçitleri.....                                                                                                        | 59 |
| Şekil 3.10 TTN sensör ve uç birimleri.....                                                                                             | 60 |
| Şekil 4.1 I/O denetleyici ağ şeması.....                                                                                               | 61 |
| Şekil 4.2 I/O denetleyicisi TTN arayüzü .....                                                                                          | 62 |
| Şekil 4.3 TTN kontrol panelleri .....                                                                                                  | 63 |
| Şekil 4.4 I/O denetleyicisi kontrol paneli (Cayenne) .....                                                                             | 63 |
| Şekil 4.5 Sıcaklık ve nem sensörü ağ diyagramı .....                                                                                   | 64 |
| Şekil 4.6 Sıcaklık ve nem sensörü TTN aktivasyonu .....                                                                                | 65 |
| Şekil 4.7 Sıcaklık nem sensörü TTN paneli.....                                                                                         | 65 |
| Şekil 4.8 Sıcaklık ve nem sensörü kontrol paneli (Datacake).....                                                                       | 66 |
| Şekil 4.9 Su sızıntı sensörü ağ şeması .....                                                                                           | 67 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.10 Su sızıntı alarm paneli .....                              | 68 |
| Şekil 4.11 Kapı sensörü ağ yapısı .....                               | 69 |
| Şekil 4.12 Kapı sensörü gösterge paneli .....                         | 69 |
| Şekil 4.13 Kapı sensörü RAK kullanıcı arayüzü .....                   | 70 |
| Şekil 4.14 LDS02 canlı veri akışı .....                               | 71 |
| Şekil 4.15 LDS02 kullanıcı paneli ve veri göstergeleri .....          | 71 |
| Şekil 4.16 LDDS75 server TTN kaydı .....                              | 72 |
| Şekil 4.17 Mesafe ölçümü gösterge paneli .....                        | 73 |
| Şekil 4.18 LSN50v2 serisi sıcaklık sensör ağı.....                    | 74 |
| Şekil 4.19 GPS ham verisinin kod çözücü paneli .....                  | 77 |
| Şekil 4.20 GPS takip sensörü kullanıcı arayüzü .....                  | 78 |
| Şekil 4.21 GPS sensörü konum gösterge paneli .....                    | 79 |
| Şekil 5.1 Semtech SX1302 çipi .....                                   | 83 |
| Şekil 5.2 SX1302 LoRa Çip Referans Blok Diyagramı .....               | 84 |
| Şekil 5.3 Semtech Corecell SX1302 LoRa Gateway Reference Design ..... | 84 |



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2.1</b> Düşük güçlü geniş alan ağlarının (LPWAN) uygulamaları [12] .....                              | 7  |
| <b>Tablo 2.2</b> Sabit SF, farklı bant genişliğine göre veri hızı.....                                         | 15 |
| <b>Tablo 2.3</b> Sabit band, farklı yayılma faktörlerinin alıcı hassasiyetleri.....                            | 15 |
| <b>Tablo 2.4</b> LoRa SF (Spreading Factor) Değerleri .....                                                    | 16 |
| <b>Tablo 2.5</b> LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı .....                                                  | 17 |
| <b>Tablo 2.6</b> LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı .....                                                  | 19 |
| <b>Tablo 2.7</b> LoRa PHY katmanının CR = 0 altında SF değerlerine bağlı olarak yaklaşık BER performansı ..... | 20 |
| <b>Tablo 2.8</b> PHY mesaj formatı.....                                                                        | 30 |
| <b>Tablo 2.9</b> MAC (PHYPayload) mesaj formatı.....                                                           | 31 |
| <b>Tablo 2.10</b> MAC başlık (MHDR) yapısı.....                                                                | 31 |
| <b>Tablo 2.11</b> MType tanımları.....                                                                         | 32 |
| <b>Tablo 2.12</b> LoRaWAN bölgesel sınırlaması .....                                                           | 33 |
| <b>Tablo 2.13</b> EU868-870 varsayılan kanallar.....                                                           | 34 |
| <b>Tablo 2.14</b> EU863-870 görev döngüsü .....                                                                | 34 |
| <b>Tablo 2.15</b> EU863-870 veri hızı .....                                                                    | 35 |
| <b>Tablo 2.16</b> EU863-870 maksimum EIRP / ERP .....                                                          | 36 |
| <b>Tablo 2.17</b> EU863-870 maksimum yük boyutu .....                                                          | 36 |
| <b>Tablo 3.1</b> Ağ geçitleri temel özellik karşılaştırması.....                                               | 43 |
| <b>Tablo 3.2</b> Ağ geçitleri olumlu ve olumsuz yönlerinin karşılaştırılması .....                             | 44 |
| <b>Tablo 3.3</b> LoRaWAN Sensörlerinin olumlu ve olumsuz yönlerinin karşılaştırması .....                      | 47 |
| <b>Tablo 4.1</b> LHT65 yukarı bağlantı (UL) yük tanımı.....                                                    | 66 |
| <b>Tablo 4.2</b> LDD575 yük tanımı .....                                                                       | 73 |
| <b>Tablo 4.3</b> LGT-92 GPS veri paketi .....                                                                  | 77 |
| <b>Tablo 5.1</b> SX1308, SX1301, SX1302 ve SX1303 çip karşılaştırması .....                                    | 81 |
| <b>Tablo 5.2</b> SX Serisi LoRa çiplerin olumlu olumsuz yönleri .....                                          | 82 |

## FOTOĞRAF LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Fotoğraf 3.1</b> LPS8 iç mekan ağ geçidi .....                              | 45 |
| <b>Fotoğraf 3.2</b> LG308 iç mekan ağ geçidi .....                             | 45 |
| <b>Fotoğraf 3.3</b> RAK7268 iç mekan ağ geçidi .....                           | 46 |
| <b>Fotoğraf 3.4</b> LT-22222-L I/O control sensörü .....                       | 47 |
| <b>Fotoğraf 3.5</b> LHT65 sıcaklık ve nem sensörü .....                        | 48 |
| <b>Fotoğraf 3.6</b> LWL02 su sızıntı tespit sensörü .....                      | 49 |
| <b>Fotoğraf 3.7</b> LDS02 kapı sensörü .....                                   | 49 |
| <b>Fotoğraf 3.8</b> LDDS75 mesafe algılama sensörü .....                       | 50 |
| <b>Fotoğraf 3.9</b> LSN50v2-D20 dış ortam sıcaklık sensörü .....               | 51 |
| <b>Fotoğraf 3.10</b> LSE01 toprak nemi ve EC sensörü .....                     | 52 |
| <b>Fotoğraf 3.11</b> LGT92 GPS takip sensörü açık (a) ve kapalı hali (b) ..... | 52 |
| <b>Fotoğraf 3.12</b> LPS8 Ağ Geçidi test düzeneği .....                        | 55 |
| <b>Fotoğraf 3.13</b> LG308 ağ geçidi test düzeneği .....                       | 56 |
| <b>Fotoğraf 3.14</b> RAK7268 ağ geçidi test düzeneği .....                     | 57 |
| <b>Fotoğraf 4.1</b> I/O denetleyici sensör .....                               | 61 |
| <b>Fotoğraf 4.2</b> OTAA anahtar çıkarması .....                               | 62 |
| <b>Fotoğraf 4.3</b> Sıcaklık ve nem sensörü .....                              | 64 |
| <b>Fotoğraf 4.4</b> Su sızıntı tespit sensörü .....                            | 67 |
| <b>Fotoğraf 4.5</b> Kapı sensörü .....                                         | 68 |
| <b>Fotoğraf 4.6</b> LD02 bağlantı uçları .....                                 | 69 |
| <b>Fotoğraf 4.7</b> RAK7268 ile kurulu kapı sensörü .....                      | 70 |
| <b>Fotoğraf 4.8</b> Mesafe algılama sensörü kutu içi .....                     | 72 |
| <b>Fotoğraf 4.9</b> LSN50v2 serisi test düzeneği .....                         | 75 |
| <b>Fotoğraf 4.10</b> Toprak nem ve iletkenlik (EC) sensörü .....               | 75 |
| <b>Fotoğraf 4.11</b> GPS takip sistem elemanları .....                         | 76 |
| <b>Fotoğraf 4.12</b> LGT-92 GPS takip sensörü .....                            | 76 |

## KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

|                |                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>2G</b>      | : İkinci Nesil Kablosuz Telefon Teknolojisi                 |
| <b>3G</b>      | : Üçüncü Nesil Kablosuz Telefon Teknolojisi                 |
| <b>4G</b>      | : Dördüncü Nesil Kablosuz Telefon Teknolojisi               |
| <b>5G</b>      | : Beşinci Nesil Kablosuz Telefon Teknolojisi                |
| <b>ABP</b>     | : Kişiselleştirme ile Aktivasyon                            |
| <b>ADR</b>     | : Adaptif Veri Oranı                                        |
| <b>AES</b>     | : Gelişmiş Şifreleme Standartı                              |
| <b>BW</b>      | : Bant Genişliği                                            |
| <b>CRC</b>     | : Döğüsel Artık Kontrolü                                    |
| <b>DL</b>      | : Aşağı Bağlantı (Downlink)                                 |
| <b>dBm</b>     | : Desibel Miliwatt                                          |
| <b>dBW</b>     | : Desibel Watt                                              |
| <b>EIRP</b>    | : Eşdeğer İzotropik Yayımlım Gücü                           |
| <b>ETSI</b>    | : Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü            |
| <b>FEC</b>     | : İleri Hata Düzeltme                                       |
| <b>GPS</b>     | : Global Positioning System                                 |
| <b>IoT</b>     | : Nesnelerin İnterneti                                      |
| <b>IEEE</b>    | : Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü                |
| <b>ISM</b>     | : Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi                            |
| <b>LoRa</b>    | : Uzun Menzil (Long Range)                                  |
| <b>LoRaWAN</b> | : Uzun Menzil Geniş Alan Ağı (Long Range Wide Area Network) |
| <b>LPWAN</b>   | : Düşük Güçlü Geniş Alan Ağı (Low Powe Wide Area Network)   |
| <b>LTE</b>     | : Uzun Vadeli Evrim (Long Term Evolution)                   |
| <b>M2M</b>     | : Makineden Makineye (Machine to Machine)                   |
| <b>MAC</b>     | : Media Access Control                                      |
| <b>MCU</b>     | : Mikro Denetleyici Birimi                                  |
| <b>MHDR</b>    | : MAC Header (Başlığı)                                      |
| <b>MIC</b>     | : Mesaj Bütünlük Kodu                                       |
| <b>MQTT</b>    | : Message Queuing Telemetry Transport                       |
| <b>OTAA</b>    | : Havadan Aktivasyon                                        |

|             |                                                 |
|-------------|-------------------------------------------------|
| <b>PHY</b>  | : Fiziksel Katman                               |
| <b>RF</b>   | : Radyo Frekansı                                |
| <b>RFU</b>  | : Gelecekteki Kullanım İçin Rezerve Edilen Alan |
| <b>RSSI</b> | : Alınan Sinyal Gücü Göstergesi                 |
| <b>SF</b>   | : Yayılma Faktörü                               |
| <b>SNR</b>  | : Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio)     |
| <b>TTN</b>  | : The Things Network                            |
| <b>TCP</b>  | : Transmission Control Protocol                 |
| <b>UDP</b>  | : Kullanıcı Datagram Protokolü                  |
| <b>UL</b>   | : Yukarı Bağlantı (Uplink)                      |



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresinde, tez konusunun belirlenmesinden son aşamaya kadar her konuda desteğini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nihat DALDAL'a ve AİBÜ akademi kadrosuna şükranlarımı sunarım.

Bu günlere gelmemde gerek maddi, gerekse manevi anlamda yanımda olan ailem, dostlarım ve iş hayatımdaki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.



# 1. GİRİŞ

Nesnelerin İnterneti (IoT), günümüzde büyük bir öneme sahip olan bir kavramdır. IoT, fiziksel nesnelerin internete bağlanmasını ve birbirleriyle iletişim kurmasını sağlar. Bu nesneler, sensörler, cihazlar, araçlar veya herhangi bir nesne olabilir ve gerçek zamanlı veri toplama ve analiz etme yeteneği sayesinde çeşitli uygulama alanlarında büyük faydalar sağlar. Nesnelerin birbirleriyle veya daha geniş kapsamlı sistemlerle bağlantılı olduğu Nesnelerin İnterneti (IoT) ekosisteminde sürekli senkronizasyon halinde olan cihazlar bir ağ oluşturarak, eşsiz adreslere sahip nesnelerin belirli protokoller çerçevesinde iletişim olanağı sunmaktadır. Bu protokoller çeşitli altyapı, üretici ya da lisans sağlayıcıları aracılığıyla yeni nesil kablosuz haberleşme teknolojileri geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Öte yandan, farklı iletişim gereksinimleri nedeniyle IoT cihazlarda giderek artan bir kısıtlama ortaya çıkarmıştır (bağlı cihazların pil ömrü, kapsama alanları ve dağıtım maliyetleri vb.), bu da performans bazlı saha verimliliğinin ihtiyaçları kapsamında yeni gereksinimleri doğurmuştur. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek adına kısa menzilde; Bluetooth, ZigBee, WiFi, Uzun Süreli Evrim (LTE) vb. etkili teknikler vardır. Bu yaklaşımlar, IoT cihazları arasında yüksek hızlı veri aktarımı ve güvenilir iletişim sağlayabilirler ancak bununla birlikte, yüksek bir dağıtım maliyetine sahiptirler ve cihazların düşük güçte çalışmasını gerektiren uzun menzilli iletişim için uygun olmayan yüksek enerji tüketimine ihtiyaç duyarlar. Sonuç olarak, Düşük Güçlü Geniş Alan (LPWA) ağları adı verilen bir dizi yeni kablosuz protokol ve düşük güçte uzun menzilli iletişimi uygulanır. Bu sayede düşük güç tüketimi, yüksek enerji verimliliği ve yüksek kapsama kapasitesi sağlanmış olur. Gelişime açık ve öne çıkaran özellikleri sayesinde LoRaWAN (Uzun Menzil Geniş Alan Ağı) teknolojisi LPWA ağları arasında büyümesini sürdürmektedir. LoRa (Long Range) ise düşük güç tüketimiyle uzun menzilli kablosuz iletişim sağlayan bir teknolojidir. LoRa, lisanssız radyo frekanslarından yararlanarak düşük veri hızları ve uzun pil ömrü sunar. Bu teknoloji, IoT projelerinde geniş kapsama alanı gerektiren, pil ömrü kritik olan veya altyapı maliyetleri düşük olan uygulamalarda tercih edilir.

LoRa teknolojisi, LoRaWAN protokolü üzerinde çalışan bir ağ yapısıyla kullanılır. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), LoRa teknolojisinin üstünde çalışan bir ağ protokolüdür ve düşük güç tüketimiyle geniş alanlara yayılabilen kablosuz sensör ağları kurmayı sağlar. LoRaWAN, uzun mesafelerde bile veri iletimi yapabilen, düşük maliyetli ve enerji verimli bir çözümdür. Bu protokol, düşük veri hızlarına ihtiyaç duyan uygulamalarda etkilidir ve endüstriyel, tarımsal, akıllı şehir ve akıllı ev gibi birçok alanda kullanılabilir. LoRaWAN sensör uygulamaları, birçok sektörde büyük faydalar sağlar. Örneğin, tarımda toprak nemini izleyerek su kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar veya tarım makinelerinin çalışma durumunu izleyerek bakım sürelerini optimize eder. Akıllı şehirlerde trafik akışını takip ederek trafik yönetimini geliştirir, çöp konteynerlerinin doluluk durumunu izleyerek etkili çöp yönetimi sağlar ve park yerlerinin kullanılabilirliğini izleyerek sürücülere park alanı yönlendirmesi yapar. Akıllı evlerde ise enerji kullanımını optimize ederek enerji tasarrufu sağlar, hırsızlık veya yangın algılama sistemleri gibi güvenlik uygulamaları gerçekleştirir.

LoRaWAN, geniş kapsama alanı, düşük güç tüketimi, uzun pil ömrü ve yüksek veri güvenliği gibi avantajlarıyla IoT projelerinde popüler bir seçenek haline gelmiştir. LoRaWAN ağları, düşük maliyetli sensörlerle büyük ölçekte dağıtılabilir ve veriler güvenli bir şekilde iletilir. Bu sayede, IoT projeleri daha geniş bir kapsama alanıyla daha fazla veri toplama ve analiz etme imkanı sunar, böylece işletmelerin verimliliği artırabilir ve daha akıllı kararlar almasını sağlar.

LoRaWAN sensörlerinin performans analizi, çeşitli metrikler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu metrikler arasında bağlantı gücü, sinyal kalitesi, veri iletimi başarısı, pil ömrü ve ağ kapasitesi gibi faktörler bulunur. Bağlantı gücü, sensörün ağa olan bağlantısının gücünü ifade eder ve sinyal gücüyle ilişkilidir. Sinyal kalitesi ise sinyal gürültü oranı, sinyal interferansı ve sinyal düşmesi gibi faktörlerin bir kombinasyonudur. Veri iletimi başarısı, sensörün verileri istemciye başarılı bir şekilde ileterek veri kaybını minimize etme yeteneğini ifade eder. Pil ömrü, sensörün düşük güç tüketimiyle uzun süreler boyunca enerji sağlayabilme kapasitesini belirler. Ağ kapasitesi ise aynı zamanda aynı bölgede bulunan ve aynı zamanda veri göndermek isteyen cihazların sayısını ifade eder ve ağın verimli bir şekilde bu cihazlara hizmet verebilme yeteneğini gösterir. Bu metriklerin analizi,

LoRaWAN ağıının performansını değerlendirmek ve gerekirse iyileştirmeler yapmak için önemli bir araç sağlar. LoRaWAN teknolojisi, kablosuz IoT uygulamaları için birçok avantaj sağlasa da, bazı zorluklar da beraberinde getirebilir. Kapasite sınırlamalarına sahip teknolojide, LoRaWAN ağları, düşük veri hızlarına sahip olup geniş kapsama alanı sağlama amacıyla optimize edilmiştir. Ancak bu düşük veri hızları, büyük veri transferleri gerektiren uygulamalar için yetersiz olabilir. Yoğun nesne sayısı ve veri trafiği olan ortamlarda ağ kapasitesi sınırlamaları ortaya çıkabilir, veri trafiği yoğunluğunda ve yoğun nesne trafiği olan ortamlarda sinyal çakışmaları ve ağ performansında düşüşler yaşanabilir. Veri gecikmesi incelendiğinde LoRaWAN ağlarında sensörler, düzenli aralıklarla verilerini ileterek enerji tasarrufu sağlar. Bu durum, gerçek zamanlı veri ihtiyacı olan uygulamalarda gecikmeler yaşanmasına neden olabilir. Veri iletimiyle ilgili gecikmeler, anlık müdahale gerektiren uygulamalarda sorun yaratabilir. Sinyal kalitesi baz alındığında LoRaWAN sinyalleri, fiziksel engeller, binalar veya diğer radyo frekansı kaynakları gibi etkenler nedeniyle etkilenebilir. Bu durum sinyal kalitesinin düşmesine ve iletişim kesintilerine yol açabilir. Ağ altyapısı ve maliyetleri göz önüne alındığında, LoRaWAN ağları için uygun altyapının kurulması ve bakımı gereklidir. İhtiyaç duyulan ağ cihazlarının ve baz istasyonlarının kurulumu, güç kaynaklarının sağlanması ve ağ yönetimi gibi faktörler, kurulum ve işletme maliyetlerini artırabilir. Güvenlik zorlukları çerçevesinde gözlemlendiğinde LoRaWAN ağlarında veri güvenliği önemli bir konudur. Ancak, düşük güç tüketimi ve düşük veri hızları gibi faktörler, güvenlik önlemlerini uygulamayı zorlaştırabilir. Veri şifreleme, kimlik doğrulama ve güvenlik protokolleri gibi önlemler alınmadığında ağ güvenliği risk altında olabilir.

Potansiyel sorun ve açıklara rağmen, LoRaWAN teknolojisi sürekli gelişmektedir ve bu zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli çözümler sunulmaktadır. Örneğin, daha fazla baz istasyonu kurulması, sinyal kalitesinin artırılması, ağ yönetimi ve güvenlik protokollerinin geliştirilmesi gibi adımlar, LoRaWAN ağlarının performansını iyileştirebilir ve sorunları minimize edebilir.

Bu tez çalışmasında elde edilen veriler doğrultusunda ağ ekosistemine çözüm oluşturacak şekilde gelişime akademik katkı amaçlanmıştır. LoRaWAN teknolojisi üzerinde detaylı incelemeler ve testler sağlanarak analiz ve bulguları sunulmuştur.

## 2. LORAWAN TEKNOLOJİSİNE GENEL BAKIŞ

Tez çalışmasında LPWAN, LoRa Modülasyonu ve LoRaWAN teknolojisinin detayları ve testler sonrası detaylı analizleriyle birlikte, The Things Network (TTN) vb. server arayüzlerinde gözlemlenen sonuç çıktılarına değinilmiştir.

### 2.1 LoRa ve LoRaWAN ile İlgili Literatür Çalışmaları

LoRa teknolojisinin temelleri Fransa’da iki arkadaşın uzun menzilli, düşük güç modüle tekniğini geliştirmeyi amaçlamasıyla 2009 yılında atılmıştır. Nicolas Sornin ve Olivier Seller, 2010 yılında üçüncü ortakları François Sforza’nın da dahil olmasıyla birlikte Cycleo şirketini kurdular. Başlangıçta firma gaz, su ve elektrik sayaçları için kablosuz iletişim eklentisi sunmayı amaçladı. Bu hedefle denizcilik endüstrisindeki sonar ve havacılıkta radar için yaygın olan kullanılan Chirp Spread Spectrum (CSS) modülasyon tekniği kullandılar. Bu sayede CSS teknolojisi veri transferi için kullanılmaya başlanmıştır.

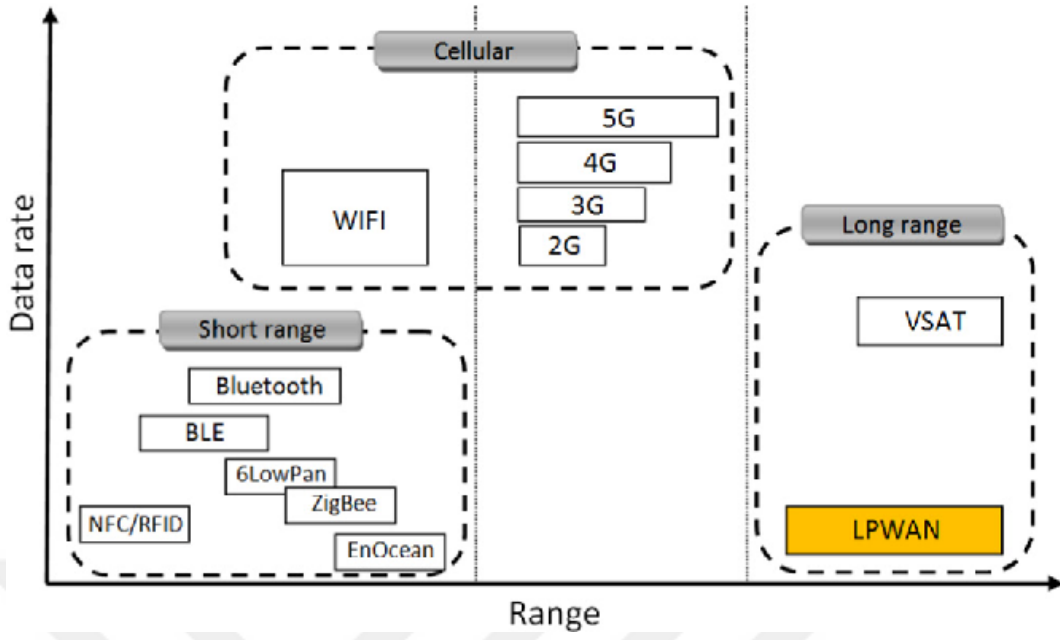
Uzun menzil ve güç tüketiminin beraberinde getirdiği teknolojiyle birlikte Semtech firması Mayıs 2012’de Cycleo firmasını bünyesine katmıştır. Semtech, teknolojiyi daha da geliştirmek adına end-note (uç cihazlarda) SX1272, SX1276 çiplerini ve yine gateway (ağ geçitleri) için SX1301 çip geliştirmelerini sürdürdü. Aynı zamanda, “LoRaMAC” adı verilen tescilli MAC protokolünün oluşturulması, diğer şeylerin yanı sıra, gerçek bir ağ protokolü için mesaj formatlarını ve güvenlik katmanlarını belirledi. Şubat 2015’te LoRa Alliance® kuruldu ve ağ protokolü “LoRaWAN” olarak yeniden adlandırıldı. [1]

İlgili konu kapsamında literatürde yapılan örnek çalışmalar incelendiğinde Gufran B., yaptığı çalışmada akıllı şehirler için LoraWAN ağlarında makine öğrenimi tabanlı dış mekan konumlandırma tekniklerinin performans analizini sağlamıştır. [2] Ahmet Furkan A., yaptığı çalışmada LoraWAN haberleşme protokolünün güvenlik analizini gerçekleştirmiştir. [3] İsmail Hakkı Ö., LoraWAN teknolojisi kullanarak erken uyarı sistemi tasarımını uygulamıştır. [4] Ali T., tarımsal sulamada düşük maliyetli bir LoraWAN test platformu uygulaması ve ölçümlerini sunmuştur. [5] Bushra Fuaad K., LoraWAN protokolü kullanarak akıllı evlerde verimli enerji yönetimi üzerine çalışma sağlamıştır. [6] Gökçer Y., LoraWAN IoT sistemlerde performans geliştirmesi üzerine çalışma

gerçekleştirmiştir. [7] Gürkan D., yayınladığı tezinde LoraWAN protokolünün incelenmesi ve bir IoT uygulaması geliştirmiştir. [8] Tuğrul Y., yaptığı çalışmada LoraWAN sistemlerde yayılım faktörlerini incelemiştir. [9] Muhammet Talha B., Lora ve LoraWAN teknolojilerinde performans analizi gerçekleştirmiştir. [10] Bu tezde yapılan çalışmada ise literatürden farklı olarak LoRaWAN ağının teknoloji yapısı detaylı olarak incelenerek, farklı çip serilerine ait birçok model kullanılarak geniş kapsamlı performans analizi yapılmıştır. Farklı kullanım alanına yönelik kablosuz ağ ekosistemine dahil edilen sensor birimleri ile IoT elemanları çeşitlendirilmiştir. Teknolojinin beraberinde getirdiği avantajları ve hayatımızın her alanına etkisini gösteren sonuçlar, geliştirilmekte olan bir teknolojiye dahil edilen teknik analizler ve IoT ekosisteminin geniş yayılımının belirtildiği saha testleri yapılarak literatüre katkı sağlanacaktır.

## **2.2 Geniş Alan Ağı (LPWAN) Teknolojileri**

Düşük Güçlü Geniş Alan Ağlarına erişim teknolojisi olan LPWA (Low Power Wide Area) Düşük veri iletim hızlarıyla m2m(makineden makineye) iletişimi sağlamak amacıyla düşük güç tüketimine sahip iletişim yöntemidir. LPWA teknolojileri yalnızca ağ gecikmesine tolerans gösteren, düşük güç tüketimi ve düşük maliyet gerektiren ve iletim hızına ihtiyaç duymayan bu kullanım durumları için uygundur. Düşük güç, IoT cihazlarının uzun bir süre (10 yıla kadar) özerk bir şekilde çalışmasını sağlamak için ucuz bir güç kaynağı (örneğin; AA pil) anlamına gelir. Geniş alan, iki IoT cihazı arasında uzun bir doğrudan iletişim mesafesini ifade eder, bu da kompleks mesh(örgü) ağ tekniği kullanmadan şehir veya kırsal alanın kapsamını sağlar. LPWA ağları ve diğer bağlantı teknolojileri arasındaki bant genişliği, güç tüketimi, menzil ve maliyet açısından karşılaştırıldığında avantajları net olarak görülmektedir. Şekil 2.1'de LPWAN merkezli karşılaştırma belirtilmiştir.



**Şekil 2.1** RF teknolojilerinin gerekli veri hızına karşı menzil kapasitesi (LPWAN konumlandırma) [11]

Kablosuz haberleşme teknolojileri hizmet kalitesi (QoS), kapsama alanı, menzil, gecikme süresi, pil ömrü, ölçeklenebilirlik, yük uzunluğu, dağıtım ve maliyet gibi IoT başarı faktörleri vb. çeşitli etmenlere göre kıyaslamaya alınmaktadır. Şekil 2.1’de RF kablosuz iletişimde gerekli veri hızına karşı, menzil kapasitesi kategorize edilmiştir. “Short Range” diye bahsedilen kısa mesafe teknolojileri dar bir menzil ve düşük veri aktarım hızları sunmaktadır. Tabloda “Cellular” olarak belirtilen hücresel aktarım teknolojisinde menzil değişkenlik göstermekle beraber geniş olanak ve teknoloji gelişimine bağlı olarak 2G’den 5G’ye kadar çeşitli veri aktarım hızları sağlamaktadır. LPWA kategorisi ürünleri ise uzun mesafelere, yüksek veri hızına ihtiyacı olmayacak yerlerde tercih alanı oluşturmaktadır.

Geniş sektör yayılımına sahip LPWA iletişim teknolojisinin sektör dağılımları ve kullanım alanları Tablo 2.1’de belirtilmiştir.

**Tablo 2.1** Düşük güçlü geniş alan ağlarının (LPWAN) uygulamaları [12]

|                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Akıllı Şehir Sistemleri<br>(Smart Cities Field)                                           | Akıllı park, binaların yapısal sağlığı, köprüler ve tarihi anıtlar, hava kalitesi ölçümü, ses gürültü seviyesi ölçümü, trafik sıkışıklığı ve trafik ışığı kontrolü, yol geçiş ücreti kontrolü, akıllı aydınlatma, çöp toplama optimizasyonu, atık yönetimi, yardımcı sayaçları, yangın algılama, asansör izleme ve kontrolü, rögar kapağı izleme, inşaat ekipmanları ve iş sağlığı izleme, çevre yönetimi ve kamu güvenliği |
| Akıllı Çevre Sistemleri<br>(Smart Environment)                                            | Su kalitesi, hava kirliliğinin azaltılması, iklim sıcaklığı artışının azaltılması, orman yangını, heyelan, hayvan takibi, kar seviyesi izleme ve deprem erken tespiti                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Akıllı Su Sistemleri<br>(Smart Water)                                                     | Su kalitesi, su kaçağı, nehir taşkınlarının izlenmesi, yüzme havuzu yönetimi ve kimyasal kaçak                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Akıllı Ölçüm Sistemleri<br>(Smart Metering)                                               | Akıllı elektrik sayaçları, gaz sayaçları, su akış sayaçları, gaz boru hattı izleme ve depo izleme                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Akıllı Şebeke ve Enerji Güvenliği<br>(Smart Grid and Energy Security)                     | Ağ kontrolü, yük dengeleme, uzaktan izleme ve ölçüm, trafo sağlığı izleme ve yel değirmenleri / güneş enerjisi kurulum izleme                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Güvenlik ve Acil Durumlar<br>(Security and Emergencies)                                   | Çevre erişim kontrolü, sıvı varlığı algılama, radyasyon seviyeleri, patlayıcı ve tehlikeli gazlar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Perakende<br>(Retail)                                                                     | Tedarik zinciri kontrolü, akıllı alışveriş uygulamaları, akıllı raflar ve akıllı ürün yönetimi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Otomotiv ve Lojistik<br>(Automotives and Logistics)                                       | Sigorta, güvenlik ve takip, kiralama, kiralama, araç paylaşımını paylaşma, sevkiyat kalitesi koşulları, ürün konumu, depolama uyumsuzluğu algılama, filo izleme, akıllı trenler ve hizmet olarak mobilite                                                                                                                                                                                                                   |
| Endüstriyel Otomasyon ve Akıllı Üretim<br>(Industrial Automation and Smart Manufacturing) | M2M uygulamaları, robotik, iç mekan hava kalitesi, sıcaklık izleme, üretim hattı izleme, ozon varlığı, iç mekan lokalizasyonu, araç otomatik tanılama, makine sağlığı izleme, önleyici bakım, enerjiyönetim, hizmet olarak makine / ekipman ve hizmet olarak fabrika                                                                                                                                                        |
| Akıllı Tarım ve Çiftçilik<br>(Smart Agriculture and Farming)                              | Sıcaklık, nem ve alkalinite ölçümü, şarap kalitesinin artırılması, akıllı seralar, tarımsal otomasyon ve robotik,                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

|                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                          | meteorolojik istasyon ağı, kompost, hidroponik, yavru bakımı, hayvancılık izleme ve takibi ve toksik gaz seviyeleri                                                                                                                                                                                              |
| Akıllı Evler / Binalar ve Emlak (Smart Homes/Buildings and Real Estate)                  | Enerji ve su kullanımı, sıcaklık, nem, yangın / duman algılama, cihazların uzaktan kontrolü, saldırı tespit sistemleri, sanat, malların korunması                                                                                                                                                                |
| E-Sağlık, Yaşam Bilimleri ve Giyilebilir Ürünler (eHealth, Life Sciences, and Wearables) | Hasta sağlığı ve parametreleri, bağlı tıbbi ortamlar, giyilebilir sağlık hizmetleri, hasta gözetimi, ultraviyole radyasyon izleme, teletıp, düşme algılama, destekli yaşam, tıbbi buzdolapları, sporcu bakımı, izleme, kronik hastalıklar ve sivrisinek ve benzeri böceklerin popülasyonunu ve büyümesini izleme |

### 2.3 RF Haberleşme Parametreleri ve LoRa Modülasyonu

LoRa temelinde RF kablosuz haberleşme sistemleri üzerine iletişim sağlamaktadır. RF dalgaları propagasyon olarak, yayılım şeklinde ilerlemektedir. İlgili kısımda haberleşme kalitesini tanımlayan Friis denklemlerini görebileceğimiz şekilde, RF haberleşme parametreleri ve LoRa modülasyon detayları yer almaktadır.

#### 2.3.1 RF Haberleşme Parametreleri ve Friis Denklemleri

Bilgi teorisinde, Shannon – Hartley teoremi, bilginin gürültü varlığında belirtilen bir bant genişliğinin bir iletişim kanalı üzerinden iletilebileceği maksimum oranı belirtir. Teorem kanal kapasitesini tanımlayarak, gürültü girişiminde belirli bir bant genişliği içerisinde iletilebilen maksimum veri oranını tanımlar.

$$C = B * \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Denklem 2.1

Denklem 2.1 için:

C: Kanal Kapasitesi (bit/s)

B: Kanal Bant Genişliği (Hz)

S: Ortalama Alınan Sinyal Gücü (Watts)

N: Band genişliği üzerindeki gürültünün ve parazitin ortalama gücü (Watts)

S/N: Doğrusal bir güç olarak ifade edilen Sinyal Gürültü Oranı (SNR) ya da taşıyıcı parazit oranı

Denklem 2.1 logaritmik dönüşüm sonrası düzenlenirse;

$$\frac{C}{B} = 1.433 * \frac{S}{N}$$

Denklem 2.2

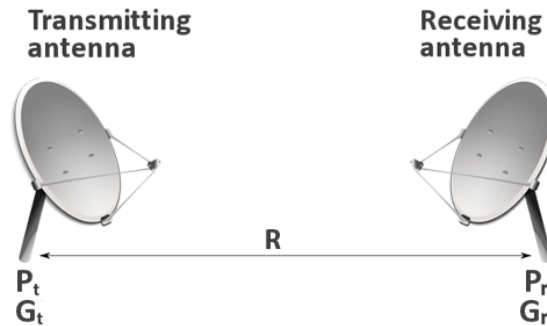
Yayılı spektrum (spread spectrum) uygulamaları için sinyal gürültü oranı, sinyal gücü genellikle gürültü seviyesinin altında olduğu için küçüktür.  $S/N \ll 1$  olacak şekilde bir gürültü seviyesi varsayarak, Denklem 2.2 şu şekilde yeniden yazılabilir.

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \text{ ya da } \frac{N}{S} \approx \frac{B}{C}$$

Denklem 2.3

Denklem 2.4'ten, sabit bir gürültü-sinyal oranındaki bir kanalda hatasız (error free) bilgiyi iletmek için, sadece iletilen sinyal bant genişliğinin artırılması gerektiği görülebilir. Buradan sinyalin bant genişliğini artırarak, SNR oranında sinyal gürültü oranının bozulması telafi edilebileceği gözlemlenmektedir. [13]

Kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılmakta olan Friis iletim formülü telekomünikasyonda alıcı anten çıkışındaki gücün, verici anten girişindeki güce oranını veren denklemdir. Farklı bir deyişle haberleşme kalitesini tanımlamaktadır. Formül ilk olarak 1946 yılında Danimarka-Amerikan radyo mühendisi Harald T. Friis tarafından sunulmuştur. Standart ve dB olmak üzere iki farklı formülize yöntemine sahiptir. RF kablosuz haberleşmedeki frekans ve mesafe değişim etkisi denklemlerde gözlemlenmektedir. Formül türetilmesi aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 2.2 Kablosuz haberleşmede alıcı verici

$P_T$  toplam gücün verici antene iletildiğini, verici antenin çok yönlü, kayıpsız olduğunu ve alıcı antenin verici antenin uzak alanında olduğu varsayılmıştır. Sonrasında alıcı antene gelen düzlemsel dalganın güç yoğunluğu  $p$ , verici antenden  $R$  mesafesi Denklem 2.4'teki gibi verilmiştir.

Verici iletim anteninin kazancı  $G_T$  varsayılarak güç yoğunluğu Denklem 2.5'te gözlemlenmektedir. Maksimum ışımanın olduğu yöndeki güç yoğunluğunu ifade etmektedir.

Kazanç, gerçek bir antenin yönlülüğünü ve kayıplarını etkilemektedir. Alıcı antenin  $A_E$  (aperture) aralığına sahip olduğu efektif değeri baz alınarak güç dizini, Denklem 2.6'daki gibidir.

$$p = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

Denklem 2.4

$$p = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t$$

Denklem 2.5

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t A_e$$

Denklem 2.6

Herhangi bir anten için etkili açıklık Denklem 2.7'deki gibidir.

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

Denklem 2.7

Açıklık değeri güç denkelemine uygulandığında Denklem 2.8'de belirtilen Friis İletim formülü oluşmaktadır. Boş alan yol kaybını, anten kazançlarını ve dalga boyunu alınan ve ileten güçlerle ilişkilendirir. Bu, anten teorisindeki temel denklemlerden biridir.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

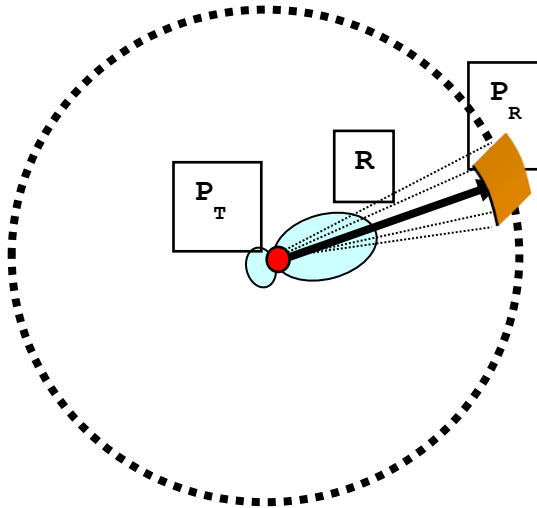
Denklem 2.8

Yine iletim formülü dalga boyu, frekans ve ışık hızı ile ilişkili olduğundan ötürü frekans açısından Friis formülü Denklem 2.9'da görülmektedir.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r c^2}{(4\pi R f)^2}$$

Denklem 2.9

Denklem 2.9'da görüleceği üzere, daha yüksek frekanslarda daha fazla gücün kaybolduğunu gözlemlenmektedir. Bu, Friis İletim Denkleminin temel bir sonucudur. Bu, belirli kazanımlara sahip antenler için enerji transferinin düşük frekanslarda en yüksek olacağı anlamına gelir. Alınan güç ile iletilen güç arasındaki fark yol kaybı olarak bilinir. Farklı bir şekilde ifade edilen Friis İletim Denklemi, daha yüksek frekanslar için yol kaybının daha yüksek olduğunu belirtmektedir. [14]



Şekil 2.3 Serbest uzay yayılım modeli

Uzay yayılım modeli Şekil 2.3'te görülen yayılım uyarınca Denklem 2.10'da belirtilen Friis denklemi düzenlendiğinde, logaritmik Friis denkleminin ifadesi Denklem 2.11 görülmektedir.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} = P_t G_t G_r \frac{\lambda^2}{4\pi R} \quad W$$

Denklem 2.10

$$10\log_{10} P_r = 10\log_{10} G_r + 10\log_{10} G_t + 10\log_{10} P_t + 20\log_{10} \frac{\lambda}{4\pi R}$$

veya

$$10\log_{10} P_r = 10\log_{10} G_r + 10\log_{10} G_t + 10\log_{10} P_t - 20\log_{10} \frac{4\pi R}{\lambda}$$

Denklem 2.11

Logaritmik Friis denklemine  $10\log_{10} \frac{G_r}{1} = G_r \text{ dBi}$  formülünü uygulanarak Denklem 2.12'de görüleceği üzere dBW (decibel watt) cinsinden ifade edilebilmektedir. Çeşitli kaynaklarda belirtilen formül desibel izotropik olarak da bahsedilmektedir. Denklemde yer alan – (negatif) ifadeli tanım mesafe artışıdaki kaybı ifade ettiğinden ötürü serbest uzay yol kaybı olarak belirtilmektedir. RF sistemlerdeki farklı bir ifadeyle denklem, dBm (decibel miliwatt) olarak da sıklıkla kullanılmaktadır.

$$P_r \text{ dBW} = P_t \text{ dBW} + G_r \text{ dBi} + G_t \text{ dBi} - 20\log_{10} \frac{4\pi R}{\lambda}$$

veya

$$P_r \text{ dBm} = P_t \text{ dBm} + G_r \text{ dBi} + G_t \text{ dBi} - 20\log_{10} \frac{4\pi R}{\lambda}$$

Denklem 2.12

Friis denkleminde alıcı anten tarafındaki gücün, verici anten tarafındaki güce oranlanmasıyla, yine RF sistemlerdeki haberleşme kalitesini tanımlayacak Denklem 2.13'te belirtilen formüle erişilmektedir. Frekans  $f$  değeri varsayılarak, serbest uzaydaki hava ortamı baz alınmıştır.

$$\left(\frac{P_r}{P_t}\right)_{dB} = (G_t)_{dB} + (G_r)_{dB} - (32.5 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f)$$

Denklem 2.13

Friis denkleminde görüleceği üzere kablosuz haberleşmede verici ve alıcı anten kazançları olumlu etki oluştururken, haberleşme frekansının artırılması ve mesafe artışı olumsuz etki olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 2.3.2 LoRa Modülasyonu

LoRa, Semtech firması tarafından geliştirilen ve tescillenen, Chirp Spread Spectrum (CSS) yayılı spektrum modülasyonu kullanarak uzun menzillere haberleşme imkânı sunan iletişim teknolojisidir. CSS, Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum'un (DSS) alt kategorisinde Doppler etkisine dirençli, alıcı hassasiyetini arttıran ve çok yollu sönmülemeye karşı modüle sağlamaktadır. Geniş bir alan ağı kapasitesi sağlamak için GHz'in altında (Sub-1Ghz) lisanssız bir bantta çalışan fiziksel katman teknolojisine sahip LoRa Alliance tarafından sunulan bu sistem, enerji tüketiminin çok önemli olduğu uzun ömürlü pille çalışan cihazlarda kullanılabilir olmayı amaçlamaktadır. LoRa'nın temel özellikleri arasında uzun menzil, düşük kırımım ve güç tüketimi, ileri hata düzeltme (FEC) ve Doppler direnci yer almaktadır. Fiziksel katman parametrelerinde özelleştirilebilir; bant genişliği (BW), kod oranı (CR), iletim gücü (TP) ve yayılma faktörü (SF) bulunmaktadır.

CSS modülasyonu öncesinde askeri ve güvenlik tabanlı radar vb. uygulamalarda kullanılırken, mevcut teknoloji geliştirmeleriyle birlikte düşük iletim gücüne ihtiyaç duyulan sistemlerde; Doppler, bant içi sıkışma ve çok yollu sönmülemelere karşı maksimum dayanıklılık sunduğu için günden güne talebin arttığı modülasyon tekniğidir. IoT ağı ihtiyaçlarında, düşük spektral verim maliyeti karşılığında iletişim aralığını arttırarak avantajlı çözümleri mümkün kılmaktadır.

LoRa radyo frekans bandları GHz altında ve düşük veri oranları sayesinde uzun menzilli haberleşme sağlanmaktadır. Hücresel (Cellular) teknolojiler 2G'den 5G'ye tek bir ağ geçidi ya da baz istasyonu ile şehirleri veya kilometrelerce çevreyi kapsarken, LoRa ve LoRaWAN'a kıyasla daha yüksek bağlantı maliyetine sahiptir. Desibel (dB) değeri bağlantı maliyeti ve güç tüketimiyle orantılıdır, ulaşılacak menzilin belirlenmesinde de ana etkidir. LoRa modülasyonunda uç birimler ve ağ geçitleri arasındaki iletişim farklı frekans kanallarında ve veri oranlarında yayılmaktadır. Bu veri oranını belirleyen temel parametre yayılım faktörüdür. Yayılım faktörünün seçimi, veri aktarım süresi ve menzili arasında denge sağlamaktadır ve farklı veri oranları ile sinyallerin girişiminden kaçınılmış olunur. Farklı yayılım faktörleri için yayılma kodları doğrusal olduğundan farklı SF'ler (SF7...SF12) kullanılarak aynı frekans kanalında eşzamanlı haberleşme mümkündür. LoRa, Avrupa'da 868 MHz, Kuzey Amerika'da 915 MHz ve Asya'da 433 MHz olan lisanssız ISM bantlarını kullanmaktadır. Bununla birlikte LoRa'da veri oranı 0,3kbps- 50 kbps arasındadır. Maksimum taşıyıcı yük uzunluğu ise ~243 bayttır. LoRa'yı diğer modülasyon yöntemlerinden farklı kılan, alıcının sinyali demodüle edebilmesi için parazitlere karşı dayanıklılığının olması ve çok düşük, minimum bir SNR (Signal-to-Noise Ratio) sağlayan benzersiz yayılma spektrum tekniğidir.

### **2.3.3 LoRa Yayılma Faktörleri**

LoRa, bilgileri kodlamak için belirli bir süre boyunca frekansı artan veya azalan geniş bantlı doğrusal frekans modülasyonlu darbeleri kullanan ve ileri hata düzeltme (FEC) tekniğiyle bütünleştirilen veri taşıyıcısı Chirp Spread Spectrum (CSS) teknolojisine dayanmaktadır. Yüksek band genişliği RF sinyallerini kanal içi ve dışı parazitlere karşı dayanıklı kılarken, yine geniş bantlı chirplerin kullanılması çok yollu sönmülemeye (fading) karşı direnç sağlamaktadır. Yayılım faktörü, tarama oranının kontrolü aracılığıyla veri iletim hızını ayarlamaktadır. Düşük yayılım faktörleri, daha hızlı tarama ve dolayısıyla daha yüksek veri iletimine olanak sağlamaktadır. Yayılma faktöründeki her artış, tarama ve veri aktarım hızını aynı oranda düşürmektedir. Daha düşük yayılma faktörleri, işleme kazancını azalttığı ve bit hızını artırdığı için LoRa aktarımlarının aralığını azaltır. Ağ ayrıca tıkanıklığı kontrol etmek için yayılma faktörlerini kullanır. Yayılma faktörleri ortogonaldır, bu sebeple farklı yayılma faktörleri ile modüle edilen ve aynı frekans kanalında aktif, aynı anda iletilen sinyaller birbiriyle karışmaz.

LoRa modülasyonu, SF7'den SF12'ye kadar toplam 6 yayılma faktörüne sahiptir. Yayılma faktörleri veri hızını, pil ömrünü, yayın süresini ve alıcı hassasiyetini etkiler.

Daha yüksek bir yayılma faktörü ile karşılaştırıldığında, daha düşük bir yayılma faktörü, sabit bir bant genişliği ve kodlama hızı için daha yüksek bir veri hızı sağlar. Bant genişliğinin iki katına çıkarılması, sabit bir yayılma faktörü ve kodlama hızı için bit hızını da iki katına çıkarır.

Tablo 2.2'de, yayılım faktörlerinden SF7 sabit baz alınarak band genişliklerinin değişimlerinin, veri hızındaki sonuçlara yansımaları gösterilmektedir.

**Tablo 2.2** Sabit SF, farklı bant genişliğine göre veri hızı

| Yayılma Faktörü | Bant Genişliği | Veri Hızı (kbit/s) |
|-----------------|----------------|--------------------|
| SF7             | 125            | 5,5                |
| SF7             | 250            | 10,9               |
| SF7             | 500            | 21,9               |

Sabit band genişliğine sahip bir veri gönderimi esnasında yüksek daha düşük bir yayılma faktörü ile karşılaştırıldığında, daha yüksek yayılma faktörü ile sinyal iletimi daha uzun yayın süresi gerektirmektedir. Daha yüksek yayılma faktörleri, daha yüksek alıcı hassasiyeti sağlar. LoRa kullanımında, sinyal zayıf olduğunda daha yüksek yayılma faktörleri kullanılır. [15]

**Tablo 2.3** Sabit band, farklı yayılma faktörlerinin alıcı hassasiyetleri

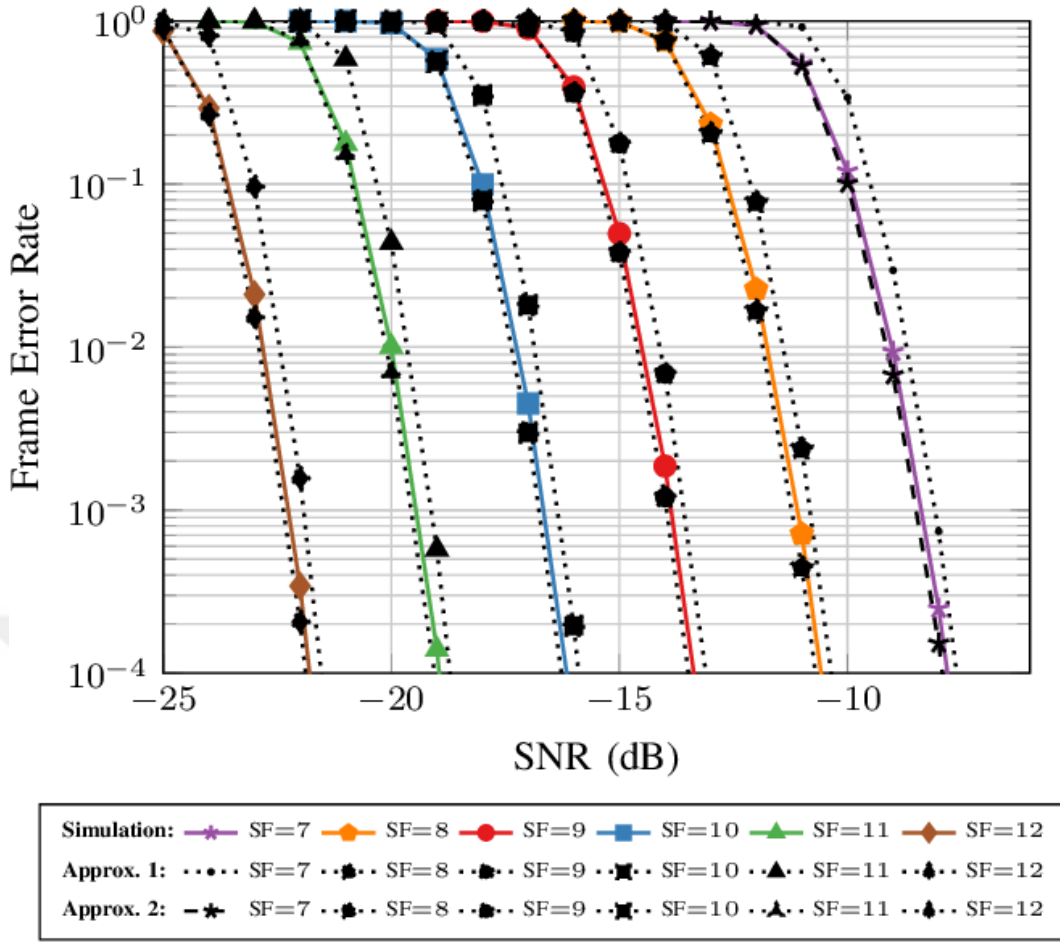
| Yayılma Faktörü | Bant Genişliği (kHz) | Veri Hızı (kbit/s) |
|-----------------|----------------------|--------------------|
| SF7             | 125                  | -123 dBm           |
| SF8             | 125                  | -126 dBm           |
| SF9             | 125                  | -129 dBm           |
| SF10            | 125                  | -132 dBm           |
| SF11            | 125                  | -134.5 dBm         |
| SF12            | 125                  | -137 dBm           |

Datarate, iletilen verinin hızını (bits per second - bps) gösterirken, Bandwidth, kullanılan frekans bandının genişliğini (kilohertz - kHz) ifade eder. Hassasiyet ise, sinyalin alınabilme limitini (decibel milliwatt - dBm) belirtir. LoRa SF değerleri incelendiğinde; daha yüksek SF değerleri daha uzun menzil sağlar ancak daha düşük datarate ve daha yüksek iletim süresiyle birlikte daha az kapasite sunar.

**Tablo 2.4** LoRa SF (Spreading Factor) Değerleri

| SF Değeri | Datarate (bps) | Bandwidth (kHz) | Hassasiyet (dBm) |
|-----------|----------------|-----------------|------------------|
| SF7       | 5,468          | 125             | -126             |
| SF8       | 3,906          | 125             | -127             |
| SF9       | 2,734          | 125             | -129             |
| SF10      | 1,953          | 125             | -132             |
| SF11      | 1,367          | 125             | -134             |
| SF12      | 976            | 125             | -137             |

LoRa katmanındaki desteklenen tüm yayılım faktörlerinin ( $SF \in \{7, \dots, 12\}$ ) verilerini AWGN (additive white Gaussian noise) altında, FER (frame error rate) hata oranı değerlerini grafik olarak incelediğimizde Şekil 2.4'te gözlemlenen sinyal gürültü oranlaması elde edilmektedir. [16]



**Şekil 2.4** Desteklenen tüm yayılma faktörleri için AWGN altında LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı  $SF \in \{7, \dots, 12\}$ .

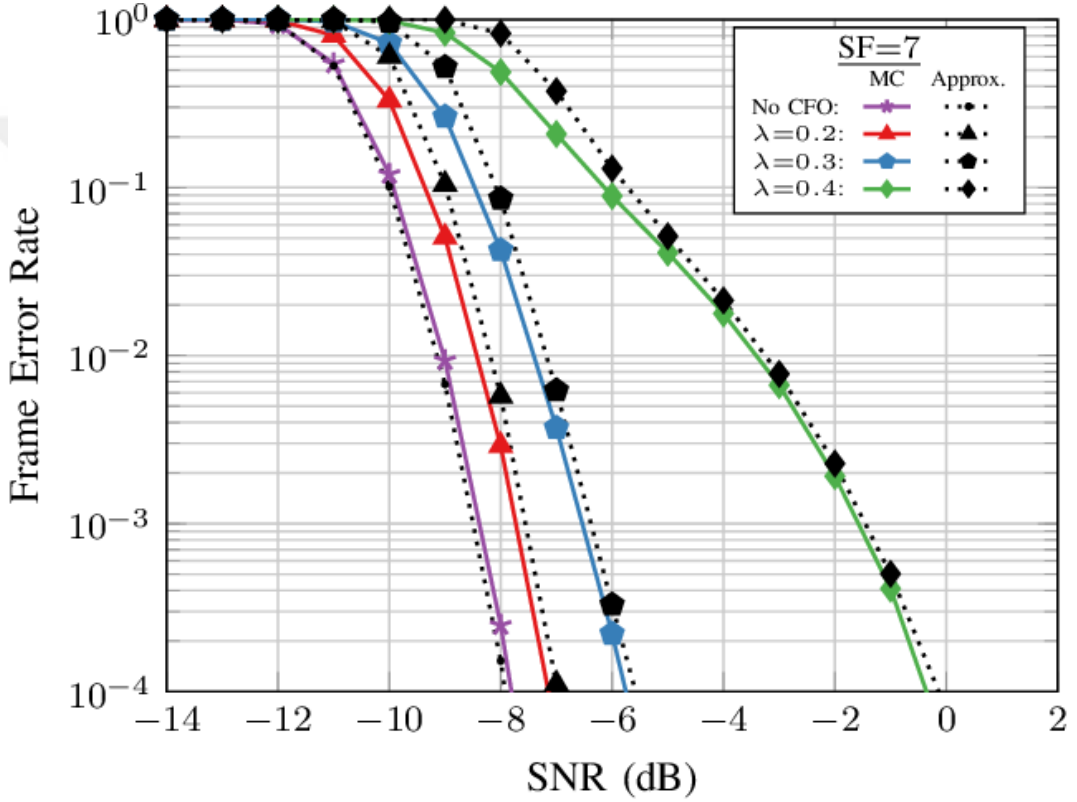
LoRa modülasyonundaki FER çerçeve hata oranını CFO (carrier frequency offset) altında taşıyıcı frekans kayması altında incelemek istediğimizde sabit bir yayılım faktörü baz alınarak (örneğin SF7 faktörü) analizi gerçekleştirilmiştir. SF = 7 için üç farklı CFO değeri altında LoRa FER grafiği Şekil 2.5'te belirtilmiştir. Tablo halinde LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı Tablo 2.5'te belirtilmiştir.

**Tablo 2.5** LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı

| SF Değeri | FER (AWGN Altında) |
|-----------|--------------------|
| SF7       | 0.05               |
| SF8       | 0.02               |
| SF9       | 0.01               |
| SF10      | 0.005              |

|      |        |
|------|--------|
| SF11 | 0.001  |
| SF12 | 0.0001 |

Bu tablo, belirli bir LoRa Spreading Factor (SF) değeri için AWGN ortamında elde edilen çerçeve hata oranlarını temsil eder. Çerçeve hata oranı, verilerin hatalı olarak iletilme olasılığını gösterir. Daha düşük FER değerleri, daha iyi bir iletim güvenilirliği sağlar. Tablodaki değerler LoRa'nın AWGN ortamında sunduğu yaklaşık hata oranlarını yansıtmaktadır.



Şekil 2.5 SF = 7 için üç farklı CFO değeri altında LoRa FER değeri

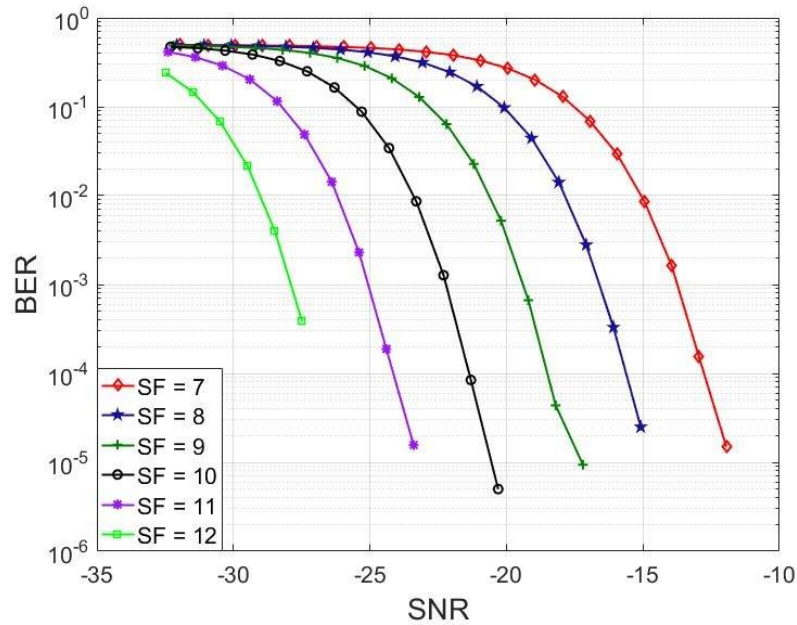
LoRa modülasyonundaki BER (bit error rate) değeri olan bit başına hata oranının Tablo 2.2 ve Tablo 2.3 verileri grafik olarak yansıtılmak istenildiğinde, yine farklı yayılım faktörleri özelinde incelediğimizde Şekil 2.6'da görülen verilere ulaşılmaktadır. [17]

LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı (Frame Error Rate - FER) değerlerini LoRa SF = 7 için üç farklı CFO (Carrier Frequency Offset) değeri altında Tablo 2.6'da görülmektedir.

**Tablo 2.6** LoRa modülasyonunun çerçeve hata oranı

| CFO (kHz) | FER (SF = 7) |
|-----------|--------------|
| 0         | 0.05         |
| 10        | 0.06         |
| 20        | 0.08         |

Bu tablo, LoRa'nın SF = 7 için farklı CFO değerlerinde elde edilen çerçeve hata oranlarını temsil eder. CFO, taşıyıcı frekansının istenmeyen bir sapmasını ifade eder. Tablodaki değerler, belirli bir CFO değeri altında SF = 7 LoRa modülasyonunun yaklaşık çerçeve hata oranlarını yansıtmaktadır.



**Şekil 2.6** Farklı SF değerleri ve CR = 0 ile LoRa tabanlı PHY katmanının BER performansı.

Tablo halinde LoRa tabanlı PHY(fiziksel) katmanının Bit Error Rate (BER) performansını farklı SF (Spreading Factor) değerleri ve CR (Coding Rate) = 0 için değerleri Tablo 2.7’de görülmektedir. Bu tablo, farklı LoRa Spreading Factor (SF) değerleri ve Coding Rate (CR) = 0 altında elde edilen Bit Error Rate (BER) değerlerini temsil eder. BER, veri iletiminde hatalı bit oranını ifade eder. Düşük BER değerleri, daha iyi bir iletim kalitesini gösterir.

**Tablo 2.7** LoRa PHY katmanının CR = 0 altında SF değerlerine bağılı olarak yaklaşık BER performansı

| SF Değeri | BER (CR = 0) |
|-----------|--------------|
| SF7       | 0.148        |
| SF8       | 0.115        |
| SF9       | 0.088        |
| SF10      | 0.067        |
| SF11      | 0.052        |
| SF12      | 0.041        |

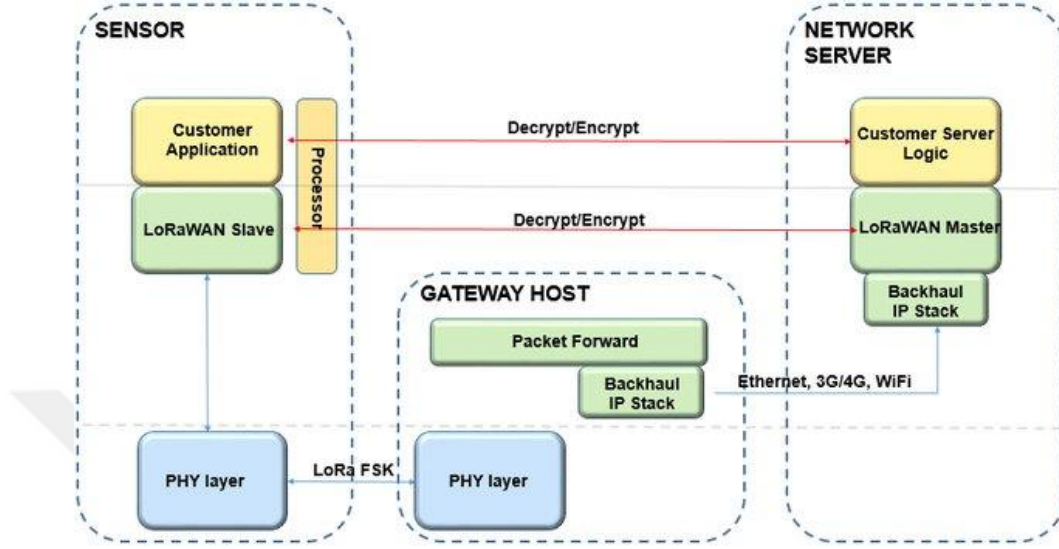
Yayılma faktörünün genişlemesi aynı oranda işlem kazancı anlamına gelmektedir. Daha büyük yayılma faktörüne sahip sistemlerde, düşük faktöre sahip transferlere kıyasla daha az hata ile veri iletimine olanak sağlamaktadır ve bu sayede daha uzun mesafelere veri aktarımı gerçekleştirilebilir. Yani SF12 yayılma faktörüne sahip sistem, SF7 ile modüle edilen sinyalden daha uzun mesafe katetmektedir, geniş menzilde iletme olanak tanımaktadır.

## 2.4 LoRaWAN Teknolojisi ve Cihaz Çeşitleri

LoRaWAN, LoRa modülasyonu üzerine inşa edilmiş açık standartta sahip Medya Erişim Kontrolü (MAC) katmanı protokolüdür. Cihazların LoRa donanımının iletim esnasında mesaj formatı gibi kontrollü ortam erişim detaylarını tanımlamayan ve denetleyen yazılım katmanıdır. Özellikle bataryalı cihazlar hedef alınarak; yönlü iletişim (bi-directional communication), uçtan uca güvenlik (end-to-end security), mobilite ve lokalleştirme maksadıyla optimize edilmiştir. LoRaWAN protokolü LoRa Alliance tarafından, ilk spesifikasyonu Ocak 2015'te yayınlanarak gelişimini sürdürmektedir.

LoRa protokol yığını uygulama katmanı, bölgesel ISM bandlarını içeren Fiziksel katman (PHY) modülasyonunu ve MAC katmanından oluşmaktadır. Uygulama katmanından gelen veriler, uç birim (end-device) ve ağ geçidi (gateway) arasında erişim için gerekli olan MAC komutlarını, MAC Yüğü (payload) olarak taşır ve ardından MAC katmanı gelen yüğü, MAC çerçevesini oluşturmak için kullanır. Fiziksel katmandaki yükün PHY başlangıç (preamble), PHY başlığı

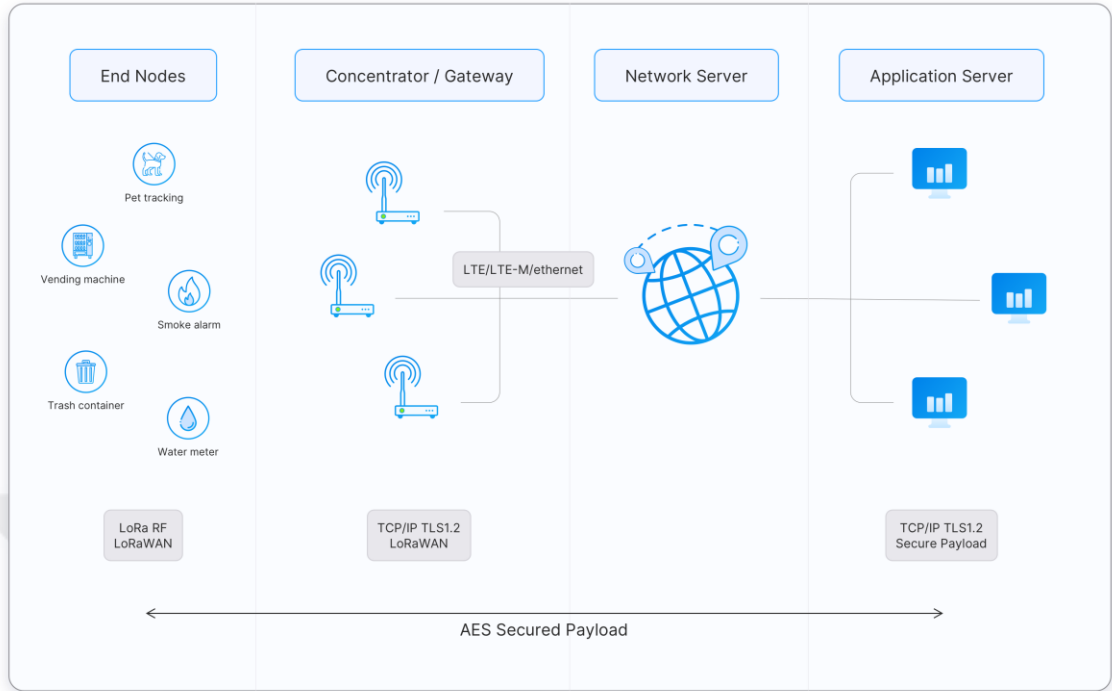
(header) ve CRC verileriyle birlikte PHY katman çerçevesi oluşur. Nihai olarak MAC ve PHY katmanlarının oluşturduğu uygulama katman çerçevesi, RF taşıyıcısı aracılığıyla hava ortamından iletimini gerçekleştirir.



Şekil 2.7 LoRaWAN ağ katmanları [18]

LoRaWAN sunduğu avantajlarla LPWAN teknolojilerinde öne çıkmaktadır. LoRaWAN uç cihazları, düşük güç modunda çalışacak şekilde optimize edilmiştir ve değişim olmaksızın 10 yıla kadar pil ömrü sunmaktadır. Bir LoRaWAN ağı, GPS'e ihtiyaç duymadan üçgenleme kullanarak uç cihazların konumunu belirleyebilir. En az üç ağ geçidi sinyali işlenerek bir LoRa uç cihazın konum verilerine erişilebilir. LoRaWAN ağ geçitleri, kırsal alanlarda 10 kilometreden fazla ve RF frekanslarının yoğun olduğu kentsel bölgelerde 3 kilometreye kadar sinyal iletebilir ve alabilir. İç mekan penetrasyonu olarak derin iç mekan ve çok katlı binalarda iletim kırımını minimize ederek geniş kapsama alanı sağlamaktadır. LoRaWAN Ağ Sunucuları, binlerce ağ geçidinden gelen milyonlarca mesajı işler. Minimum altyapı ihtiyaçları, düşük maliyetli uç birimler, açık kaynaklı yazılım ve lisanssız spektrum frekans desteğiyle düşük maliyetlidir. LoRaWAN, AES-128 şifreleme kullanarak uç cihaz ve uygulama sunucusu arasında güvenli iletişim sağlar. Uç cihazlar üzerinden uzaktan FOTA (Firmware updates over the air) güncelleme gerçekleştirilebilir. LoRaWAN, cihaz üreticileri, ağ geçidi üreticileri, anten üreticileri, ağ servis sağlayıcıları ve uygulama geliştiricilerinden oluşan çok geniş bir ekosisteme sahiptir.

Tipik bir LoRaWAN ağı aşağıdaki unsurlardan oluşur.



Şekil 2.8 LoRaWAN ağ şeması

**Uç Cihazlar (End Devices),** sensörler veya aktüatörlerden oluşan birimlerdir. Ağ geçitlerine LoRa modülasyonlu kablosuz mesajlar gönderir veya ağ geçitlerinden kablosuz olarak mesajları geri alırlar. Genellikle pille çalışırlar. Bu uç cihazlar, LoRa RF modülasyonu kullanılarak ağ geçitleri aracılığıyla LoRaWAN ağına kablosuz olarak bağlanır. Uç cihazlar yakınında konumlanmış ağ geçitleriyle iletişim kurar ve her ağ geçidi bir ağ sunucusuna bağlanır. LoRaWAN ağları ALOHA tabanlı bir protokol kullanır, bu nedenle uç cihazların belirli ağ geçitleriyle eşlenmesine gerek yoktur. Uç cihazlardan gönderilen mesajlar, menzil içindeki tüm ağ geçitlerinden geçer. Bu mesajlar Ağ Sunucusu tarafından alınır. Ağ Sunucusu aynı mesajın birden çok kopyasını aldıysa, mesajın tek bir kopyasını tutar ve diğerlerini atar. Bu, mesaj tekilleştirme (deduplication) olarak bilinir. Aşağıdaki şekil, sıcaklık, nem ve düşme algılama gibi sensörlerden oluşan bir uç cihazı göstermektedir.



**Şekil 2.9** LoRaWAN uç cihazı

**Ağ Geçitleri (Gateways)**, uç cihazlardan mesajlar alıp ve bunları Ağ Sunucusuna iletmektedir. Her ağ geçidi (yapılandırma ayarları kullanılarak) bir LoRaWAN ağ sunucusuna kaydedilir. Bir ağ geçidi, uç cihazlardan LoRa mesajlarını alır ve bunları LoRaWAN ağ sunucusuna iletir. Ağ geçitleri, Hücresel (3G/4G/5G), WiFi, Ethernet, fiber optik veya 2,4 GHz radyo bağlantıları gibi bir ana taşıyıcı (backhaul) kullanılarak Ağ Sunucusuna bağlanır. Ağ geçitleri iç ve dış mekan şeklinde kategorize edilebilir. Dış mekan ağ geçitleri, iç mekan ağ geçitlerinden daha geniş bir kapsama alanı sağlar. Hem kırsal hem de kentsel alanlarda kapsama sağlamak için uygundur. Genellikle, bir dış mekan ağ geçidinin alıcı duyarlılığı, bir iç mekan ağ geçidinin alıcı duyarlılığından daha yüksektir.



**Şekil 2.10** İç mekan(A) ve dış mekan(B) ağ geçitleri

**Ağ Sunucusu (Network Server)**, tüm ağı yöneten bir sunucu üzerinde çalışan bir yazılım paketidir. Ağ Sunucusu, tüm LoRaWAN ağındaki ağ geçitlerini, uç cihazları, uygulamaları, kullanıcıları yönetir ve tüm MAC katman kumutlarına yanıt verir. Ağ sunucusu, uç cihazlar ve uygulama sunucusu (uçtan uca güvenlik) arasında mesajların taşınması için güvenli 128 bit AES bağlantıları kurarak, mesaj

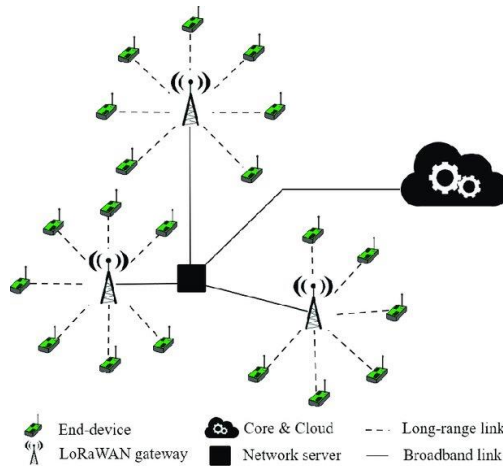
ve cihaz doğrulaması sağlamaktadır. Ağ sunucularının cihazların veri hızını optimize etmek için ADR komutları gönderme, cihaz adreslerinin kontrolünün yanı sıra, yukarı bağlantı (UL) mesajlarının alınması ve uygulama yüklerinin, uygulama sunucularına yönlendirmesini sağlamaktadır.

**Uygulama sunucuları (Application Servers)**, uç cihazlardan alınan uygulama özel verilerinin güvenli bir şekilde işler. Uygulama sunucusu tüm uygulama katmanı indirme bağlantı yüklerini oluşturur ve bunları Ağ Sunucusu aracılığıyla bağlı uç cihazlara gönderir. Bir LoRaWAN ağında birden fazla Uygulama Sunucusu olabilir. Toplanan veriler makine öğrenimi ve yapay zeka gibi teknikler uygulanarak yorumlanabilir ve çözümler gerçekleştirilebilir.

**Katılım sunucusu (Join Server)**, güvenli cihaz etkinleştirme, kök anahtar depolama ve oturum anahtarı oluşturma konusunda yardımcı olur. Katılma prosedürü, Ağ Sunucusu aracılığıyla Katılma Sunucusuna Katılma isteği mesajı göndererek uç cihaz tarafından başlatılır. Join-server, Join-request mesajını işler, oturum anahtarları oluşturur ve NwkSKey ve AppSKey'i sırasıyla Network sunucusuna ve Uygulama sunucusuna aktarır. Join Server ilk olarak LoRaWAN v1.1 serisi ile tanıtılmıştır, ayrıca LoRaWAN v1.0.4'te de mevcuttur.

#### 2.4.1 LoRaWAN Ağ Mimarisi

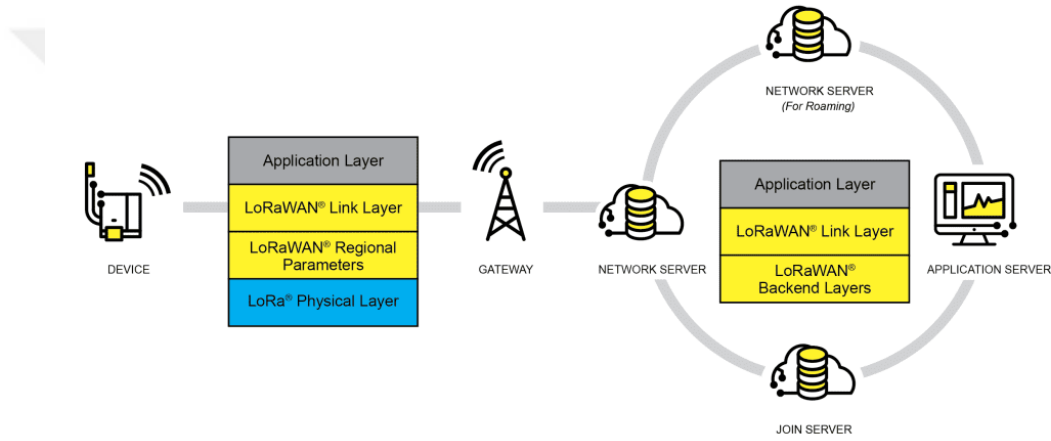
LoRaWAN ağ mimarisi, ağ geçitlerinin uç cihazlar ve merkezi bir ağ sunucusu arasında mesajları ilettiği yıldızların yıldızı (star-of-stars) topolojisine konuşlandırılır.



Şekil 2.11 LoRaWAN yıldız topolojisi [19]

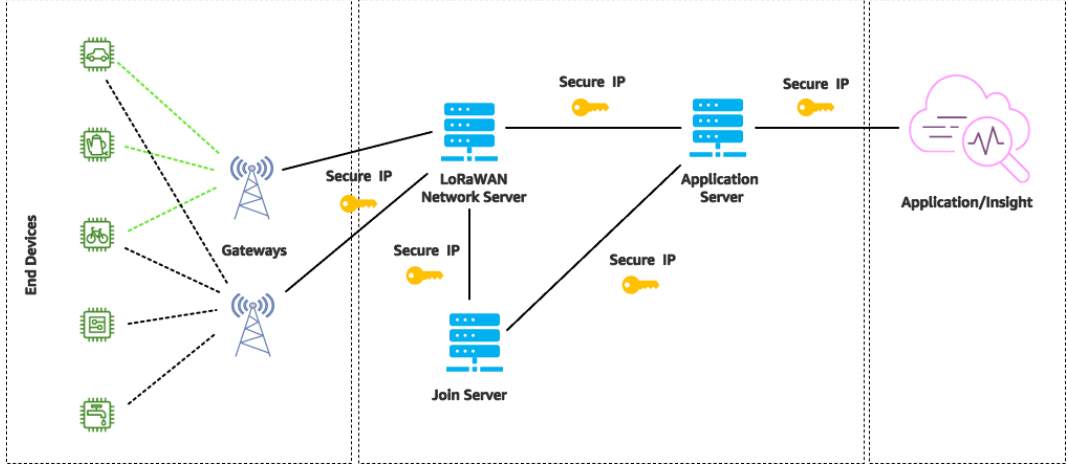
LoRaWAN ağındaki uç birimler tek bir ağ geçidiyle bağdaştırılmak zorunda değildir. Uç birimlerden çıkan veri paketleri kapsamı alanında bulunan birden fazla ağ geçidi tarafından alınabilir. Alınan ham veri ya da komut paketlerini ana taşıyıcılardan; Cellular, Ethernet veya WiFi gibi iletişim teknolojileri vasıtasıyla, UDP/IP paketlerini kapsülleyerek bulut tabanlı merkezi ağ sunucusuna iletir.

Ağ sunucusu, ağ yönetimi ve güvelliği, paket filtreleme (duplication), gerekirse uç birimlere paket iletmekten ve MAC komutları göndermekten sorumludur. İletişim üçüncü parti uygulamaya sunucularında sonlanmaktadır. Ağ sunucusuna birden fazla uygulama katmanı da bağlanabilir.



**Şekil 2.12** LoRaWAN ağ topolojisi [20]

Ağ geçitleri, standart IP bağlantıları aracılığıyla ağ sunucusuna bağlanır ve şeffaf bir köprü görevi görür, RF paketleri ve IP paketleri arasında dönüşüm olur. LoRa fiziksel katmanı, uzun menzil kapasitesiyle, uç cihazlar ile bir veya daha fazla ağ geçidi arasında tek atlamalı bir bağlantıya izin verir. Tüm modlar çift yönlü iletişim yeteneğine sahiptir ve Havadan Aygıt Yazılımı (FOTA) yükseltmeleri veya diğer toplu dağıtım mesajları gibi görevler sırasında spektrumun verimli bir şekilde kullanılması için çok noktaya yayın adresleme grupları için destek barındırmaktadır.



Şekil 2.13 LoRaWAN ağ mimarisi [21]

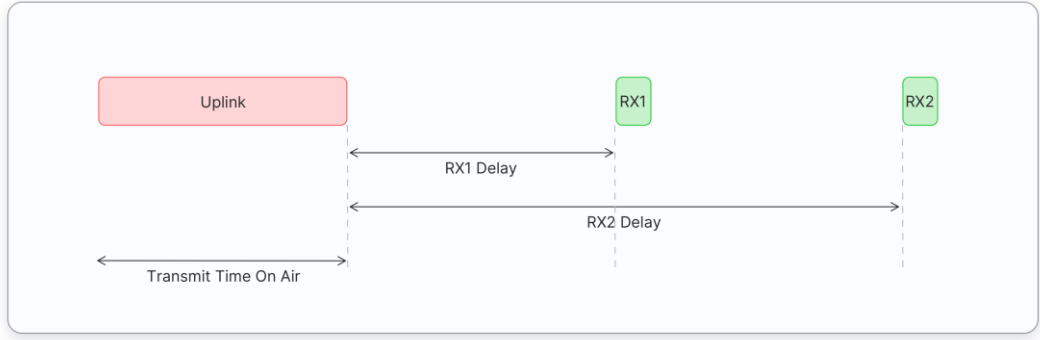
#### 2.4.2 LoRaWAN Sınıfları

LoRaWAN, geniş uygulama alanlarındaki farklı ihtiyaçları karşılamak için üç farklı uç birim sınıfına sahiptir. Oluşan sınıflamalar, iletişim gecikmesi ve batarya kullanım ömrünü optimize etmektedir. LoRaWAN ağındaki cihazlar çift yönlü (bi-directional), yukarı bağlantı (UL: Uplink) ve aşağı bağlantı (DL: Downlink) bağlantı desteğiyle A, B ve C sınıflandırmasına sahiptir.

##### A Sınıfı

Tüm LoRaWAN uç cihazları A sınıfını desteklemektedir. A Sınıfı iletişim her zaman uç cihaz tarafından başlatılır ve asenkron olarak, herhangi bir zamanda yukarı bağlantı (UL: Uplink) mesajı iletilerek gerçekleştirilebilir. Uç cihaz, kendi uygulaması tarafından tanımlandığı sürece düşük güçte uyku moduna girebilir ve periyodik uyandırma için ağ gereksinimi yoktur. Bu durum, rastgele zaman bazında, ALOHA protokol tipindeki A sınıfının en düşük güçteki çalışma moduna sahip olmasını sağlamaktadır.

Yukarı bağlantı (UL) iletimi tamamlandığında cihaz iki tane aşağı bağlantı (DL: Downlink) penceresi açar. Yukarı bağlantı (UL) iletiminin sonu ile aşağı bağlantı (DL) pencerelerinin başlangıcı arasında bir gecikme mevcuttur. Ağ sunucusu bu iki alım penceresi arasında herhangi bir yanıt vermezse sonraki aşağı bağlantı (DL), bir sonraki yukarı bağlantı (UL) iletiminden sonra olacaktır.



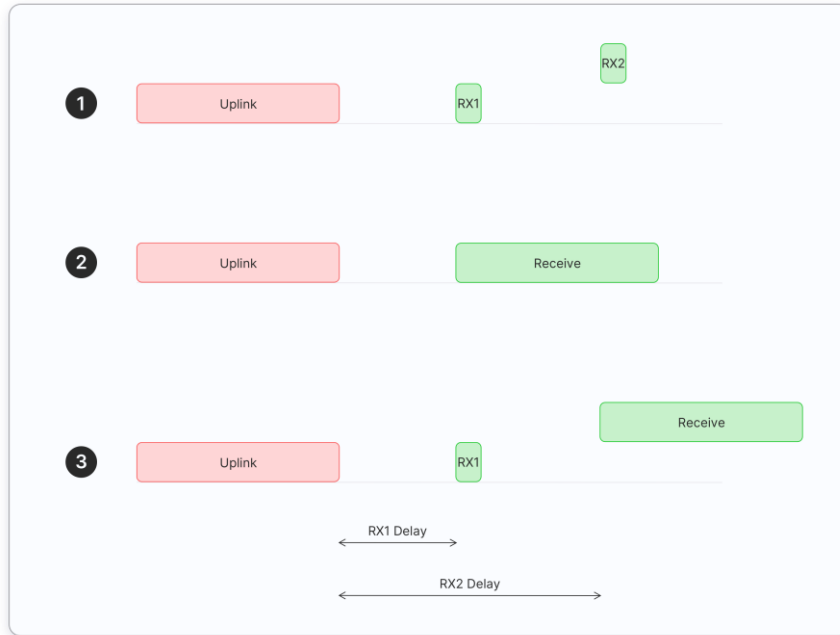
**Şekil 2.14** A Sınıfı alım penceresi (receive windows)

Sunucu, ilk alma penceresi (RX1) veya ikinci alma penceresi (RX2) sırasında yanıt verebilir, ancak her iki pencereyi de kullanmaz. Aşağıda gösterildiği gibi aşağı bağlantı mesajları için üç durumu ele alalım.

Durum 1: Uç cihaz her iki receive (alma) penceresini de açar, ancak her iki alma penceresinde de aşağı bağlantı (DL) bağlantı mesajı, yanıt almaz.

Durum 2: Uç cihaz, birinci alma penceresi sırasında bir aşağı bağlantı (DL) yanıtı alır ve bu nedenle ikinci alma penceresini açmaz.

Durum 3: Uç cihaz ilk alma penceresini açar ancak bir aşağı bağlantı (DL) almaz. Bu nedenle, ikinci alma penceresini açar ve ikinci alma penceresi sırasında bir aşağı bağlantı (DL) yanıtı alır.

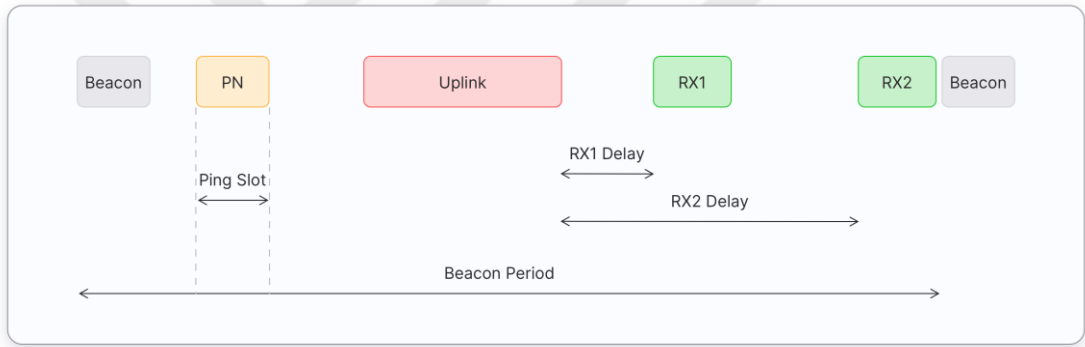


**Şekil 2.15** A Sınıfı alma pencerelerinin davranışı

A sınıfındaki cihazlar genellikle düşük enerji tüketimine sahip pilli uygulamalarda, çalışma zamanının çoğunu sleep (uyku) modunda geçirmektedir. Uplink bağlantıları arasında uzun aralıklar tutmaktadır ve yüksek downlink gecikmesine sahiptir.

### B Sınıfı

B Sınıfı cihazlar ağ sunucusundan aşağı bağlantı (DL) mesajlarını almak için programlanmış alma pencerelerini açar. Ağ geçidi tarafından iletilen zamanla senkronize edilmiş işaretleri(beacons) kullanarak, cihazlar periyodik olarak alma pencerelerini açar. İki işaret arasındaki süre, işaret periyodu olarak bilinir. Cihaz, ağ sunucusundan aşağı bağlantı mesajlarını almak için planlanan zamanlarda aşağı bağlantı "ping slotları (yuvaları)" açar. B Sınıfı cihazlar ayrıca Şekil 2.16'de görebileceğiniz gibi, bir yukarı bağlantı (UL) gönderdikten sonra alma pencerelerini açar.

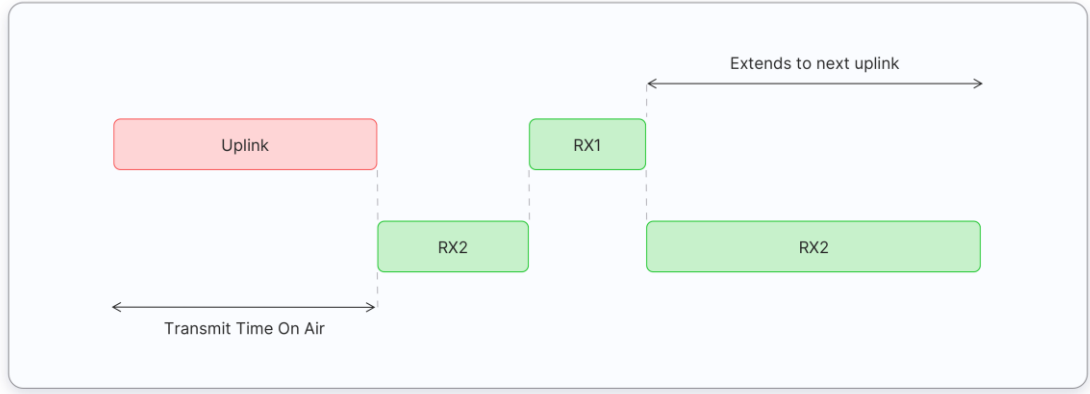


Şekil 2.16 B sınıfı alma pencereleri

B Sınıfı uç cihazlar, önceden yapılandırılmış zamanlarda erişilebilir olduklarından ve bir aşağı bağlantı (DL) almak için bir yukarı bağlantı (UL) göndermeleri gerekmediğinden, Sınıf A uç cihazlardan daha düşük gecikmeye sahiptir. Pil ömrü B Sınıfı'nda A Sınıfına göre daha kısadır, çünkü cihaz aktif modda, beacon'lar ve ping yuvaları sırasında daha fazla zaman harcar.

### C Sınıfı

C Sınıfı cihazlar, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, iletim yapmadıkları sürece alma pencerelerini açık tutarak A Sınıfını genişletir. Bu, düşük gecikmeli iletişime izin verir, ancak A Sınıfı cihazlardan çok daha fazla enerji tüketir.

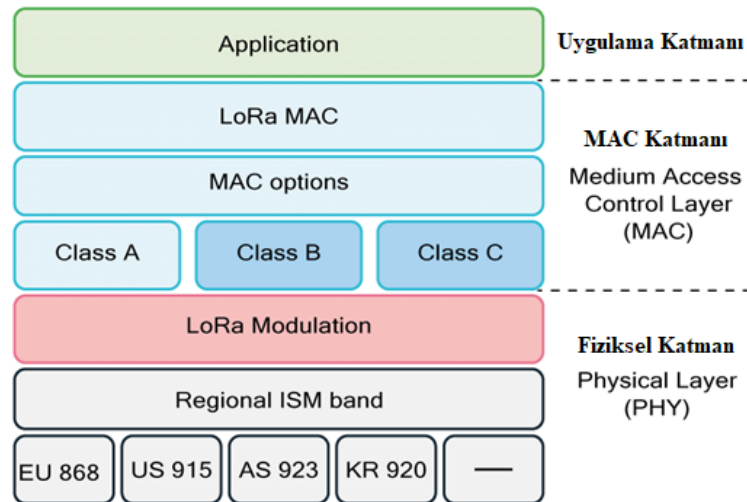


**Şekil 2.17** C sınıfı alma pencereleri

C sınıfı uç cihazlar, genellikle elektrikle çalışır sürekli alma penceresine sahiptir ve aşağı bağlantı (DL) gecikmesi yoktur.

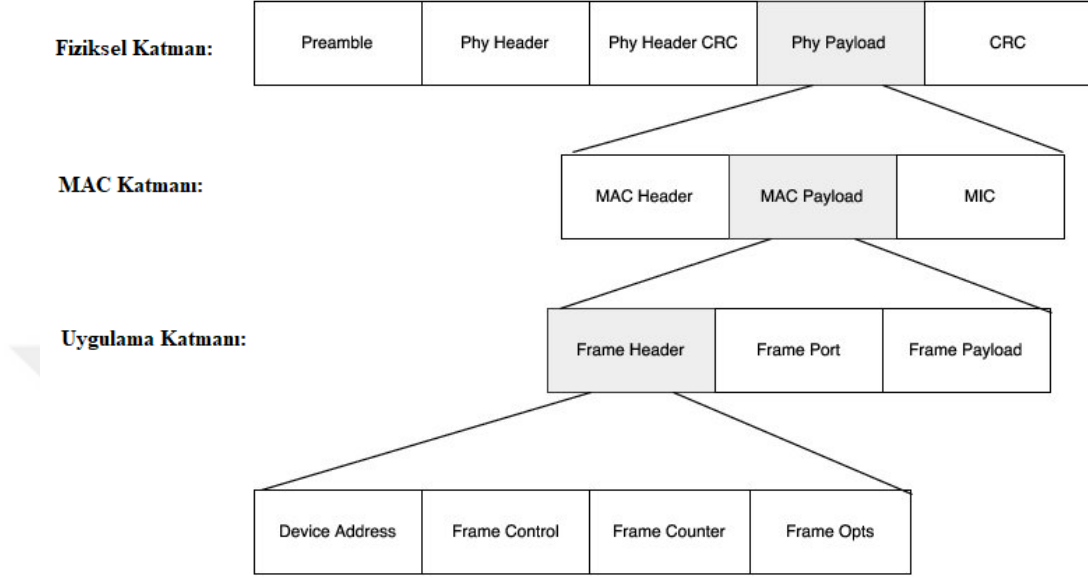
#### 2.4.3 LoRaWAN Katılım Prosedürleri ve Paket Formları

LoRaWAN veri paketleri yukarı bağlantı (UL: Uplink) ve aşağı bağlantı (DL: Downlink) olmak üzere iki farklı mesajdan oluşmaktadır. Yukarı bağlantı mesajları uç cihazdan ağ geçidine giden mesajları ifade ederken, Aşağı bağlantı ağ geçidinden uç cihaza taşınan mesajlardır. DL ve UL mesajları onaylı (confirmed) ve onaylanmamış (unconfirmed) olarak iki başlıkta kategorize edilmektedir. Onaylanmış mesajlarda cihazlardaki ilgili mesaj bilgisinin ulaşıp ulaşmadığı hakkında geri bildirim sağlanmaktadır.



**Şekil 2.18** LoRaWAN Katmanları

LoRaWAN paket yapısı Şekil 2.18’te görüldüğü üzere Fiziksel (PHY), MAC ve Uygulama katmanlarından oluşmaktadır.



Şekil 2.19 LoRaWAN paket yapısı [22]

### Fiziksel Katman (PHY Frame)

PHY paketi bir önsöz (preamble), bir başlık (header), bir başlık CRC'si (Header CRC), bir yük (Payload) ve bir yük CRC'sinden oluşur. Yukarı bağlantı mesajları Tablo 2.4’te belirtilen açık mesaj paketine sahiptir. Yük bütünlüğünün korunmasını CRC sağlamaktadır. Aşağı bağlantı mesajlarında yük CRC’si bulunmamaktadır.

Tablo 2.8 PHY mesaj formatı

|                     |                  |                             |                      |      |
|---------------------|------------------|-----------------------------|----------------------|------|
| Preamble<br>(Önsöz) | PHDR<br>(Başlık) | PHDR_CRC<br>(Başlık CRC’si) | PHY Payload<br>(Yük) | CRC* |
|---------------------|------------------|-----------------------------|----------------------|------|

Bu katmanda mesaj formatı açık (explicit) ve kapalı (implicit) olacak şekilde iki tip paket formatı kullanılmaktadır. Varsayılan çalışma modu olan açık başlık formatında, bayt tipinde yük (payload) uzunluğu, ileri hata düzeltme (FEC)

ve 16-bit CRC tanımı gibi yük tanımlamaları hakkında bilgi vermektedir. Başlıkta maksimum hata düzeltme kodu 4/8 ile iletilir ve alıcının geçersiz başlıkları tanımlayarak, yok etmesi için kendi CRC'sine sahiptir.

Kodlama oranı ve CRC sabitlendiği ya da önceden bilindiği durumlarda iletim süresini azaltma avantajı için kapalı başlık modu tercih edilebilir. Kapalı başlık (implicit) modunda başlık paketten çıkarılır ancak yük uzunluğu hata kodlama oranı ve yük CRC'ci her iki tarafta da karşılıklı olarak manuel yapılandırma gerektirmektedir.

Önsöz (preamble) alıcıya gelen veri akışını senkronize etmektedir. İletilen paketteki önsöz ile alım penceresinde tarafında, önsözün algılanarak senkronize edilmesi için 5 sembole ihtiyaç duyar ve bu semboller üst üste gelerek örtüşmelidir. Önsöz değişkeni programlanabilir, preamble uzunluğu uzatılarak görev döngüsü azaltılabilir.

#### **MAC Katmanı (PHYPayload)**

LoRaWAN paketlerindeki yukarı bağlantı (UL: Uplink) ve aşağı bağlantı (DL: Downlink) mesajlarında MAC paketi Tablo 2.5'te görüldüğü üzere MAC başlığı (MHDR), MAC yükü (MACPayload) ve mesaj bütünlüğü kodu (MIC) ile 3 parçadan oluşmaktadır.

**Tablo 2.9** MAC (PHYPayload) mesaj formatı

|      |             |     |
|------|-------------|-----|
| MHDR | MAC Payload | MIC |
|------|-------------|-----|

MAC Başlığında (MACHeader) Tablo 2.6'da görüldüğü üzere mesaj tipi (Mtype), güncelleme alımlarında kullanılabilecek RFU alanı ve LoRaWAN spesifikasyonundaki mesaj formatının versiyonunu (Major) içeren çerçeveden oluşmaktadır.

**Tablo 2.10** MAC başlık (MHDR) yapısı

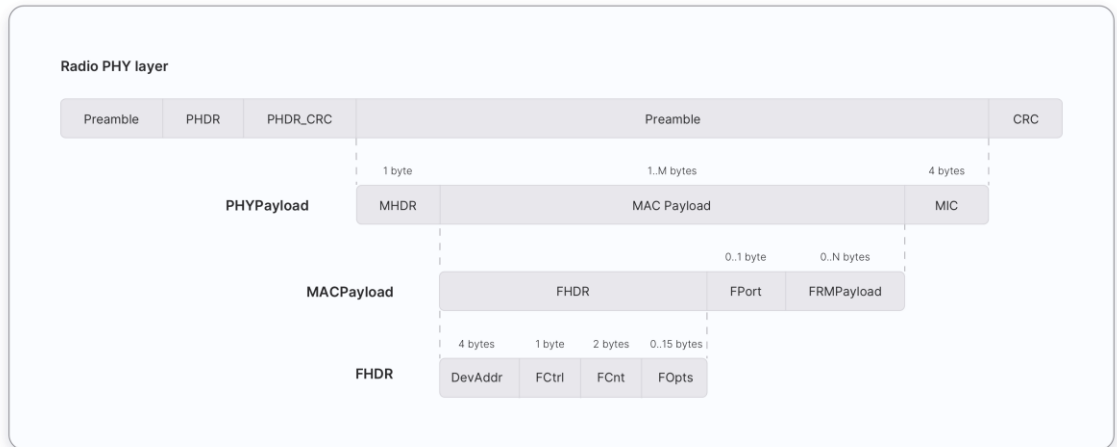
|       |     |       |
|-------|-----|-------|
| MType | RFU | Major |
|-------|-----|-------|

LoRaWAN mesaj verileri Tablo 2.7'de görüldüğü üzere 8 farklı MType seçeneğine sahiptir.

**Tablo 2.11** MType tanımları

| Mtype Değeri | Açıklaması             |
|--------------|------------------------|
| 000          | Katılım isteği         |
| 001          | Katılım kabul          |
| 010          | Onaysız veri yukarı    |
| 011          | Onaysız veri aşağı     |
| 100          | Onaylı veri yukarı     |
| 101          | Onaylı veri aşağı      |
| 110          | Yeniden katılım isteği |
| 111          | Özel                   |

LoRaWAN veri mesajında şekil 2.20’te görüldüğü üzere MAC payload alanının veri uzunluğu veri oranına bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte fiziksel katman tarafından da sınırlandırılmıştır. MAC payload, uygulama başlık bilgilerini, kullanıcı bilgilerini ve çerçeve verilerini barındırır. MAC payload çerçeve başlığı (FHDR), bağlantı noktası (FPort) ve FRMPayload’dan oluşmaktadır. Çerçeve başlığı (FHDR) uç birimin cihaz adresi (DevAddr), frame kontrolü (FCtrl), frame sayacı (FCnt) ve MAC komutlarını taşıyan frame seçeneği (FOpts) alanlarına sahiptir.

**Şekil 2.20** LoRaWAN veri mesajı

LoRaWAN MAC katmanında yer alan MIC değeri MAC başlık ve yük (payload) bütünlüğünü onaylayarak doğrulamak ve yetkisiz mesaj değişkenliğini önleyici kimlik doğrulama için kullanılmaktadır. MIC mesaj kimlik doğrulaması için NwkSKey kullanılırken, MAC payload gizliliğini korumak için AES-128 algoritma tabanlı AppSKey anahtarı kullanılmaktadır.

#### 2.4.4 LoRaWAN Bölgesel Sınırlamaları

LoRaWAN lisanssız radyo spektrumunda faaliyet göstermekte olup, bölgesel bazlı düzenlemelere sahiptir. Bölgesel parametreler, frekans planları (kanal planları), zorunlu kanal frekansları ve katılma isteği mesajları için veri hızları gibi fiziksel katman parametrelerini içerir. Bölgesel Parametreler ayrıca maksimum yük boyutu gibi LoRaWAN katmanı parametrelerini içerir. Türkiye'deki LoRaWAN cihazlarda, Avrupa bölgesel sınırlamasında yer aldığından ötürü EU863-870 ve EU433 bantları tercih edilmektedir. EU863-870 bandı, radyo spektrum kullanımının Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü ETSI [EN300.220] standardı tarafından tanımlandığı herhangi bir bölgeye uygulanabilir. LoRaWAN, lisanssız ISM (Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi) bantlarında faaliyet göstermektedir. Tablo 2.8'de frekans planlarını ve bunların ortak adlarını listelenmiştir. [23]

**Tablo 2.12** LoRaWAN bölgesel sınırlaması

| Kanal     | Yaygın İsmi    |
|-----------|----------------|
| EU863-870 | EU868 (Avrupa) |
| US902-928 | US915          |
| CN779-787 | CN779          |
| EU433     | EU433 (Avrupa) |
| AU915-928 | AU915          |
| CN470-510 | CN470          |
| AS923     | AS923          |
| KR920-923 | KR920          |
| IN865-867 | IN865          |
| RU864-870 | RU864          |

LoRaWAN EU863-870 bandını destekleyen her uç cihazda aşağıdaki üç varsayılan kanal uygulanmalıdır. Bu kanallar, katılma isteği mesajını yayınlamak için uç cihaz tarafından kullanılır. Uç cihaz, katılma isteği mesajını göndermek için varsayılan kanallardan birini rasgele seçer. EU863-870 bandı maksimum 16 kanalı destekler. Son cihaz aktivasyonu sırasında ek kanallar belirtilebilir. [24]

**Tablo 2.13** EU868-870 varsayılan kanallar

| Band Genişliği<br>Bandwith [kHz] | Kanal Frekansı<br>[MHz]    | LoRa DR /<br>Bitrate       | Kanal<br>Sayısı | Görev<br>Dönüęüsü (Duty<br>Cycle) |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 125                              | 868.10<br>868.30<br>868.50 | DR0 to DR5<br>/ 0.3-5 kbps | 3               | < 1%                              |

Fiziksel ortama erişmek için ETSI düzenlemeleri, vericinin açık olabileceği maksimum süre veya bir vericinin saat başına yayın yapabileceği maksimum süre gibi bazı kısıtlamalar getirir. ETSI düzenlemeleri, bir görev döngüsü sınırlaması veya sözde Konuşmadan Önce Dinle (Listen Before Talk LBT -AFA) Uyarlanabilir Frekans Çevikliği (Adaptive Frequency Agility-AFA) iletim yönetimi kullanma seçimine izin verir. EU868 uç cihazları 863 ila 870 MHz frekans bandında çalışabilme yeteneğine ve en az 24 kanalın parametrelerini depolamak için bir kanal veri yapısına sahip olmalıdır.

Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI), EU863-870 frekansı için maksimum görev döngüsünü, bir cihazın iletişim kurmak için harcayabileceği maksimum süre olan %1 olarak ayarlar.

Bazı genel görev döngüleri için uç cihaz başına günlük (24 saat) izin verilen yayın süresinin hesaplanması Tablo 2.10’da gösterilmiştir.

**Tablo 2.14** EU863-870 görev döngüsü

| Görev Döngüsü<br>(Duty Cycle) | Yayın Süresi = günlük saniye<br>sayısı X görev döngüsü | Cihaz başına günlük izin<br>verilen maksimum canlı<br>yayın süresi |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 0.1%                          | 86400 x 0.1% =                                         | 86 saniye (günde)                                                  |
| 1%                            | 86400 x 1% =                                           | 864 saniye (günde)                                                 |

|      |                       |                     |
|------|-----------------------|---------------------|
| 10 % | $86400 \times 10\% =$ | 8640 saniye (günde) |
|------|-----------------------|---------------------|

Veri hızı, birim zamanda iletilen bit sayısıdır. LoRa modülasyonu ile veri hızı, yayılma faktörü, bant genişliği ve kodlama hızı gibi birkaç faktöre bağlıdır. Tablo 2.11, yayılma faktörü ve bant genişliği ile yapılandırılmış her bir veri hızı (DR0- DR6) için bit hızını gösterir.

**Tablo 2.15** EU863-870 veri hızı

| Veri Hızı (Data Rate) | Konfigürasyon (SF + BW) | Bit Hızı (bit/s) |
|-----------------------|-------------------------|------------------|
| 0                     | LoRa: SF12 / 125 kHz    | 250              |
| 1                     | LoRa: SF11 / 125 kHz    | 440              |
| 2                     | LoRa: SF10 / 125 kHz    | 980              |
| 3                     | LoRa: SF9 / 125 kHz     | 1760             |
| 4                     | LoRa: SF8 / 125 kHz     | 3125             |
| 5                     | LoRa: SF7 / 125 kHz     | 5470             |
| 6                     | LoRa: SF7 / 250 kHz     | 11000            |

Tablo 2.11’de görüldüğü üzere, daha yüksek yayılma faktörleri daha düşük bit hızlarına ve daha düşük yayılma faktörleri daha yüksek bit hızlarına neden olur. Ancak aynı yayılma faktörü için, bant genişliği iki katına çıkarsa, veri hızı da iki katına çıkmaktadır. Tüm EU868-870 uç cihazları, aşağıdaki veri hızı seçeneklerinden birini desteklemelidir.

1. DR0 – DR5 – LoRaWAN sertifikasını almak için desteklenen minimum veri hızı seti.
2. DR0 – DR7
3. DR0 – DR11 – tüm veri hızları son cihazda uygulanır.

Etkili İzotropik Yayılan Güç (EIRP), izotropik bir anten tarafından tek bir yönde yayılan toplam güçtür. Anten kazancı, izotropik antenler için dBi cinsinden ifade edilir. Tablo 2.12’de veri iletmek için kullanılabilecek EIRP değerlerinin listesi gösterilmektedir.

**Tablo 2.16** EU863-870 maksimum EIRP / ERP

| İletim Gücü (TX Power) | EIRP             | Hesaplanan Değer         |
|------------------------|------------------|--------------------------|
| 0                      | Max EIRP         | +16 dBm                  |
| 1                      | Max EIRP - 2 dB  | +16 dBm - 2 dB = +14 dBm |
| 2                      | Max EIRP - 4 dB  | +16 dBm - 4 dB = +12 dBm |
| 3                      | Max EIRP - 6 dB  | +16 dBm - 6 dB = +10 dBm |
| 4                      | Max EIRP - 8 dB  | +16 dBm - 8 dB = +8 dBm  |
| 5                      | Max EIRP - 10 dB | +16 dBm - 10 dB = +6 dBm |
| 6                      | Max EIRP - 12 dB | +16 dBm - 12 dB = +4 dBm |

EU863-870 için Maks EIRP +16dBm'dir. Tablo 2.12'de belirtilen EIRP ve ERP değerleri miliwatt (mW) cinsinden de ifade edilebilir. Örneğin:

$$+16 \text{ dBm} = 40 \text{ mW}$$

$$+14 \text{ dBm} = 25 \text{ mW}$$

$$+27 \text{ dBm} = 500 \text{ mW}$$

Değerlerine karşılık gelmektedir.

EU868 bandı için maksimum yük boyutuna (payload) bakıldığında, maksimum uygulama yükü boyutu (uzunluk) veri hızına göre değişir. Tablo 2.13'te farklı veri hızları için maksimum uygulama yükü (FRMPayload) boyutu gösterilmektedir.

**Tablo 2.17** EU863-870 maksimum yük boyutu

| Veri hızı | Konfigürasyon (SF + BW) | Maksimum uygulama yükü boyutu (bytes) |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|
| 0         | LoRa: SF12 / 125 kHz    | 51                                    |
| 1         | LoRa: SF11 / 125 kHz    | 51                                    |
| 2         | LoRa: SF10 / 125 kHz    | 51                                    |
| 3         | LoRa: SF9 / 125 kHz     | 115                                   |
| 4         | LoRa: SF8 / 125 kHz     | 242                                   |
| 5         | LoRa: SF7 / 125 kHz     | 242                                   |
| 6         | LoRa: SF7 / 250 kHz     | 242                                   |

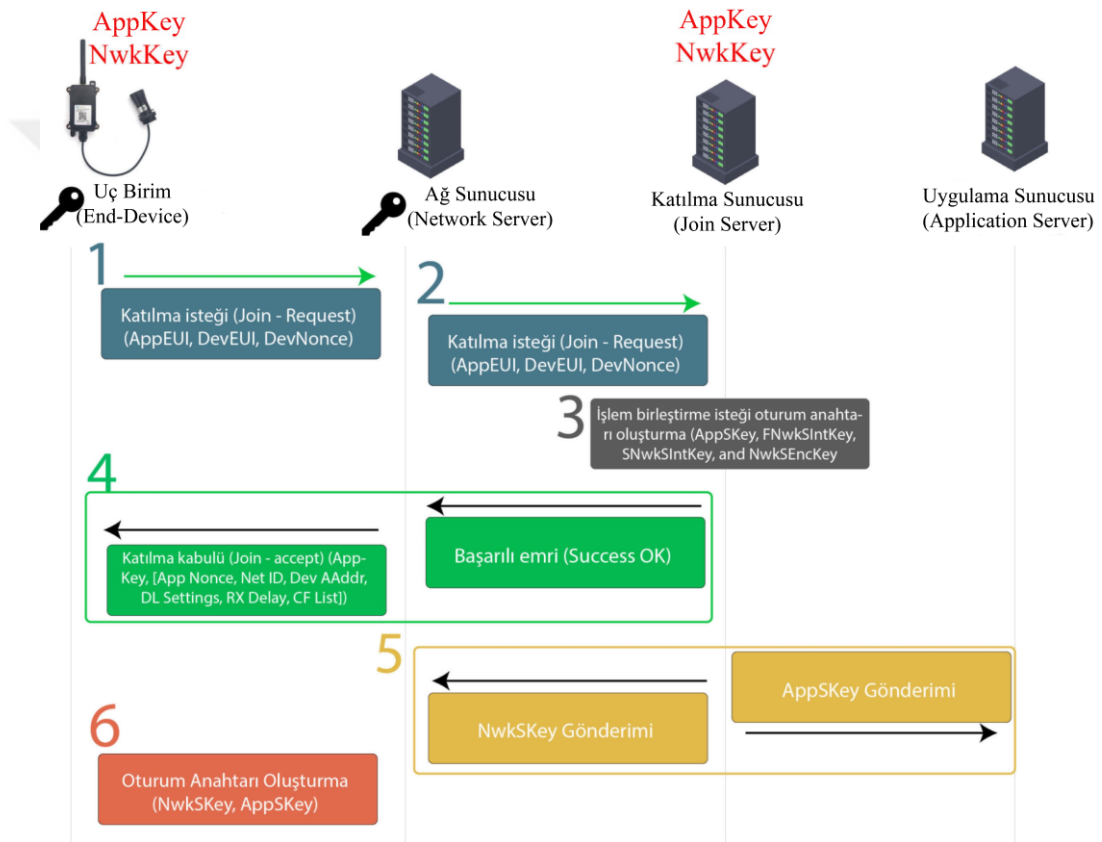
#### 2.4.5 LoRaWAN Güvenlik Anahtarlama

LoRaWAN sistemlerde her uç cihaza üretici tarafından 64 bitlik benzersiz bir kimlik DevEUI atanmaktadır ve bu değer donanıma bağlı olup değiştirilemez. DevEUI'den farklı olarak, 32-bit DevAddr mevcut ağ içindeki son cihazı tanımlar ve ağa katıldıktan sonraki tüm iletişim onunla yapılır. Bir DevAddr değeri, önüne bir NwkID (ağ tanımlayıcısı) eklenmiş NwkAddr'den (ağ içindeki son cihaz adresi) oluşur. DevAddr değeri eşsiz değildir ve birden fazla cihaz aynı DevAddr'ye sahip olabilir. DevAddr ve oturum anahtarları, etkinleştirme adı verilen bir prosedür sırasında uç cihaza atanır. LoRaWAN uç cihazlarda mesaj göndermeden ve almadan önce her uç cihazın bir ağa kayıtlı olması gerekmektedir, bu prosedür aktivasyon olarak bilinir. LoRaWAN, bir son cihazı etkinleştirirken Havadan Etkinleştirme (OTAA) ve Kişiselleştirme Yoluyla Aktivasyon (ABP) olmak üzere iki aktivasyon moduna sahiptir. Aktivasyon metodlarını ayıran ana etmen ABP yönteminde anahtarlar halihazırda mevcutken, OTAA yönteminde katılım prosedürüyle beraber oturum anahtarlarının türetilmesidir. LoRaWAN versiyonlarına göre (LoRaWAN 1.0.x ve 1.1) anahtarlama ve birleştirme prosedürleri farklılık gösterebilmektedir.

#### Havadan Etkinleştirme (Over-The-Air-Activation / OTAA)

Uç cihazlar için en güvenli ve önerilen etkinleştirme yöntemi olan OTAA'da cihazlar, dinamik bir cihaz adresinin atandığı ve cihazla güvenlik anahtarlarının eşleştiği ağ ile bir birleştirme prosedürü gerçekleştirir. OTAA uç cihazları, kök anahtarlarla (root-keys) sağlanır. OTAA aktivasyonunda, bir uç cihaz, bir LoRaWAN ağıyla birleştirme prosedürü gerçekleştirir; bu sırada, bir uç cihaza dinamik bir DevAddr atanır ve oturum anahtarlarını türetmek için kök anahtarlar kullanılır. Bu nedenle DevAddr ve oturum anahtarları, her yeni oturum kuruldukça değişir. Bu, farklı ağlara/kümelere geçişe olanak tanımaktadır. ABP'den farklı olarak, OTAA uç cihazları her yeni oturumu oluştururken çerçeve sayaçlarını ve oturum anahtarlarını yeniden değerlendirebilir. Bu nedenle, bir OTAA cihazının ömrü, çerçeve sayacının genişliği ile şartlandırılmaz. OTAA katılımının son cihazın kayıtlı olduğu ağın kapsama alanı içinde olmasını gerektirmesidir. Bunun nedeni, OTAA birleştirme prosedürünün, uç cihazın Ağ Sunucusundan Birleştirme Kabulü aşağı bağlantı mesajını alabilmesini gerektirmesidir. Uç cihaz açıldığında şebeke

kapsama alanına sahip değilse, Birleştirme prosedürü başarısız olur. Cihazda kullanılan üretici yazılımına ve LoRaWAN yığına bağlı olarak, başarısız bir OTAA birleştirme, cihazın uyku moduna geçmemesine veya ağa yeniden katılmak için sonsuz denemelerde çok fazla enerji kullanmasına neden olabilir. Uç cihaz için ağ kapsamının garanti edilememesi, OTAA'nın kullanılamayacağı anlamına gelmez. Cihazdaki üretici yazılımı, başarısız OTAA birleştirmelerini düzgün bir şekilde işleyecek kadar akıllıysa, cihaz birleştirme işlemini daha sonraki bir aşamada yeniden deneyebilir.



Şekil 2.21 LoRaWAN 1.1'de OTAA mesaj akışı

LoRaWAN 1.0.x'te, birleştirme prosedürü, son cihaz ile Birleştirme Sunucusu arasında değiş tokuş edilecek katılma isteği (son cihazdan katılma sunucusuna) ve katılma kabulü (katılım sunucusundan uç birime) olacak şekilde iki MAC mesajı gerektirir.

Etkinleştirmeden önce, son cihazda JoinEUI, DevEUI, AppKey ve NwkKey saklanmalıdır. AppKey ve NwkKey, kök anahtarlar olarak bilinen AES-128 bitlik

gizli anahtarlardır. Eşleşen AppKey, NwkKey ve DevEUI, birleştirme prosedürünün işlenmesine ve oturum anahtarı türetilmesine yardımcı olacak Birleştirme Sunucusunda sağlanmalıdır. JoinEUI ve DevEUI gizli değildir ve herkes tarafından görülebilir. AppKey ve NwkKey asla ağ üzerinden gönderilmez.

Aşağıdaki adımlar, Havadan Etkinleştirme (OTAA) prosedürünü açıklamaktadır.

**1.Adım**'da birleştirme prosedürü her zaman uç birim tarafından başlatılır. Uç birim, katılma talebi mesajını, birleştirilecek olan ağa gönderir. Katılma isteği mesajı aşağıdaki alanlardan oluşur.

|         |         |          |
|---------|---------|----------|
| 8 bytes | 8 bytes | 2 bytes  |
| JoinEUI | DevEUI  | DevNonce |

JoinEUI, IEEE EUI64 adres alanındaki katılma isteğinin işlenmesine ve oturum anahtarlarının türetilmesine yardımcı olabilecek, katılma sunucusunu benzersiz şekilde tanımlayan 64 bitlik bir genel uygulama tanımlayıcısıdır.

DevEUI, IEEE EUI64 adres alanındaki son cihazı benzersiz şekilde tanımlayan 64 bitlik bir küresel cihaz tanımlayıcısıdır.

DevNonce, 2 baytlık bir sayaç, cihaz ilk çalıştırıldığında 0'dan başlar ve her katılma isteğinde artar. DevNonce değeri, yeniden oynatma saldırılarını önlemek için kullanılır.

LoRaWAN 1.1'de AppEUI, JoinEUI ile değiştirilir. MIC, NwkKey kullanılarak Katılma isteği mesajındaki tüm alanlar üzerinden hesaplanır. Hesaplanan MIC daha sonra Katılma isteği mesajına eklenir. NwkKey, Katılma isteği mesajıyla gönderilmez ve Katılma isteği mesajı şifrelenmez, düz metin olarak gönderilir. Katılma isteği mesajı, herhangi bir veri hızı kullanılarak ve bölgeye özgü birleştirme kanallarından biri kullanılarak iletilebilir. Örneğin, Avrupa'da bir uç cihaz, 868.10 MHz, 868.30 MHz veya 868.50 MHz arasından rastgele seçim yaparak Katılım talebi mesajını iletir. Katılma isteği mesajı, Ağ Sunucusuna bir veya daha fazla ağ geçidi üzerinden gider. Katılma isteği kabul edilmezse son cihaza yanıt verilmez.

**2.Adım**'da Ağ Sunucusu, katılma isteği mesajına karşılık gelen katılma sunucusuna iletir.

**3.Adım**'da Katılım Sunucusu, katılma isteği mesajını işler. Son cihazın ağa katılmasına izin verilirse, katılım sunucusu tüm oturum anahtarlarını (AppSKey, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey) üretecektir.

**4.Adım**'da önceki adımların başarılı olması halinde Ağ Sunucusu, katıl-kabul et mesajını oluşturur. Katıl-kabul et mesajı aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır.

|           |        |         |            |         |         |
|-----------|--------|---------|------------|---------|---------|
| 1 byte    | 3 byte | 4 byte  | 1 byte     | 1 byte  | 16 byte |
| JoinNonce | NetID  | DevAddr | DLSettings | RXDelay | CFList  |

JoinNonce, Join Server tarafından sağlanan ve uç cihaz tarafından FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey ve AppSKey oturum anahtarlarını türetmek için kullanılan cihaza özgü bir sayaç değeridir.

NetID, 24 bitlik benzersiz bir ağ tanımlayıcısıdır.

DevAddr, mevcut ağ içindeki son cihazı tanımlamak için Ağ Sunucusu tarafından atanan 32 bitlik bir cihaz adresidir.

DLSettings, son cihazın kullanması gereken aşağı bağlantı ayarlarından oluşan 1 baytlık bir alandır.

RxDelay, TX ve RX arasındaki gecikmeyi içerir.

CFList – son cihazın katıldığı ağ için isteğe bağlı kanal frekansları listesidir. Bu frekanslar bölgesel sınırlamalara özgüdür.

Mesaj Bütünlük Kodu (The Message Integrity Code- MIC), NwkKey (LoRaWAN 1.0 cihazları için) veya JSIntKey (LoRaWAN 1.1 cihazları için) kullanılarak Join-accept mesajındaki tüm alanlar üzerinden hesaplanır. Hesaplanan MIC daha sonra Katıl-kabul mesajına eklenir.

Katıl-kabul et mesajının kendisi daha sonra NwkKey ile şifrelenir. Ağ Sunucusu, katıl-kabul mesajını şifrelemek için ECB modunda bir AES şifre çözme işlemi kullanır.

Katıl-kabul mesajı, NwkKey (Katılma isteği tarafından tetiklenirse) veya JSEncKey (Yeniden katılma isteği tarafından tetiklenirse) ile şifrelenir.

Ardından Ağ Sunucusu, şifrelenmiş Katıl-kabul mesajını normal bir aşağı bağlantı olarak son cihaza geri gönderir.

Katılma isteği mesajı Ağ Sunucusu tarafından kabul edilmezse uç cihaza yanıt verilmez.

**5.Adım**'da Katılım Sunucusu, AppSKey'i Uygulama Sunucusuna ve üç ağ oturumu anahtarını (FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey) Ağ Sunucusuna gönderir.

**6.Adım**'da Son cihaz, AES şifreleme işlemini kullanarak Katıl-kabul et mesajının şifresini çözer. Son cihaz, oturum anahtarları oluşturmak için AppKey, NwkKey ve JoinNonce'u kullanır.

LoRaWAN 1.0.x cihazları için, AppSKey, NwkKey'den türetilmiştir. FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey, NwkKey'den türetilmiştir.

LoRaWAN 1.1 cihazları için, AppSKey, AppKey'den türetilmiştir. FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey, NwkKey'den türetilmiştir.

Tüm bu aşamaların ardından uç cihaz artık ağ üzerinde etkinleştirilmiştir. Aktivasyondan sonra, uç cihazda DevAddr, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey, AppSKey bilgileri saklanmaktadır.

### **Kişiselleştirme Yoluyla Aktivasyon (Activation By Personalization / ABP)**

ABP aktivasyonunda, önceden seçilmiş bir ağ için sabit bir DevAddr ve oturum anahtarları uç cihaza sabit olarak kodlanır ve bir ABP uç cihazının kullanım ömrü boyunca aynı kalır. ABP, OTAA'dan daha az güvenlidir ve ayrıca cihazların, cihazdaki anahtarları manuel olarak değiştirmeden ağ sağlayıcılarını değiştirememesi dezavantajına sahiptir. Bir ağ veya küme, o ağa/kümeye atanmış olanlardan farklı DevAddr değerlerine sahip uç cihazların kaydedilmesine izin verse bile, Paket Aracısı bu uç cihazlardan gelen trafiği doğru ağa/kümeye yönlendirmeyecektir. Ayrıca, ağa/kümeye ek adres blokları atansa bile, Ağ Sunucusu DevAddr tahsisinin optimizasyonunu gerçekleştiremeyecektir, dolayısıyla ABP uç cihazları için cihaz eşleştirme prosedürü iyileştirilmeyecektir. ABP cihazlarıyla ilişkili çerçeve sayaçları kullanım ömürleri boyunca sıfırlanmamalıdır, aksi takdirde bu uç cihazlardan gelen mesajlar düşebilir. Bir ABP uç aygıtının çerçeve sayaçları bittiğinde, kullanım ömrü sona ermektedir. Oturum anahtarlarının sabit kodlanması, sızıntı olması durumunda bile döndürülemez vaziyette olmasını ve bu anlamda güvenlik açığına sebep olmaktadır.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında LoRaWAN tabanlı ağ geçitleri (gateway) ve sensör uygulamalarında performans analizleri sağlanmıştır. Farklı markalarla oluşturulan simülasyon düzeneklerinde, çeşitli senaryolar gerçekleştirilerek LoRAWAN kablosuz sistemlerin nesne tabanlı internet kapsamının genişliği gözlemlenerek, günlük yaşıntıdaki kullanım alanları incelenmiştir.

#### 3.1 Materyal

Test ortamındaki IoT ağ ekosistemini oluşturan sistem unsurlarından olan gateway (ağ geçiti) ve end-node (uç birim) sensörleri detaylı olarak incelenmiştir. Test aşamalarında kullanılan farklı marka ve modellere ait temel özellik kıyaslaması Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

**Tablo 3.1** Ağ geçitleri temel özellik karşılaştırması

| Özellikler                 | LPS8 Gateway                   | LG308 Gateway                  | RAK7268 Gateway                    |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| İletişim Protokolü         | LoRa/LoRaWAN                   | LoRa/LoRaWAN                   | LoRa/LoRaWAN                       |
| Frekans Bantları           | 433MHz, 470MHz, 868MHz, 915MHz | 433MHz, 470MHz, 868MHz, 915MHz | 433MHz, 470MHz, 868MHz, 915MHz     |
| Maksimum Çıkış Gücü        | 25dBm                          | 27dBm                          | 27dBm                              |
| Maksimum Alıcı Hassasiyeti | -139dBm                        | -139dBm                        | -139dBm                            |
| Anten Bağlantısı           | SMA dişi                       | SMA dişi                       | SMA dişi                           |
| Desteklenen Arayüzler      | Ethernet, Wi-Fi, USB           | Ethernet, Wi-Fi, USB, RS485    | Ethernet, Wi-Fi, USB, RS485, RS232 |
| Güç Kaynağı                | 12V DC güç adaptörü            | 12V DC güç adaptörü veya PoE   | 12V DC güç adaptörü veya PoE       |

Testlerde kullanılan ağ geçitlerinin olumlu ve olumsuz kıyaslaması Tablo 3.2’de görülmektedir.

**Tablo 3.2** Ağ geçitleri olumlu ve olumsuz yönlerinin karşılaştırılması

| Özellikler     | LPS8 Gateway                                                | LG308 Gateway                                        | RAK7268 Gateway                                         |
|----------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Olumlu Yönler  | Kompakt tasarım ve taşınabilirlik.                          | Geniş arayüz seçenekleri (RS485 desteği gibi).       | Geniş arayüz seçenekleri (RS485 ve RS232 desteği gibi). |
|                | Düşük güç tüketimi ve enerji verimliliği.                   | Yüksek çıkış gücü.                                   | Yüksek çıkış gücü.                                      |
|                | Çoklu frekans bantı desteği.                                | PoE desteği (LG308).                                 | PoE desteği (RAK7268).                                  |
|                | Basit kurulum ve kullanım.                                  | Güç adaptörü ve PoE seçeneği.                        | Güç adaptörü ve PoE seçeneği.                           |
| Olumsuz Yönler | Sınırlı arayüz seçenekleri (sadece Ethernet, Wi-Fi ve USB). | Daha yüksek maliyet (diğer modellere göre).          | Daha yüksek maliyet (diğer modellere göre).             |
|                | Daha düşük çıkış gücü (diğer modellere göre).               | Daha düşük alıcı hassasiyeti (diğer modellere göre). | Daha düşük alıcı hassasiyeti (diğer modellere göre).    |
|                | Daha az desteklenen arayüz (RS485 ve RS232 yok).            | Daha büyük fiziksel boyutlar.                        | Daha büyük fiziksel boyutlar.                           |

### 3.1.1 LPS8 Ağ Geçidi

Dragino markasının LPS8 modeli, açık kaynaklı (open-source) OpenWrt sistemi destekleyen LoRaWAN iç mekan (indoor) ağ geçididir. LoRa kablosuz ağını, WiFi veya Ethernet üzerinden bir IP ağına köprülemeyi sağlamaktadır. LPS8, semtech paket iletici (packet forwarder) kullanır ve LoRaWAN protokolüyle tamamen uyumludur. 10 programlanabilir paralel demodülasyon yolu sağlayan bir SX1308 LoRa yoğunlaştırıcı ve 2 adet 1257 LoRa Alıcı Verici içerir. Temel özellikleri aşağıda listelenmiştir. 2.4G Wi-Fi (802.11 bgn) desteği ve 10M/100M RJ45 bağlantı noktasına sahiptir. USB ve Mini-PCle Interface çıkışları mevcuttur. [25]



**Fotoğraf 3.1** LPS8 iç mekan ağ geçidi

### 3.1.2 LG308 Ağ Geçidi

Dragino markasının LG308 modeli, açık kaynaklı (open-source) OpenWrt sistemi destekleyen LoRaWAN iç mekan (indoor) ağ geçididir. LoRa kablosuz ağını, WiFi, Ethernet ya da opsiyonel olarak hücresel LTE (3G/4G) üzerinden bir IP ağına köprülemeyi sağlamaktadır. LG308 modeli semtech paket iletici (packet forwarder) kullanır ve LoRaWAN protokolüyle tamamen uyumludur. 10 programlanabilir paralel demodülasyon yolu sağlayan SX1301 LoRa yoğunlaştırıcı + 2 x SX1257 çip içerir. 2.4G Wi-Fi (802.11 bgn) desteği ve 10M/100M RJ45 bağlantı noktasına sahiptir. USB ve Mini-PCIE Interface çıkışları mevcuttur. [26]



**Fotoğraf 3.2** LG308 iç mekan ağ geçidi

### 3.1.3 RAK7268 Ağ Geçidi

RAKwireless markasının RAK7268 WisGate Edge Lite 2 modeli LoRaWAN protokolüne dayalı 8 kanallı bir iç mekan ağ geçididir. Basit bir kurulum için yerleşik Ethernet bağlantısına sahiptir, yine ek olarak varsayılan Wi-Fi AP modu aracılığıyla kolayca yapılandırılmasını sağlayan yerleşik bir Wi-Fi kurulumu (2,4 GHz Wi-Fi'yi destekler) vardır. Ayrıca, ağ geçidi LTE yukarı bağlantı (uplink-UL) iletişim bağlantılarını (isteğe bağlı) destekler. TLS kimlik doğrulama seçeneğiyle birlikte MQTT Köprü modunu da destekler. Bu ağ geçidi cihazının yönetimi ve konfigürasyonu için açık kaynaklı yazılım, OpenWRT'ye dayalıdır. Yerleşik bir LoRa paket ileticisine ve grafiksel bir kullanıcı arabirimine sahiptir. Semtech SX1302 ile tam LoRaWAN Stack desteği (V 1.0.3) içeren modelde; PoE ile 100M Base-T Ethernet, Wi-Fi, Hücresel ile çoklu geri taşıma ve LTE Cat 4 ağı (isteğe bağlı) desteği bulunmaktadır. [27]



**Fotoğraf 3.3** RAK7268 iç mekan ağ geçidi

Test senaryosu oluşturulurken kullanılan sensörlerin olumlu ve olumsuz yönlerini görebileceğimiz kıyaslama tablosu, Tablo 3.3'te belirtilmiştir. İlgili tabloda sensörlerde öne çıkan avantaj ve dezavantajları nitelendirmektedir. Bu tablo, her sensör modelinin belirli avantajları ve dezavantajları olduğunu göstermektedir. Ölçüm aralığı, kablosuz iletim mesafesi, pil ömrü, veri aktarım hızı, ölçüm hassasiyeti, bağlantı protokolleri ve ek özellikler gibi faktörler, hangi sensörün ihtiyaca ve kullanıma uygun olacağını belirlerken karşımıza çıkan değişkenlerdendir.

**Tablo 3.3** LoRaWAN Sensörlerinin olumlu ve olumsuz yönlerinin karşılaştırması

| Sensör Modeli | Olumlu Yönler                   | Olumsuz Yönler                   |
|---------------|---------------------------------|----------------------------------|
| LT-22222-L    | Yüksek hassasiyetli ölçüm       | Yüksek maliyet                   |
| LHT65         | Uzun pil ömrü                   | Sınırlı kablosuz iletim mesafesi |
| LWL02         | Uzun menzilli kablosuz iletişim | Düşük veri aktarım hızı          |
| LDS02         | Kompakt tasarım                 | Sınırlı ölçüm aralığı            |
| LDDS75        | Dayanıklı yapı                  | Düşük çözünürlüklü veri toplama  |
| LSN50v2-D20   | Geniş sıcaklık aralığı          | Sınırlı bağlantı protokolleri    |
| LSE01         | Basit kurulum ve kullanım       | Sınırlı veri toplama yetenekleri |
| LGT92         | GPS ve hareket algılama         | Düşük batarya ömrü               |

#### 3.1.4 LT-22222-L I/O Denetleyici Sensör

Dragino LT serisi Input (giriş) / Output (çıkış) uç birimleri, Analog akım Girişi, analog voltaj girişi, röle çıkışı, dijital giriş ve dijital çıkış gibi farklı I/O arayüzlerine sahiptir. Temel özellikleri aşağıda listelenmiştir. [28]

- 2 x Digital Input (bi-direction)
- 2 x Digital Output
- 2 x Relay Output (5A@250VAC / 30VDC)
- 2 x 0~20mA Analog Input (res:0.01mA)
- 2 x 0~30V Analog Input (res:0.01v)
- Power Input 0~24V



**Fotoğraf 3.4** LT-22222-L I/O control sensörü

### 3.1.5 LHT65 Sıcaklık ve Nem Sensörü

Dragino LHT65 Sıcaklık ve Nem sensörü, dahili bir SHT20 Sıcaklık ve Nem sensörü içerir ve toprak nem, eğim sensörü gibi sensörlere bağlanmak için harici bir sensör konektörüne sahiptir. LHT65, LoRaWAN v1.0.4 protokolü ile tam uyumludur, standart LoRaWAN ağ geçidi ile çalışabilir. LoRaWAN A Sınıfı protokolüyle çalışma sağlayan modelde, LoRaWAN Downlink aracılığıyla parametreleri uzaktan yapılandırma desteği mevcuttur. Zaman damgalı 3200 set sensör kaydı bulunmaktadır. [29]



**Fotoğraf 3.5** LHT65 sıcaklık ve nem sensörü

### 3.1.6 LWL02 Su Sızıntısı Tespit Sensörü

Dragino LWL02, su sızdırmazlık sensörüdür. İki metal prob arasında su olduğunda, LWL02 bir su sızıntısı olayını ve LoRaWAN ağı üzerinden IoT sunucusuna yukarı bağlantıyı belirtir. LWL02, 2 x AAA pil ile çalışır ve uzun süreli kullanım için hedeflenir, bu iki pil yaklaşık 16.000 ~ 70.000 uplink paketi sağlayabilir, bu da 2 ~ 10 yıl pil ömrü sağlar. LWL02, her su sızıntısı olayının yanı sıra her gün periyodik olarak veri göndermekte, ayrıca su kaçağı süreleri baz alarak son su kaçağı süresini hesaplar. Kullanıcı ayrıca her su sızıntısı olayı için yukarı bağlantıyı devre dışı bırakabilir, bunun yerine cihaz her olayı ve yukarı bağlantıyı periyodik olarak sayabilir. [30]



**Fotoğraf 3.6** LWL02 su sızıntı tespit sensörü

### **3.1.7 LDS02 Kapı Sensörü**

Dragino LDS02 LoRaWAN Kapı Sensörüdür. LoRaWAN ağı aracılığıyla kapı açık/kapalı durumunu, IoT Server analizini, açık zamanı, açık sayıları görebilir. SX1262 LoRa Çekirdeğine sahip ve LoRaWAN v1.0.3 A Sınıfında çalışmaktadır. Periyodik olarak yukarı bağlantı (UL) ve açık/kapalı eylem ve açık süre alarmını desteklemektedir. [31]



**Fotoğraf 3.7** LDS02 kapı sensörü

### 3.1.8 LDDS75 Mesafe Algılama Sensörü

LoRaWAN Dragino LDDS75, Nesnelerin İnterneti çözümü için bir LoRaWAN Mesafe Algılama Sensörüdür. Sensör ile düz bir nesne arasındaki mesafeyi ölçmek için kullanılır. Mesafe algılama sensörü, mesafe ölçümü için ultrasonik algılama teknolojisini kullanan bir modüldür ve verilerin güvenilirliğini artırmak için sıcaklık dengelemesi dahili olarak gerçekleştirilir.

LDDS75, yatay mesafe ölçümü, sıvı seviyesi ölçümü, park yönetim sistemi, nesne yakınlığı ve varlığı algılama, akıllı çöp tenekesi yönetim sistemi, robot engellerden kaçınma, otomatik kontrol, kanalizasyon, dip su seviyesi izleme vb. senaryolara uygulanabilir. Ölçülen nesne ile sensör arasındaki mesafeyi algılar ve değeri kablosuz olarak LoRaWAN IoT Sunucusuna yükler.

Ultrasonik teknoloji ile mesafe tespiti sağlamakta olup, düz nesne 280mm-7500mm aralığına ve 40° ölçü açısına sahiptir. [32]



**Fotoğraf 3.8** LDDS75 mesafe algılama sensörü

### 3.1.9 LSN50v2-D20 Dış Ortam Sıcaklık Sensörü

Dragino LSN50v2-D20, Nesnelerin İnterneti çözümü için bir LoRaWAN Sıcaklık Sensörüdür. Hava, sıvı veya nesnenin sıcaklığını ölçmek ve ardından LoRaWAN kablosuz protokolü aracılığıyla IoT sunucusuna yüklemek için kullanılabilir. LSN50v2-D20'de kullanılan sıcaklık sensörü, -55°C ~ 125°C'yi

$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  (maks  $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ ) doğrulukla ölçebilir. Sensör kablosu Silika Jel ile yapılmıştır ve metal prob ile kablo arasındaki bağlantı, uzun süreli kullanım için su geçirmez, nem geçirmez ve paslanmaya karşı çift sıkıştırılmıştır. LSN50v2-D20, sıcaklık alarmı özelliğini destekler, kullanıcı anlık bildirim için sıcaklık alarmı ayarlayabilir. [33]



**Fotoğraf 3.9** LSN50v2-D20 dış ortam sıcaklık sensörü

### 3.1.10 LSE01 Toprak Nemi ve EC Sensörü

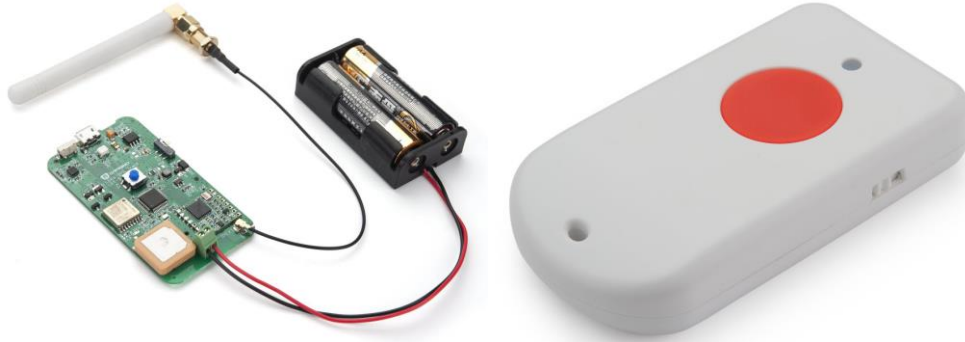
Dragino LSE01, Tarımın IoT'si için bir LoRaWAN Toprak Nemi ve EC Sensörüdür. Toprak Nemini, Toprak Sıcaklığını ve Toprak İletkenliğini algılar ve değeri kablosuz olarak LoRaWAN IoT Server'a yükler. Tuzlu-alkali toprak ve tınlı toprağın toprak nemini ölçmek için tasarlanmıştır. Toprak sensörü, toprak nemini toprak sıcaklığı ve iletkenliği ile telafi ederek hesaplamak için FDR yöntemini kullanır. Ayrıca Mineral toprak tipi için fabrikada kalibre edilmiştir. [34]



**Fotoğraf 3.10** LSE01 toprak nemi ve EC sensörü

### 3.1.11 LGT92 GPS İzleyici Sensörü

LoRaWAN Dragino LoRaWAN GPS İzleyici LGT-92, Ultra Düşük Güç STM32L072 MCU ve SX1276/1278 LoRa Modülü üzerinde açık kaynaklı bir GPS izleyici tabanıdır. LGT-92, hareket ve tutum tespiti için düşük güçlü bir GPS modülü L76-L ve 9 eksenli ivmeölçer içerir. Farklı uygulamalar için en iyi enerji profilini elde etmek için hem GPS modülünün hem de ivme ölçerin gücü MCU tarafından kontrol edilebilir. [35]



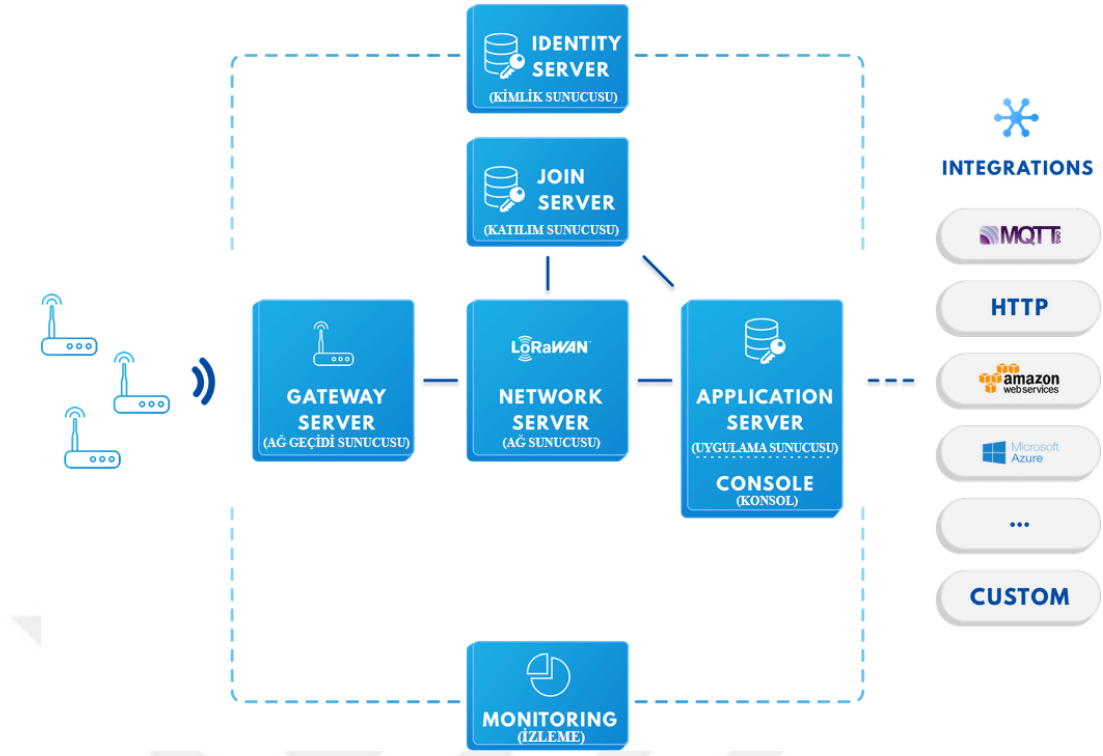
**Fotoğraf 3.11** LGT92 GPS takip sensörü açık (a) ve kapalı hali (b)

## 3.2 Yöntem

Bu tez çalışmasında LoRaWAN sistemlerini daha detaylı analiz edebilmek adına, çeşitli sensör ve ağ geçitleri aracılığıyla deneysel düzenekler kurulmuştur. Saha testlerindeki olası farklı senaryolar gerçekleştirilerek, sonuçlar online server arayüzünde okunmuş, bulguları açıklamalarıyla birlikte gösterilmiştir.

### 3.2.1 Nesnelerin Ağ Sunucusu (TTN)

Nesnelerin Ağ Sunucusu (The Things Network), LoRaWAN kullanarak ağlar, cihazlar ve çözümler oluşturan küresel bir iş birliğine dayalı Nesnelerin İnterneti ekosistemidir. Things Network, kitle kaynaklı, açık ve merkezi olmayan bir LoRaWAN ağı olan The Things Stack Community Edition'ı çalıştırır. Açık kaynak yığını, ağ geçitleri, uygulamalar, cihazlar ve kullanıcılar için yönetime sahip tam özellikli bir LoRaWAN ağ sunucusudur. Açık API'ler, yığını bulutta veya şirket içinde dağıtılan çözümlere sorunsuz bir şekilde entegre etmek için kullanılabilir. Gelişmiş uçtan uca güvenlik özellikleri, havadan ürün yazılımı (FOTA) güncellemeleri için destek ve gelişmiş kümeleme ve yük dengeleme teknolojisi, yığını yüksek düzeyde ölçeklenebilir ve ISO güvenlik sertifikası uygunluklarını takiben coğrafi olarak dağıtılmış şekilde çalıştırmanıza olanak tanır. LoRaWAN hem ağ hem de uygulama düzeyinde şifreleme, bütünlük ve kimlik doğrulama kullanarak tasarım gereği güvenlidir. Things Network Stack V3, LoRaWAN anahtarlarını güvenli bir şekilde depolayan ve Ağ Sunucusu ile Uygulama Sunucusuna oturum anahtarları veren Birleştirme Sunucularını kullanır. Bu, güvenli depolamayı paket yönlendirmeden ayırarak, kullanıcıların güvenlik anahtarları üzerinde tam kontrol sahibi olmak için şirket içinde Birleştirme Sunucularını barındırmasına ve donanım güvenli modülleri (HSM'ler) kullanmasına olanak tanır. Things Network Stack V3, taşıyıcı sınıfı, ticari olarak işletilen ve küresel olarak dağıtılan bir genel ağa tek bir ağ geçidi özel ağı olarak dağıtılmak üzere tasarlanmıştır. Mikro hizmetler mimarisi, yüksek düzeyde ölçeklenebilir ve yüksek düzeyde kullanılabilir küresel LoRaWAN ağları oluşturmak için özel hizmetlerin örneklerinin çoğaltılmasına ve hizmetlerin kümeler halinde dağıtılmasına olanak tanır. [36]



Şekil 3.1 TTN Ağ Yığını

### 3.2.2 Test Ortamı

LoRaWAN düzeneklerinde hem sensörlerin hem de ağ geçitlerinin konumları sabitlenmiştir. Deneyler RF yoğunluğunun değişken seviyede olduğu şehir içinde yer alan iş yerinde gerçekleştirilmiştir. Dış mekan testleri Ankara/Çankaya ilçesine bağlı Mustafa Kemal Mahallesi'nde gerçekleştirilmiştir. Her test farklı bir saha ortamı canlandırmak için çeşitli senaryolarda tamamlanmıştır.

Saha koşulları iç mekan su geçirmezlik ve ısı standartlarına uygun olmasından ötürü, indoor gatewayler (iç mekan ağ geçitleri) tercih edilmiştir. Kurulan test düzeneklerinde seçilen sensörlerin farklı ağ geçitleriyle iletişim kurarak performans analizleri sağlanmıştır.

İlk ağ geçidi olarak SX1308 chipsete sahip LPS8 modeli tercih edilmiştir. Fotoğraf 3.12'de görüldüğü üzere RJ45 (ethernet), power (güç) ve LoRa-868 Mhz anten takılarak kurulum gerçekleştirilmiştir. Wifi ağ kurulumu için Fotoğraf 3.13'te belirtildiği üzere WiFi taramasında görünen cihaza şifre girilerek (cihaz şifresi: dragino+dragino) bağlantı sağlanmıştır.



**Fotoğraf 3.12** LPS8 Ağ Geçidi test düzeneği

WiFi ağ kurulumu için Şekil 3.2’de belirtildiği üzere WiFi taramasında görünen cihaza şifre girilerek (cihaz şifresi: dragino+dragino) bağlantı sağlanmıştır.



**Şekil 3.2** LPS8 WiFi bağlantısı

Bağlantı sonrası web tarayıcısından 10.130.1.1 IP değeri girilerek Şekil 3.3’te belirtilen aşamalar sürdürülmüş ve cihazın internet arayüzüne erişim sağlanmıştır.

**Şekil 3.3** LPS8 web kullanıcı arayüzü giriş sayfası

Ağ geçidinin bağlantı durumlarına, LoRaWAN konfigürasyonlarına, MQTT, TCP, Log (Hata) vb. kayıtlara ulaşım sağlayabileceğimiz server arayüzüne erişim gerçekleştirilmiştir. Server arayüzünün ana sayfası Şekil 3.4’te belirtilmiştir.



Şekil 3.4 LPS8 server arayüzü

İkinci ağ geçidi olarak aynı markanın SX1301 chipsetine sahip LG308 modeli tercih edilmiştir.



Fotoğraf 3.13 LG308 ağ geçidi test düzeneği

Benzer kurulum aşamaları gerçekleştirilerek Fotoğraf 3.5'te görüleceği üzere server arayüzüne bağlantı sağlanmış olup, temel konfigürasyon değerleri TTN servera uygun olacak şekilde ayarlanmıştır.



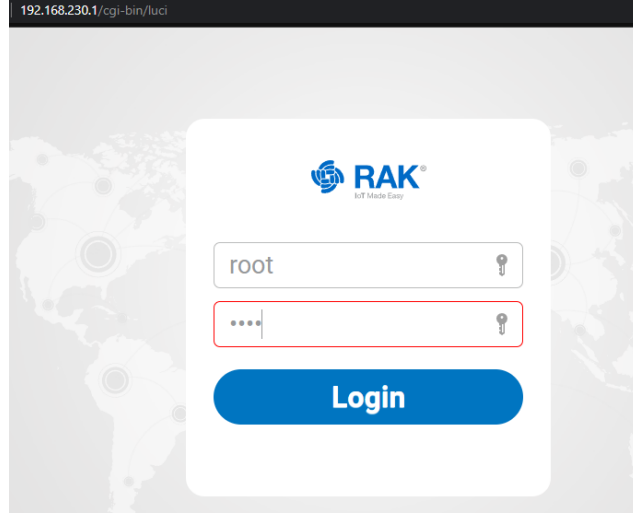
**Şekil 3.5** LG308 server arayüzü

Üçüncü ağ geçidi olarak hem farklı bir chipset hem de alternatif marka performansını incelemek adına, Semtech SX1302 serisinde chipe sahip RAK7268 modeli tercih edilmiştir.



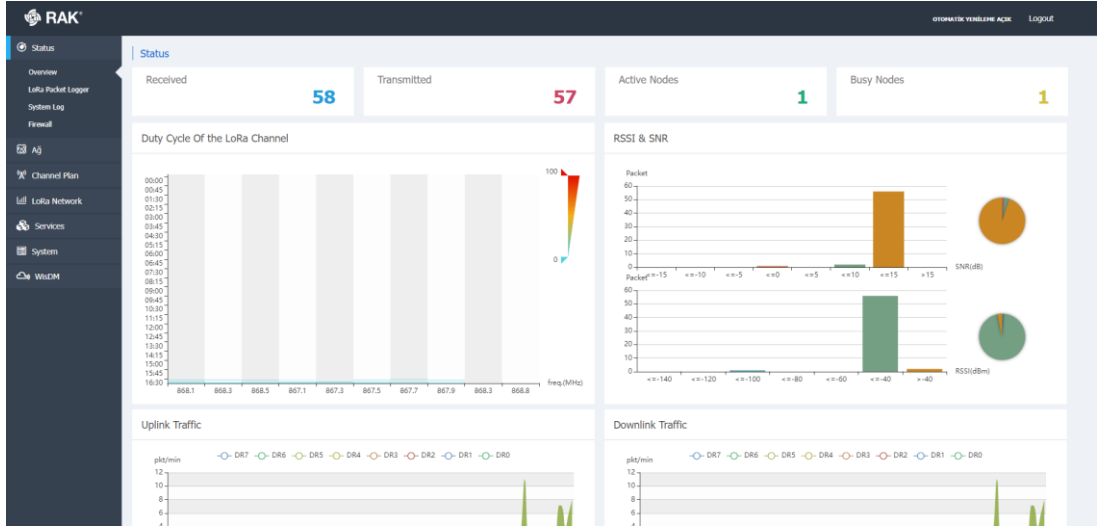
**Fotoğraf 3.14** RAK7268 ağ geçidi test düzeneği

Cihaza WAN portu (ethernet) aracılığıyla bağlanmak için RJ45 kablosu takılmıştır. Şekil 3.6'da görüleceği üzere web arayüzüne giriş yapılmıştır.

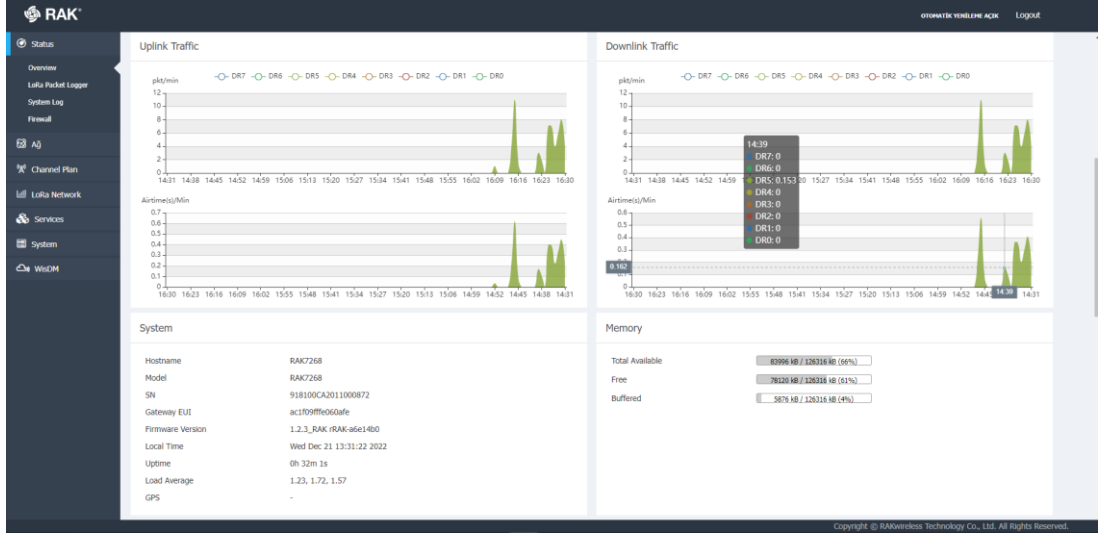


Şekil 3.6 RAK7268 web kullanıcı arayüzü giriş sayfası

Ağ geçidinin arayüzüne giriş yapıldıktan sonra firmanın kendi geliştirmiş olduğu server interface (arayüz) sayesinde TTN server harici görüntüleme ve izleme de yapılmaktadır. Ağ geçidine ulaşan ve gönderilen veri miktarları, cihaza bağlı end-node (uç birim) sayısı, RSSI ve SNR değerleri vb. ulaşılabilen arayüz içeriği Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Yine yukarı bağlantı (UL), aşağı bağlantı (DL), sistem bilgileri ve hafıza detayları Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.7 RAK ağ geçidi kullanıcı arayüzü



Şekil 3.8 RAK gateway ağ trafiği

Markaların kendi server arayüzlerinin yanı sıra veri akışını tek merkezde toplayabildiğimiz TTN arayüzünde test aşamasına geçilmiştir.

Öncelikle Şekil 3.9’da görüldüğü üzere tüm ağ geçitlerine üretimleri esnasında tanımlanmış EUI değerleri (extended unique identifier) girilerek kaydedilmiştir.

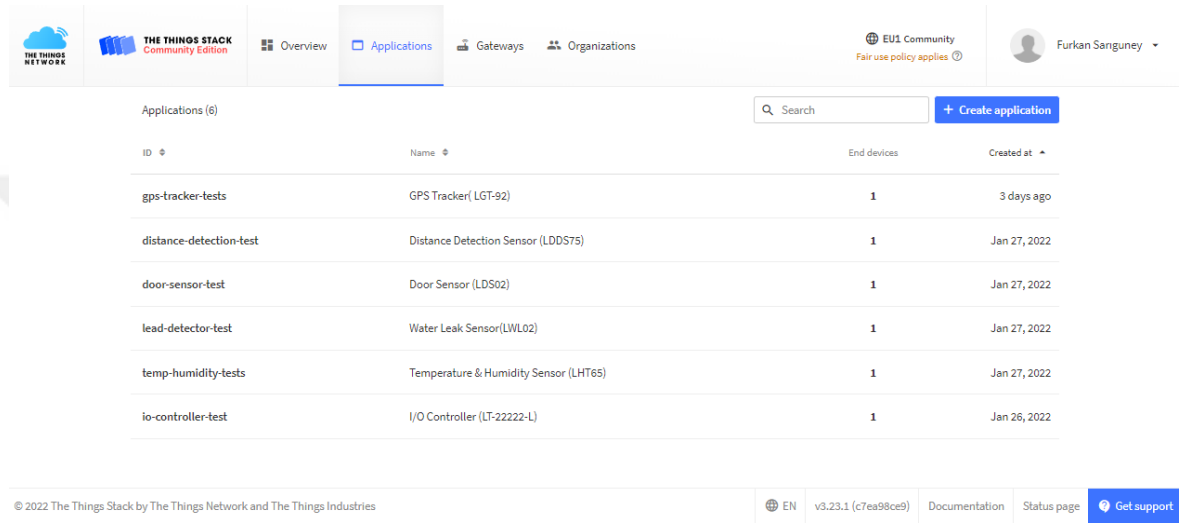
The screenshot shows the TTN Gateway Management interface. The top navigation bar includes 'Overview', 'Applications', 'Gateways', and 'Organizations'. The 'Gateways' section is active, showing a list of gateways. The table has columns for ID, Name, Gateway EUI, Status, and Created at. There are three gateways listed: 'eui-ac1f09fffe060afe' (RAK7268 Gateway), 'eui-a84041211f84150-gw' (LG308 Gateway), and 'lps8-gw-mfs' (LPS8 Gateway). All gateways are marked as 'Disconnected'.

| ID                     | Name            | Gateway EUI             | Status       | Created at   |
|------------------------|-----------------|-------------------------|--------------|--------------|
| eui-ac1f09fffe060afe   | RAK7268 Gateway | AC 1F 09 FF FE 06 0A FE | Disconnected | 19 hours ago |
| eui-a84041211f84150-gw | LG308 Gateway   | A8 40 41 21 1F F8 41 50 | Disconnected | 3 days ago   |
| lps8-gw-mfs            | LPS8 Gateway    | A8 40 41 1F A6 C4 41 50 | Disconnected | Jan 26, 2022 |

Şekil 3.9 TTN ağ geçitleri

Kayıtlı ağ geçitleri, tarama alanında yer alan uç birim ve sensörler tarafından gelen yukarı bağlantı (UL) veri paketlerini almaya hazır vaziyete gelmiştir. Ağ geçitlerine veri gönderecek sensörleri de benzer bir protokolle ağ sistemine

kaydetmek gerekmektedir. Uç birim ya da sensörlerin kaydı esnasında manuel ya da LoRaWAN ekosistemine kayıtlı marka ve modeller aracılığıyla hızlı kayıt gerçekleştirilebilir. Kayıt aşamasında cihazların donanım, yazılım versiyonları ve çalışması istenilen bölgesel frekans sınırlaması belirtilir. İlk tanımlamaların ardından cihaz ile gelen 64 bitlik eşsiz KeyID (Join EUI, DevEUI, AppKey vb.) değerleri sisteme girilerek TTN server ile entegrasyon sağlanır. TTN serverda gerçekleştirilen testlerin yer aldığı uç birim tablosu Şekil 3.10’da listelenmiştir.



The screenshot shows the TTN Applications page. At the top, there is a navigation bar with the TTN logo, 'THE THINGS STACK Community Edition', and tabs for Overview, Applications (selected), Gateways, and Organizations. On the right, there is a user profile for 'Furkan Sanguney' and a 'EU1 Community' badge. Below the navigation bar, there is a search bar and a '+ Create application' button. The main content area displays a table of applications with the following data:

| ID                      | Name                                  | End devices | Created at   |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------|
| gps-tracker-tests       | GPS Tracker( LGT-92)                  | 1           | 3 days ago   |
| distance-detection-test | Distance Detection Sensor (LDS75)     | 1           | Jan 27, 2022 |
| door-sensor-test        | Door Sensor (LDS02)                   | 1           | Jan 27, 2022 |
| lead-detector-test      | Water Leak Sensor(LWL02)              | 1           | Jan 27, 2022 |
| temp-humidity-tests     | Temperature & Humidity Sensor (LHT65) | 1           | Jan 27, 2022 |
| io-controller-test      | I/O Controller (LT-22222-L)           | 1           | Jan 26, 2022 |

At the bottom of the page, there is a footer with copyright information: '© 2022 The Things Stack by The Things Network and The Things Industries'. On the right, there are links for 'EN', 'v3.23.1 (c7ea98ce9)', 'Documentation', 'Status page', and 'Get support'.

**Şekil 3.10** TTN sensör ve uç birimleri

## 4. BULGULAR

LoRaWAN sensörler ve ağ geçidi uygulamalarında çeşitli lokasyonlara kurulumlar gerçekleştirilmiştir. Kurulan deneysel ve saha ortamlarından alınan sensör verileri, ağ geçitleri aracılığıyla ağ sunucusuna aktarılmıştır. TTN platformu üzerinden yukarı bağlantı (UL) değerleri analiz edilerek SNR, kanal genişliği, kanal indeksi, sinyal değerleri ve zaman parametleri incelenerek detaylı analizi ve karşılaştırması gerçekleştirilmiştir.

### 4.1 I/O Denetleyici Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LT serisi ile analog akım girişi, analog voltaj girişi, röle çıkışı, dijital giriş ve dijital çıkış gibi farklı Input(giriş)/Output(çıkış) arayüzlerinin izlemesini sağlamaktadır. Cihazın Fotoğraf 4.1’de görüleceği üzere bağlantıları gerçekleştirilerek, TTN servera veri aktratırımına hazır hale getirilmiştir.



Fotoğraf 4.1 I/O denetleyici sensör

I/O denetleyicisi Şekil 4.1’de belirtilen şema uyarınca TTN ağına kayıtlı bir ağ geçidi aracılığıyla veri aktarımı sağlamaktadır.



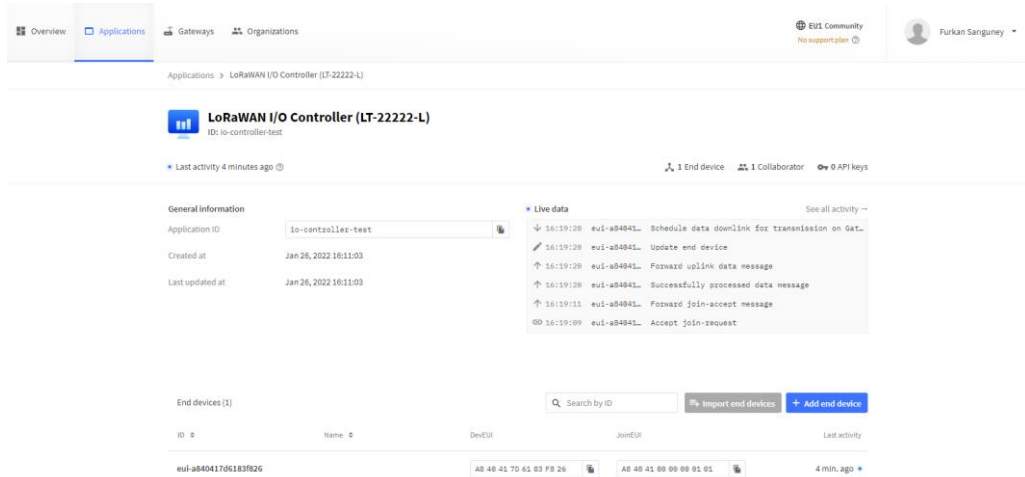
Şekil 4.1 I/O denetleyici ağ şeması

I/O denetleyicisine tanımlı olarak gelen OTAA anahtarlarıyla TTN'de bir cihaz kaydı oluşturulmuştur. Her uç birim sensörü Fotoğraf 4.2'deki gibi cihaz EUI'sine sahip bir çıkartmayla birlikte gönderilir.



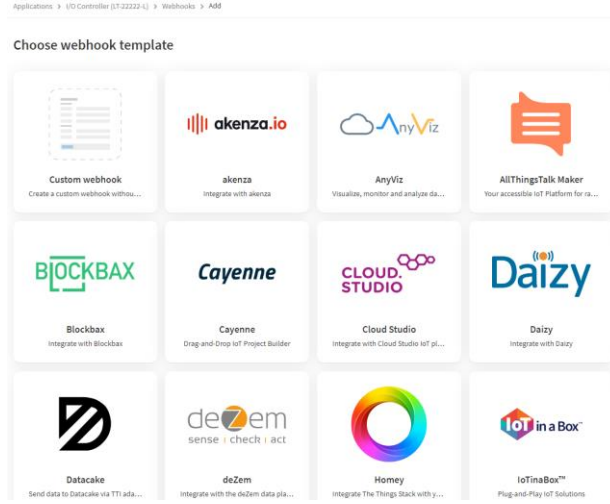
**Fotoğraf 4.2** OTAA anahtar çıkarması

I/O denetleyicisi Şekil 4.2'de görüleceği üzere TTN uygulamasına cihaz anahtarlarıyla kaydedilmiştir ve artık sensör verileri anlık olarak aktarılmaktadır. Mevcut sensöre bağlantı sağlanacak herhangi bir role ya da voltaj, akım vb. değerler online olarak izlenmektedir.



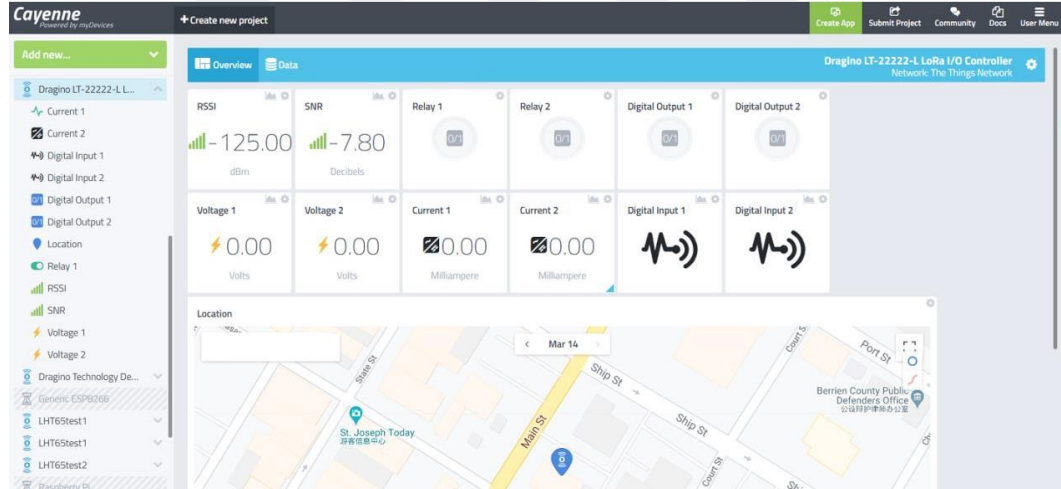
**Şekil 4.2** I/O denetleyicisi TTN arayüzü

Ulaşılan analog veya dijital veriler Şekil 4.3'te belirtilen çeşitli dashboard (gösterge paneli) seçenekleriyle görüntülemeye imkan sağlamaktadır. LT-2222-L giriş/çıkış denetleyicisi ile geliştirilmiş bir arayüz Şekil 4.4'te belirtilmiştir.



Şekil 4.3 TTN kontrol panelleri

LT-22222-L giriş/çıkış denetleyicisi ile geliştirilmiş bir arayüz Şekil 4.4'te belirtilmiştir.



Şekil 4.4 I/O denetleyicisi kontrol paneli (Cayenne)

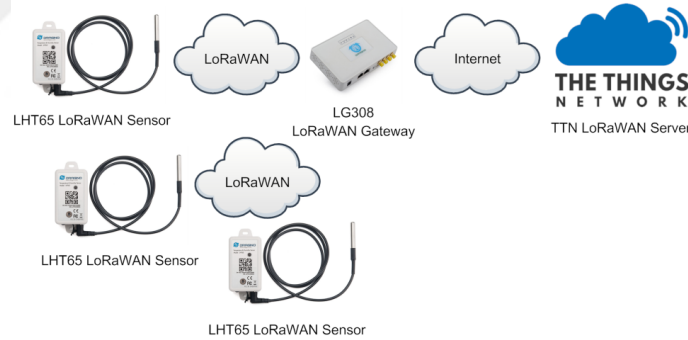
## 4.2 Sıcaklık ve Nem Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LHT65 serisi ile sıcaklık ve nem değerleri ölçülmektedir. Cihazın Fotoğraf 4.3'te görüleceği üzere bağlantıları gerçekleştirilerek, TTN servera veri aktratırımına hazır hale getirilmiştir.



**Fotoğraf 4.3** Sıcaklık ve nem sensörü

Sıcaklık ve nem sensörü Şekil 4.5'teki diyagram ağında görüleceği gibi, TTN servera kayıtlı bir ağ geçidi aracılığıyla veri aktarımı sağlamaktadır.



**Şekil 4.5** Sıcaklık ve nem sensörü ağ diyagramı

Sıcaklık ve nem sensörünün üretimi esnasında tanımlanmış OTAA anahtarları girilerek TTN'de uygulama kaydı oluşturulmuştur. Kayıt esnasında Şekil 4.6'da görüleceği üzere AppEUI, DevEUI, AppKey ve cihaz tanımlamaları eklenerek uç birim aktif edilmiştir.

From The LoRaWAN Device Repository [Manually](#)

### 1. Select the end device

Brand <sup>\*</sup>  Model <sup>\*</sup>  Hardware Ver. <sup>\*</sup>  Firmware Ver. <sup>\*</sup>  Profile (Region) <sup>\*</sup>



**LHT65**  
MAC V1.0.3, PHY V1.0.3 REV A, Over the air activation (OTAA), Class A  
LoRaWAN Temperature & Humidity sensor  
[Product website](#) [Data sheet](#)

### 2. Enter registration data

Frequency plan <sup>\*</sup>

AppEUI <sup>\*</sup>  [Fill with zeros](#)

DevEUI <sup>\*</sup>  [Generate](#) 0/50 used

AppKey <sup>\*</sup>  [Generate](#)

End device ID <sup>\*</sup>   
This value is automatically prefilled using the DevEUI

After registration

- [View registered end device](#)

**Şekil 4.6** Sıcaklık ve nem sensörü TTN aktivasyonu

Sensör bağlantısının ve kaydının ardından testler Şekil 4.7’de görüldüğü gibi sürdürülmüştür. Yukarı bağlantı (UL) yükü toplam 11 baytlık veri içerir. UL paketleri PORT=2’i kullanır ve varsayılan olarak her 20 dakikada bi UL bağlantı göndererek iletişimi sürdürür. Her UL bağlantısından sonra cihaz donanımı mavi ledi bir kez yanıp söndürerek bildirim sağlamaktadır.

Applications > LoRaWAN Temperature & Humidity Sensor (LHT65) > End devices > eui-a8404175a1841fd2 > Live data

**eui-a8404175a1841fd2**  
ID: eui-a8404175a1841fd2

↑ n/a ↓ n/a • Last activity 29 seconds ago

Overview **Live data** Messaging Location Payload formatters Claiming General settings

Time Type Data preview

Verbose stream ☐ Export as JSON ☐ Pause ☐ Clear

09:43:15 Schedule data downlink for transmission... Rx1 Delay: 6

09:43:15 Update end device [ "activated\_at" ]

09:43:15 Forward uplink data message Payload: { BatV: 3.806, Bat\_status: 3, Ext\_sensor: "Temperature Sensor", Hum\_SHT: 30.2, Temp\_C\_S0: 327.67, Temp\_C\_SHT: 24.16 } CC 0E 09 6F 01 2E 01 7F ... FPort: 2 Data rate: SF

09:43:15 Successfully processed data message DevAddr: 26 08 6F C2 FPort: 2 Data rate: SF12BK12S SNR: 11.6 RSSI: -88

09:43:09 Forward join-accept message

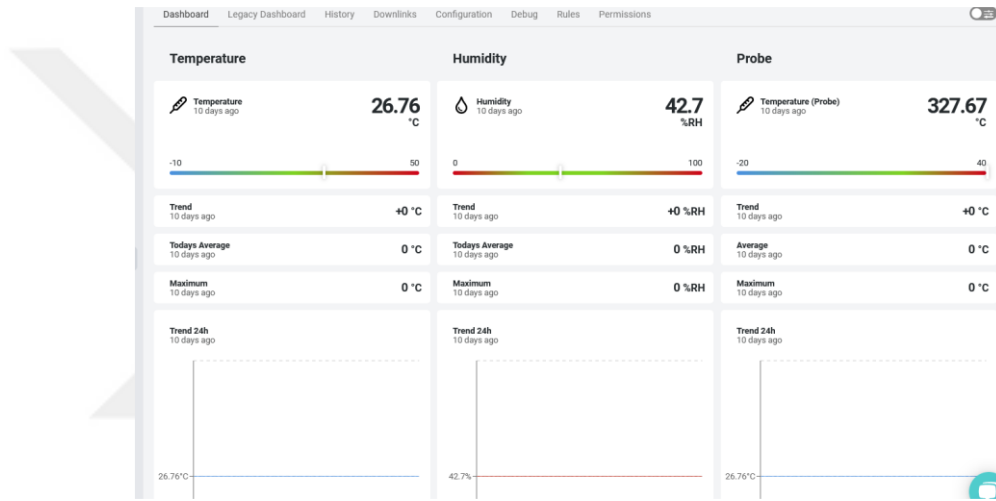
**Şekil 4.7** Sıcaklık nem sensörü TTN paneli

Sensör okumasından sonra iletilen 11 baytlık verinin çözümleme yolu Tablo 4.1’de belirtilmiştir.

**Tablo 4.1** LHT65 yukarı bağlantı (UL) yük tanımı

|               |                |                 |            |                      |              |
|---------------|----------------|-----------------|------------|----------------------|--------------|
| Boyut (bytes) | 2              | 2               | 2          | 1                    | 4            |
| Değer         | Batarya Verisi | Sıcaklık Değeri | Nem Değeri | Harici Sensör verisi | Harici Değer |

İlk 6 bayt her cihaz için sabit anlamlara sahiptir. 7. bayt (EXT #): harici sensör modelini tanımlar. 8. ve 11. bayt arasındaki veriler harici sensör değeri değeri olarak tanımlanır ve harici sensör tipine bağlıdır. (EXT=0 ise, bu dört bayt olmayacaktır.)



**Şekil 4.8** Sıcaklık ve nem sensörü kontrol paneli (Datacake)

LHT65 sıcaklık ve nem sensöründen gelen veriler doğrultusunda özelleştirilmiş bir arayüz Şekil 4.8’te belirtilmiştir.

### 4.3 Su Sızıntısı Tespit Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LWL02 serisi bir su sensörüdür. İki metal prob arasında su olduğunda, LWL02 bir su sızıntısı olayını ve LoRaWAN ağı üzerinden IoT sunucusuna yukarı bağlantıyı gönderir. 2 x AAA pil ile çalışan cihazın Fotoğraf 4.4’te görüleceği üzere bağlantıları gerçekleştirilerek, TTN servera veri aktratımına hazır hale getirilmiştir.



**Fotoğraf 4.4** Su sızıntı tespit sensörü

Sıcaklık ve nem sensörü Şekil 4.9'daki ağ şemasında görüleceği gibi, TTN servera kayıtlı bir ağ geçidi aracılığıyla veri aktarımı sağlamaktadır. Cihazla birlikte gelen EUI bilgileri sayesinde server ağına kaydı yapılarak sensör aktif edilmiştir.



**Şekil 4.9** Su sızıntı sensörü ağ şeması

Sıcaklık ve nem sensörünün testleri için Fotoğraf 4.4'te belirtildiği gibi kurulan sistem her su tespit uyarısında Şekil 4.10'da görüleceği üzere anlık olarak yukarı bağlantı (UL) mesajı göndermektedir. Su sızıntısına karşı koruma ihtiyacı duyulan ortamlar simüle edilerek oluşturulan sistem sayesinde ufak bir su kaçağının dahi alarm tetiklemesi gözlemlenmiştir. Her UL mesajı detaylı incelendiğinde cihaz tanımlarının yanı sıra daha önceki alarm tetiklemeleri gibi bilgileri de barındırmaktadır.

| Applications > LoRaWAN Water Leak Sensor(LWL02) > End devices > eui-a840416f91840c90 > Live data                                                                                                                     |                                          |                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div>  <b>eui-a840416f91840c90</b><br/> ID: eui-a840416f91840c90<br/> <span>↑ 28 ↓ 28</span> • Last activity 5 minutes ago © </div> |                                          |                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Overview <b>Live data</b> Messaging Location Payload formatters Claiming General settings                                                                                                                            |                                          |                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Time                                                                                                                                                                                                                 | Type                                     | Data preview                                                                                 | Event details                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ↓ 10:42:45                                                                                                                                                                                                           | Schedule data downlink for transmissi... | Rx1 Delay: 5                                                                                 | <pre> 1 { 2   "name": "as.up.data.forward", 3   "time": "2022-01-27T07:42:45.792246813Z", 4   "identifiers": [ 5     { 6       "device_ids": { 7         "device_id": "eui-a840416f91840c90", 8         "application_ids": { 9           "application_id": "lead-detector-test" 10        } 11      } 12    }, 13    { 14      "device_ids": { 15        "device_id": "eui-a840416f91840c90", 16        "application_ids": { 17          "application_id": "lead-detector-test" 18        } 19      }, 20      "dev_eui": "A840416F91840C90", 21      "join_eui": "A840416000000107", 22      "dev_addr": "26080283" 23    } 24  ] </pre> |
| ↑ 10:42:45                                                                                                                                                                                                           | Forward uplink data message              | Payload: { BAT_V: 3.196, LAST_WATER_LEAK_DURATION: 0, MOD: 2, WATER_LEAK_STATUS: 0, WATER... |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ↑ 10:42:45                                                                                                                                                                                                           | Successfully processed data message      | DevAddr: 26 08 62 83 FCnt: 28 FPort: 10 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 8          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ↓ 10:42:38                                                                                                                                                                                                           | Schedule data downlink for transmissi... | Rx1 Delay: 5                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ↑ 10:42:38                                                                                                                                                                                                           | Forward uplink data message              | Payload: { BAT_V: 3.196, LAST_WATER_LEAK_DURATION: 0, MOD: 2, WATER_LEAK_STATUS: 1, WATER... |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ↑ 10:42:38                                                                                                                                                                                                           | Successfully processed data message      | DevAddr: 26 08 62 83 FCnt: 27 FPort: 10 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 9          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ↓ 10:42:11                                                                                                                                                                                                           | Schedule data downlink for transmissi... | Rx1 Delay: 5                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ↑ 10:42:11                                                                                                                                                                                                           | Forward uplink data message              | Payload: { BAT_V: 3.196, LAST_WATER_LEAK_DURATION: 0, MOD: 2, WATER_LEAK_STATUS: 0, WATER... |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ↑ 10:42:11                                                                                                                                                                                                           | Successfully processed data message      | DevAddr: 26 08 62 83 FCnt: 26 FPort: 10 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 9          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

**Şekil 4.10** Su sızıntı alarm paneli

#### 4.4 Kapı Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LDS02 serisi bir kapı sensörüdür. Karşılıklı yer alan prob konumlandırıldığı kapı açık/kapalı durumunu LoRaWAN ağı üzerinden IoT sunucusuna yukarı bağlantı (UL) gönderir. 2 x AAA pil ile çalışan cihazın Fotoğraf 4.5'te görüleceği üzere bağlantıları gerçekleştirilerek, TTN servera veri aktratımına hazır hale getirilmiştir.



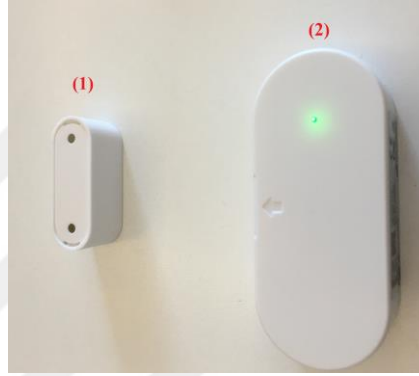
**Fotoğraf 4.5** Kapı sensörü

Kapı sensörü Şekil 4.11'deki ağ mantığıyla TTN servera kayıtlı bir ağ geçidi aracılığıyla veri aktarımı sağlamaktadır. Cihazla birlikte gelen EUI bilgileri sayesinde server ağına kaydı yapılarak sensör aktif edilmiştir.



**Şekil 4.11** Kapı sensörü ağ yapısı

Cihaz Fotoğraf 4.6’da görülen 1 ve 2 numaralı bağlantı problemlerinin birbirleriyle teması ve ayrılması sonucu yukarı bağlantı bilgisini iletmektedir.



**Fotoğraf 4.6** LD02 bağlantı uçları

Kapı açılımı simüle edilerek oluşturulan testlerde, kapı açılması durumundaki alarm tetiklemesi Şekil 4.12’de belirtilmiştir. Kapı açıldığında durum 1 olurken, kapanma durumunda 0 pozisyonuna geçmektedir. Yine server üzerinden kapı açılış kapanış miktarındaki sayaç artışıyla gösterilmektedir.

|                                                                                                                                                                              |                                     |                                                                                                                 |                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Applications > LoRaWAN Door Sensor (LDS02) > End devices > eui-a840411db183eff7 > Live data                                                                                  |                                     |                                                                                                                 |                                                               |
| <div> <div>eui-a840411db183eff7</div> <div>ID: eui-a840411db183eff7</div> <div> <div>↑ ↓ ↻</div> <div>n/a</div> <div>Last activity 3 minutes ago</div> </div> </div>         |                                     |                                                                                                                 |                                                               |
| <div> <div>Overview</div> <div>Live data</div> <div>Messaging</div> <div>Location</div> <div>Payload formatters</div> <div>Claiming</div> <div>General settings</div> </div> |                                     |                                                                                                                 |                                                               |
| <div> <div>Time</div> <div>Type</div> <div>Data preview</div> <div>Verbose stream</div> <div>Export as JSON</div> <div>Pause</div> <div>Clear</div> </div>                   |                                     |                                                                                                                 |                                                               |
| 11:28:52                                                                                                                                                                     | Forward uplink data message         | Payload: { ALARM: 0, BAT_V: 3.18, DOOR_OPEN_STATUS: 1, DOOR_OPEN_TIMES: 4, LAST_DOOR_OPEN_DURATION: 0, MOD: 1 } | 8C 6C 81 00 00 04 00 00 ... FPort: 10 Data rate: SF7Bw125 SNR |
| 11:28:52                                                                                                                                                                     | Successfully processed data message | DevAddr: 26 08 5D 0E FCnt: 9 FPort: 10 Data rate: SF7Bw125 SNR: 9.2 RSSI: -36                                   |                                                               |
| 11:28:45                                                                                                                                                                     | Forward uplink data message         | Payload: { ALARM: 0, BAT_V: 3.18, DOOR_OPEN_STATUS: 0, DOOR_OPEN_TIMES: 3, LAST_DOOR_OPEN_DURATION: 0, MOD: 1 } | 8C 6C 81 00 00 03 00 00 ... FPort: 10 Data rate: SF7Bw125 SNR |
| 11:28:45                                                                                                                                                                     | Successfully processed data message | DevAddr: 26 08 5D 0E FCnt: 8 FPort: 10 Data rate: SF7Bw125 SNR: 7.8 RSSI: -48                                   |                                                               |
| 11:28:38                                                                                                                                                                     | Forward uplink data message         | Payload: { ALARM: 0, BAT_V: 3.18, DOOR_OPEN_STATUS: 1, LAST_DOOR_OPEN_DURATION: 0, MOD: 1 }                     | 8C 6C 81 00 00 03 00 00 ... FPort: 10 Data rate: SF7Bw125 SNR |
| 11:28:38                                                                                                                                                                     | Successfully processed data message | DevAddr: 26 08 5D 0E FCnt: 7 FPort: 10 Data rate: SF7Bw125 SNR: 9.8 RSSI: -68                                   |                                                               |
| 11:28:23                                                                                                                                                                     | Forward uplink data message         | Payload: { ALARM: 0, BAT_V: 3.18, DOOR_OPEN_STATUS: 0, DOOR_OPEN_TIMES: 2, LAST_DOOR_OPEN_DURATION: 0, MOD: 1 } | 8C 6C 81 00 00 02 00 00 ... FPort: 10 Data rate: SF7Bw125 SNR |

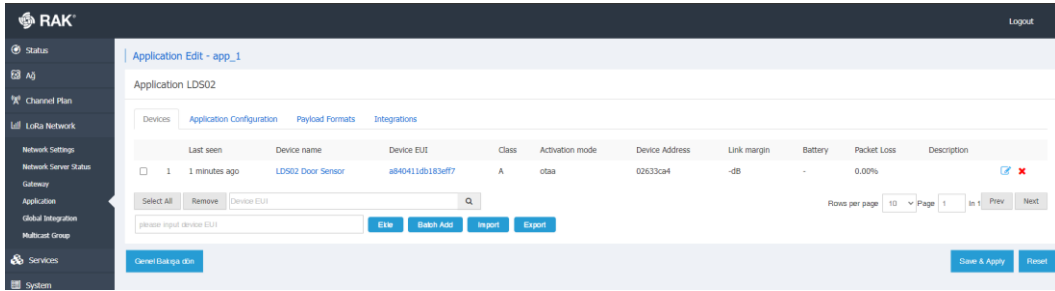
**Şekil 4.12** Kapı sensörü gösterge paneli

Farklı bir ağ geçidi aracılığıyla karşılaştırma ve anlık performans analizini değerlendirmek adına ikinci bir test düzeneği Fotoğraf 4.7’deki gibi kurulmuştur.



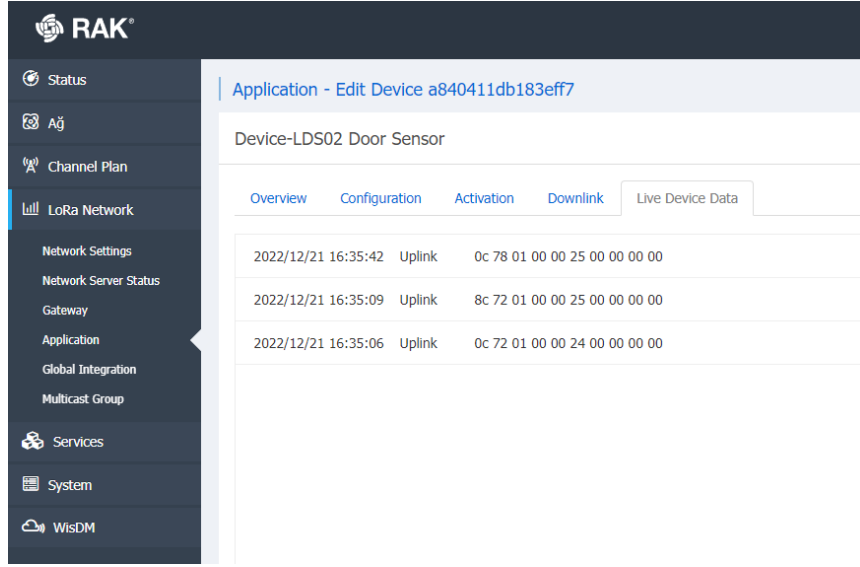
**Fotoğraf 4.7** RAK7268 ile kurulu kapı sensörü

RAK markasının RAK7268 ağ geçidi ile kurulan düzenekteki mesajları incelemek adına aynı markanın kendine ait kurmuş olduğu gösterge paneli (dashboard) üzerinden veri akışı sağlanmıştır. İlk olarak ağ geçidi ve sensörler aynı tarama bölgesinde aktif hale getirilmiştir. Uç birimin, ağ geçidinde kayıt işlemi Şekil 4.13’te belirtilmiştir. Cihazın aktivasyon modu ve EUI tanımları girilerek eşleştirme tamamlanmıştır.

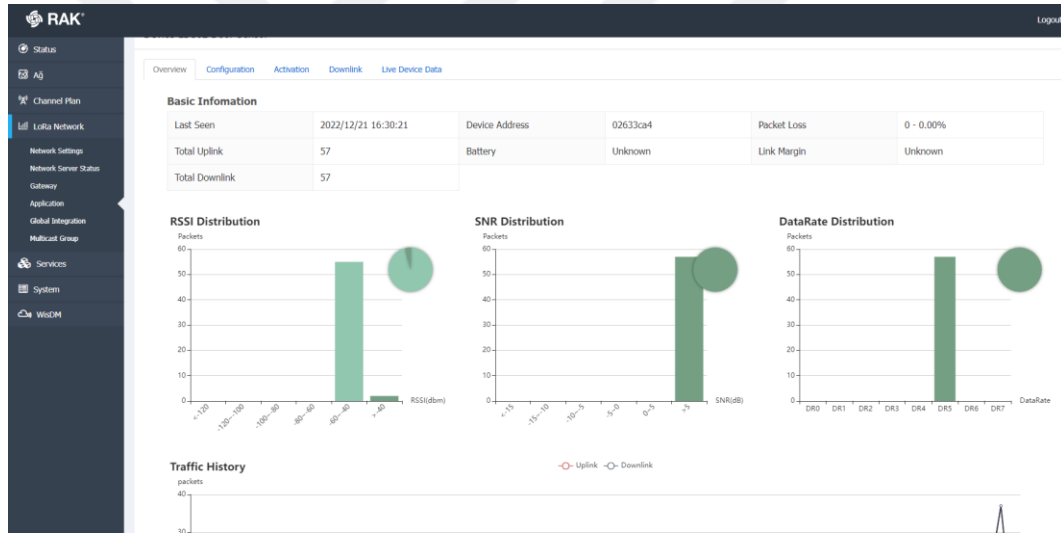


**Şekil 4.13** Kapı sensörü RAK kullanıcı arayüzü

Kapı sensörünün her veri iletiminde ulaşılan anlık göstergeler Şekil 4.14’te görülmektedir. Ulaşılan mesajlar RSSI, SNR ve Data aktarım göstergeleri Şekil 4.14’te belirtilmiştir.



Şekil 4.14 LDS02 canlı veri akışı



Şekil 4.15 LDS02 kullanıcı paneli ve veri göstergeleri

#### 4.5 Mesafe Algılama Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LDD575 serisi mesafe algılama sensörüdür. Karşılıklı yer alan prob konumlandırıldığı kapı açık/kapalı durumunu Sensör düz bir nesne ile ölçüm probu arasında ultrasonik algılama teknolojisi kullanarak veri ölçümü sağlamaktadır. Veri güvenliğini ve doğruluğunu artırmak için sıcaklık dengesi dahili olarak gerçekleştirilir. Ölçülen nesne ile sensör arasındaki mesafeyi algılar ve değeri LoRaWAN IoT Sunucusuna yükler. Şekil 4.16'da belirtildiği gibi uç birimin EUI değerleri girilerek, TTN servera kaydı gerçekleştirilmiştir.

## Register end device

[From The LoRaWAN Device Repository](#)
[Manually](#)

## 1. Select the end device

| Brand *                    | Model * | Hardware Ver. * | Firmware Ver. * | Profile (Region) * |
|----------------------------|---------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Dragino Technology Co.,... | LDD575  | Unknown ...     | 1.2             | EU_863_870         |



**LDD575**  
MAC V1.0.3, PHY V1.0.3 REV A, Over the air activation (OTAA), Class A

The Dragino LDD575 consists of an ultrasonic detection sensor for measuring the distance between the sensor and a flat object. It is used to measure the distance between the sensor and a flat object. It uses temperature compensation to improve the reliability of data. The measured distance data are sent to a LoRaWAN® network for further analysis.

[Product website](#) [Data sheet](#)

## 2. Enter registration data

Frequency plan \*

Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommended)

AppEUI \*

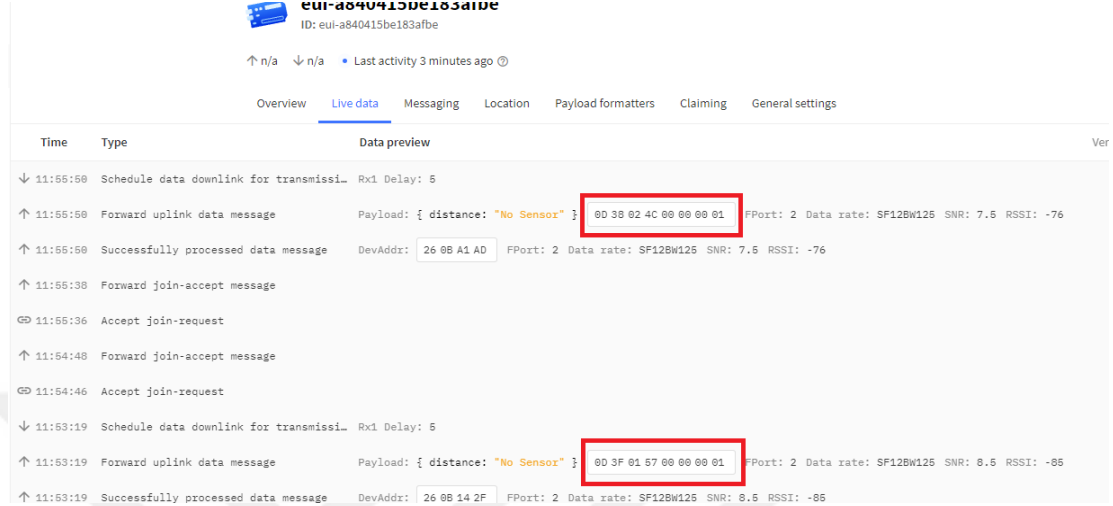
Şekil 4.16 LDD575 server TTN kaydı

Mesafe algılama sensörünün ağ geçidiyle eşleştirilmesinin ardından cihazın güç bağlantıları Fotoğraf 4.8’de belirtildiği gibi sağlanmış ve cihaz veri iletimine hazır hale getirilmiştir.



Fotoğraf 4.8 Mesafe algılama sensörü kutu içi

Sensör testleri esnasında düz bir plaka karşısına konarak yakınlaştırma ve uzaklaştırma yapılarak Şekil 4.17’de görülen yukarı bağlantı değişimleri gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.17** Mesafe ölçümü gösterge paneli

LDDS75 yukarı bağlantı (UL) yükünün değerleri Tablo 4.2’de belirtilmiştir. LDDS75 yükünün verisi baz alınarak ulaşılan test verilerimizin sonuçlarını aşağıdaki gibi inceleyerek okunabilir verilere ulaşılmıştır. Hex olarak sırasıyla “0D3F015700000001” ve “0D38024C00000001” değerleri alınmıştır. Servera ulaşan veriler Tablo 4.2 açıklamalarına göre dönüştürülmüştür.

**Tablo 4.2** LDDS75 yük tanımı

|            |                |              |                 |          |                   |
|------------|----------------|--------------|-----------------|----------|-------------------|
| Yük (bayt) | 2              | 2            | 1               | 2        | 1                 |
| Değer      | Batarya verisi | Mesafe (mm.) | Dijital kesinti | Sıcaklık | Sensör Bağlantısı |

Batarya voltajı alınan veriler baz alınarak aşağıdaki gibi dönüştürülmüştür. Kullanım sonrası batarya kapasitesinde ufak da olsa düşüm olduğu gözlemlenmiştir.

Veri1: 0x0D3F → 00 00 0D 3F = 3391mV

Veri2: 0x0D38 → 00 00 0D 38 = 3384mV

Mesafe değerleri hesaplanırken, batarya değerlerinden sonra gelen 2 bayt verisi baz alınmaktadır.

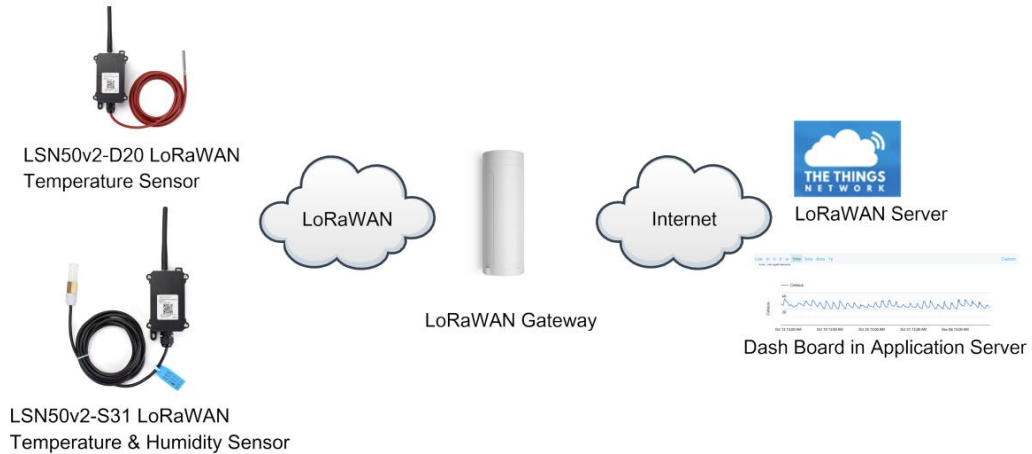
Veri1: 0x0157 → 00 00 01 57 = 343mm.

Veri2: 0x024C → 00 00 02 4C = 588mm.

Sonraki verilerin 0x00 gelmesi dijital interrupt(kesinti) ve sıcaklık sensöründen ek veri almadığını göstermektedir. Son baytta yer alan 0x01 sensör verisi ise ultrasonik sensör probunun bağlantısının gerçekleştiğini ve algılandığını belirtmektedir.

#### 4.6 Dış Ortam Sıcaklık Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LSN50v2 serisi ile sıcaklık ve nem ölçümü yapılmaktadır. Belirtilen uç birimler farklı sıcaklık çipleri içeren ve farklı hassasiyetler içermesi sebebiyle test ortamına dahil edilmiş olup, karşılaştırma maksadıyla saha performansları incelenmiştir.



Şekil 4.18 LSN50v2 serisi sıcaklık sensör ağı

LSN50v2 serisi sıcaklık sensörleri iki farklı modeliyle incelenmiştir. Fotoğraf 4.9’da (a) modelinde D20 serisi, (b) modelinde S31 serisi sensör tercih edilmiştir.



(a)



(b)

**Fotoğraf 4.9 LSN50v2 serisi test düzeneği**

#### 4.7 Toprak Nemi ve EC Ölçüm Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LSE01 modeli toprak nem ve toprak elektrik iletkenliği (EC) sensörüdür. LoRaWAN ekosisteminin önemli bir parçası olan tarım alanındaki etkin izleme araçlarından biri olan toprak nem sensörlerinin çalışma mantığını görmek adına Fotoğraf 4.10'da belirtilen test düzeneği kurulmuştur.



**Fotoğraf 4.10 Toprak nem ve iletkenlik (EC) sensörü**

#### 4.8 GPS İzleyici Takip Sensör Testi

LoRaWAN Dragino LSE01 modeli GPS takip cihazıdır. Kullanıcıların son konum bilgilerini GPS aracılığıyla alarak LoRWAN kablosuz ağına üzerinden IoT sunucusuna aktarmaktadır. Fotoğraf 4.11’de görüleceği üzere sistemdeki ağ geçidi ve uç birim sensörüne güç verilmiştir.



**Fotoğraf 4.11** GPS takip sistem elemanları

LGT-92 uç birimi Fotoğraf 4.12’deki gibi açık alana konumlandırılarak GPS verisini tarayabilecek uygun test ortamına yerleştirilmiştir.



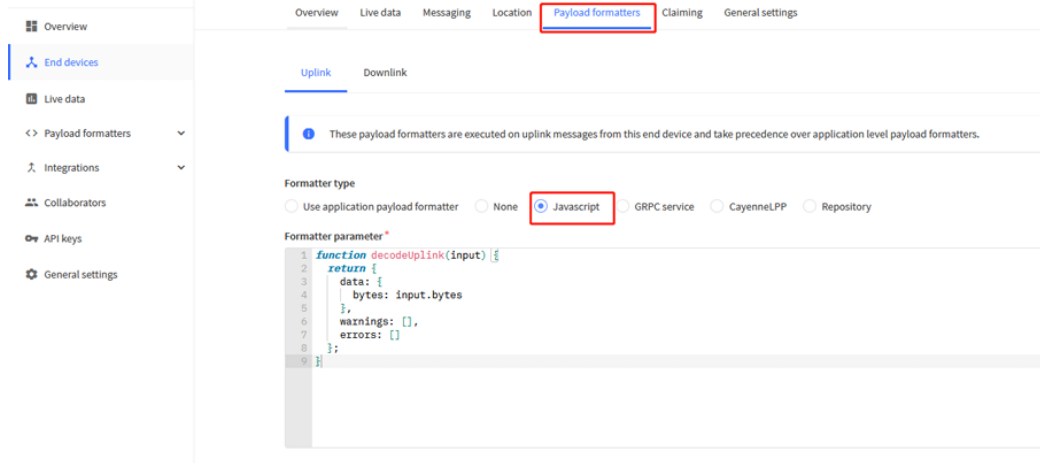
**Fotoğraf 4.12** LGT-92 GPS takip sensörü

Sensör ile gelen varsayılan cihaz EUI'sine sahip değerlerin OTAA anahtarları TTN V3'e girilerek cihaz kaydı oluşturulmuştur. Katılımın başarılı olmasının ardından cihaz mesajları IoT sunucusuna iletmeye başlamıştır. Sunucuya gelen verilen Tablo 4.3'teki gibi ham vaziyettedir.

**Tablo 4.3** LGT-92 GPS veri paketi

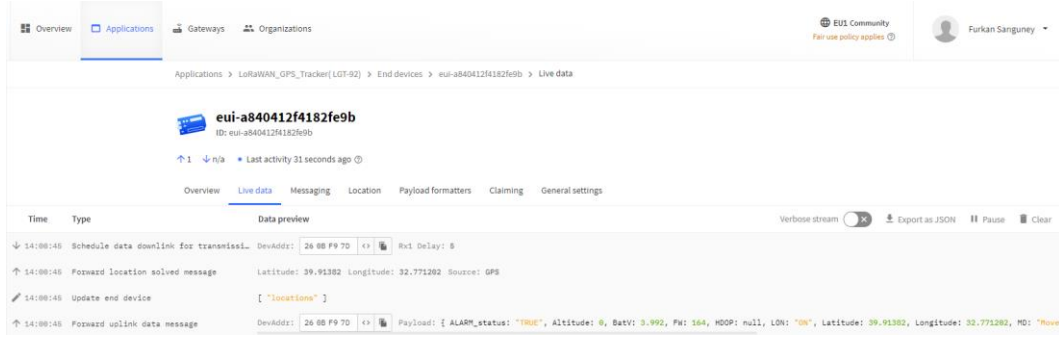
|             |       |        |         |      |      |       |      |           |
|-------------|-------|--------|---------|------|------|-------|------|-----------|
| Boyut(bayt) | 4     | 4      | 2       | 1    | 2    | 2     | 1    | 2         |
| Değer       | Enlem | Boylam | Batarya | Flag | Roll | Pitch | HDOP | Yükseklik |

Okunan verilerin enlem/boylam şeklinde anlaşılabilir tanımlara dönüştürülmesi için EK-1'de belirtilen decoder (kod çözücü) Şekil 4.19'daki yük formatı kısmından dönüştürülmesi için eklenmiştir.



**Şekil 4.19** GPS ham verisinin kod çözücü paneli

Dönüştürülen veriler Şekil 4.20'deki gibi görüntülenmektedir. GPS takip sensörü, son kullanıcının alarm butonuna müdahalesi harici ayarlanan veri aralığında sürekli olarak veri göndererek cihaz konumunu belirtmektedir.



Şekil 4.20 GPS takip sensörü kullanıcı arayüzü

Ulaşılan bir veri dizini aşağıda belirtilmiştir. Cihazın servera iletmış olduğu yukarı bağlantı mesajı Şekil 4.21’de görüntülenen haritalandırma aracılığıyla da paylaşılmıştır.

```
{
  "locations"
  DevAddr
  260BF97D
  Payload
  ALARM_status"TRUE"Altitude0BatV3.992FW164HDOPnullLON"ON"
  Latitude39.91382Longitude32.771202MD"Move"Pitch0Roll0
  0261095C01F40C82...
  codefile_copy
  FPort
  2
  Data rate
  SF12BW125
  SNR
  5.8
  RSSI
  -83
}
```

**eui-a840412f4182fe9b**

ID: eui-a840412f4182fe9b

↑ 1 ↓ n/a • Last activity 5 minutes ago

[Overview](#) [Live data](#) [Messaging](#) [Location](#) [Payload formatters](#) [Claiming](#) [General settings](#)**General information**

|                             |                                               |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|
| End device ID               | eui-a840412f4182fe9b                          |
| Frequency plan              | Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommen... |
| LoRaWAN version             | LoRaWAN Specification 1.0.3                   |
| Regional Parameters version | RP001 Regional Parameters 1.0.3 revision A    |
| Created at                  | Dec 20, 2022 11:18:04                         |

**Hardware**

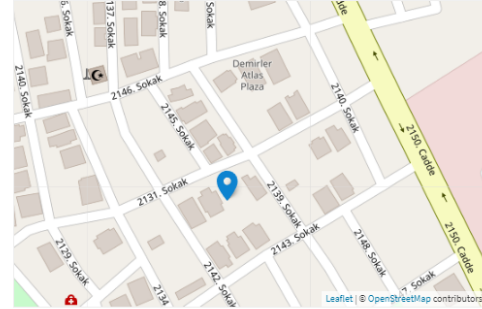
|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| Brand            | dragino               |
| Model            | lgt92                 |
| Hardware version | _unknown_hnw_version_ |
| Firmware version | 1.6.4                 |

**Activation information**

|        |                         |
|--------|-------------------------|
| AppEUI | A0 00 00 00 00 00 01 02 |
| DevEUI | A8 40 41 2F 41 82 FE 9B |
| AppKey | .....                   |

**Live data**[See all activity →](#)

|          |                                                               |
|----------|---------------------------------------------------------------|
| 14:05:53 | Update end device [ "locations" ]                             |
| 14:00:45 | Schedule data downlink for transmission on Gateway Server Dev |
| 14:00:45 | Forward location solved message Latitude: 39.91382 Longitude  |
| 14:00:45 | Update end device [ "locations" ]                             |
| 14:00:45 | Forward uplink data message DevAddr: 26 0B F9 7D              |
| 14:00:45 | Successfully processed data message DevAddr: 26 0B F9 7D      |

**Location**[Change location settings →](#)**Şekil 4.21** GPS sensörü konum gösterge paneli

## 5. TARTIŞMA

LoRaWAN ekosistemini oluşturmaya hedefleyen deneysel saha testlerinin sonucunda, kullanılan ağ geçitleri ve sensörler, benzer modelleri ve muadilleriyle kıyaslanmıştır. LoRaWAN sistemi oluşturulurken öncelikle bir ağ geçidi sabit baz istasyonu mantığında kurularak, uç birimlerle haberleşmeye hazır hale getirilmiştir.

LoRaWAN tabanlı bir ağ kurulurken ana elemanlar ağ geçitleri ve sensör ya da uç birimlerdir. Ana elemanların yanı sıra harici ve dış etmenler de testleri ve performans analizlerini etkileyecek değişkenlerdir.

Harici etmenlere haberleşmedeki bağlantıyı sağlayan antenler örnek gösterilebilir. Antenler iç mekan ve dış mekan standartlarına uygunluğuna göre iki ana başlıkta ayrılmaktadır. Kullanım alanına göre su geçirmezlik, toz korunumu gibi kaplama ve koruma detayları fark oluşturmaktadır. Diğer yandan antenlerin kazancına göre ağ geçidi ve uç birim arasında ulaşılacak mesafe, veri kaybı önemli bir etmen olarak karşımıza çıkmaktadır. Testlerimiz esnasında sağlıklı karşılaştırmalar yapabilmek adına aynı frekans aralığına ve kazanca sahip antenler tercih edilmiştir.

Dış etmenler olarak saha testlerinin gerçekleştiği lokasyon gösterilebilir. Bulunan konumun şehir içi ya da kırsal bölge olmasına göre, RF yoğunluğu, parazit, kırım, enterfere gibi durumlar test düzeneklerini ve kurulan sistemden elde edilen verileri etkilemektedir.

İlk olarak ana elemanı oluşturan ağ geçitlerine değinecek olursak; iki farklı markanın, üç farklı modeli üzerinden testler gerçekleştirilmiştir. Uç birim sensörleri sabit tutularak, farklı ağ geçitlerine veri gönderimi sağlanmış ve ulaşılan sonuçların analizi sağlanmıştır. Ağ geçitlerinde temel unsur içerdiği çip set yongasının destekleriyle alakalıdır. Çip üreticileri teknoloji karşısında geri kalmamak adına sürekli çip entegrasyonlarında iyileştirmeler ve yeni seriler yayınlamaktadır. Üretici firmalar da teknolojiyi yakalamak adına piyasaya sürülmüş ürün ile nihai bir ağ geçidi sunmaktadırlar. Testlerimiz iç mekana uygun olmasından ötürü aynı kullanım kategorisinde yer alan modeller karşılaştırılmıştır. Semtech, dijital ana bant işlemcilerinin tek üreticisi olduğundan ötürü piyasaya sürülen temel baz alınmaktadır. Semtech 4 varyantın yanı sıra üretim ve geliştirmelerini çeşitlendirerek sürdürmektedir. Yayın tarihi itibarıyla SX1308, SX1301, SX1302 ve SX1303 varyantları ağ geçitlerinde tercih edilmektedir.

Testlerimizde SX1308, SX1301 ve SX1302 varyantlarına sahip üç farklı model karşılaştırılmıştır. Sırasıyla LPS8, LG308 ve RAK7268 modellerinde bu varyantlarla geliştirme sağlanmıştır.

Aşağıdaki Tablo 5.1’de çalışma gerçekleştirilen çip serilerinin teknik özellikleri tek tablo altında toplanarak karşılaştırılmıştır.

**Tablo 5.1** SX1308, SX1301, SX1302 ve SX1303 çip karşılaştırması

| Özellikler       | SX1308         | SX1301         | SX1302         | SX1303         |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Maksimum Kanal   | 8              | 8              | 16             | 8              |
| LoRa Modülasyonu | Evet           | Evet           | Evet           | Evet           |
| FSK Modülasyonu  | Evet           | Evet           | Evet           | Evet           |
| Maksimum BW      | 500 kHz        | 500 kHz        | 500 kHz        | 400 kHz        |
| RX Hassasiyeti   | -137 dBm       | -137 dBm       | -139 dBm       | -139 dBm       |
| TX Gücü          | 27 dBm         | 27 dBm         | 27 dBm         | 22 dBm         |
| CRC Hataları     | Evet           | Evet           | Evet           | Evet           |
| GPS Destekli     | Hayır          | Evet           | Evet           | Hayır          |
| SPI Hızı         | 10 Mbps        | 10 Mbps        | 20 Mbps        | 10 Mbps        |
| Güç Tüketimi     | 1.5W           | 2.5W           | 2.3W           | 1.8W           |
| İşlemci Hızı     | 100 MHz        | 125 MHz        | 400 MHz        | 32 MHz         |
| RAM              | 32 KB          | 128 KB         | 256 KB         | 20 KB          |
| Flash Bellek     | 64 KB          | 256 KB         | 4 MB           | 192 KB         |
| Boyutlar         | 15.5 x 13.5 mm | 29.0 x 26.0 mm | 28.0 x 22.0 mm | 12.5 x 11.6 mm |
| Paket Formatı    | SPI            | SPI            | SPI            | SPI            |

SX1308: Bu, en düşük seviye varyantıdır. En az hassasiyete ve maksimum çıkış gücüne sahiptir. Diğerleri gibi aynı anda 8 kanalı işleyebilir ve SF7'den SF12'ye kadar desteklemektedir.

SX1301: SX1308'den daha yüksek bir katmanda olacak şekilde tasarlanan bu seri, daha yüksek hassasiyete ve maksimum çıkış gücüne sahiptir. Daha iyi menzil sağlamak için dış mekan ağ geçitleri uygundur. Yayın tarihi itibarıyla şu ana kadar en çok tercih edilen seridir.

SX1302: Bu model, SX1301'in halefidir. Konsantratörün termal tasarımını basitleştirerek daha düşük akım tüketimi sunar ve bu da maliyetin düşmesine yol

açar. Ek olarak, SF5 ile SF12 arasında çalıştığı için daha fazla trafiği işleyebilir. Ayrıca artırılmış saat kararlılığı ve özel hassas zamanlama özellikleri gibi ek özelliklere de sahiptir. Pazara hakim olmaya başlamıştır ve şu anda üretilen ağ geçitlerinde kullanılmaktadır.

SX1303: Bu varyant, daha düşük akım tüketimi ve ısı üretimi sunan SX1302'nin tüm iyileştirmelerini içerir, ancak aynı zamanda ek bir özellik sunar. Varış Zaman Farkı (TDOA) ağ tabanlı coğrafi konum belirlemeyi etkinleştiren İnce Zaman Damgası özelliği bu Semtech çipini kullanan yoğunlaştırıcı modüller için kullanılabilir. [37], [38]

**Tablo 5.2** SX Serisi LoRa çiplerin olumlu olumsuz yönleri

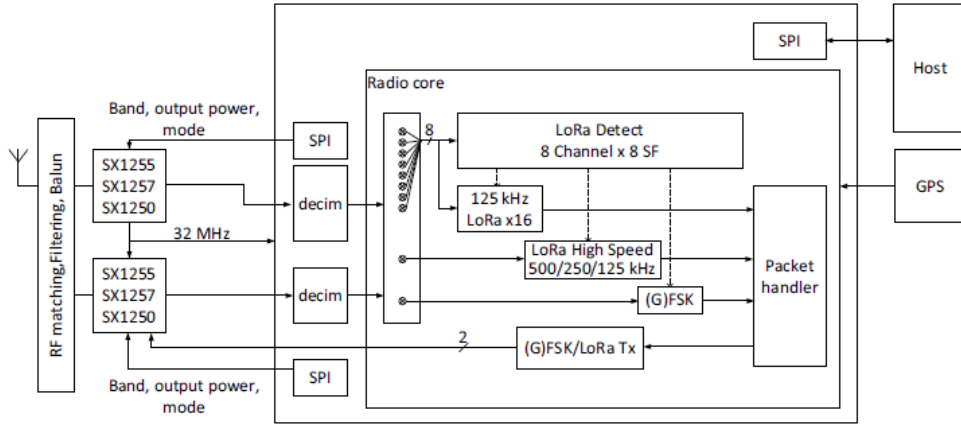
| Özellikler            | SX1308                                    | SX1301                                    | SX1302                    | SX1303                               |
|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| <b>Olumlu Yönler</b>  | Düşük güç tüketimi                        | Yüksek işlemci hızı                       | Yüksek RX hassasiyeti     | Düşük güç tüketimi                   |
|                       | Küçük boyut ve entegrasyon kolaylığı      | Geniş flash bellek                        | Yüksek kanal kapasitesi   | Düşük güç tüketimi                   |
|                       | Yüksek TX gücü                            | Desteklenen kanal sayısının yüksek olması | Yüksek SPI hızı           | Düşük işlemci hızı                   |
|                       | Desteklenen kanal sayısının yüksek olması | GPS desteği                               | Geniş flash bellek        | Düşük RAM                            |
|                       | -                                         | -                                         | -                         | Küçük boyut ve entegrasyon kolaylığı |
| <b>Olumsuz Yönler</b> | Daha düşük kanal kapasitesi               | Yüksek güç tüketimi                       | Daha düşük TX gücü        | Daha düşük kanal kapasitesi          |
|                       | Daha düşük RX hassasiyeti                 | Daha düşük RX hassasiyeti                 | Daha Düşük RX hassasiyeti | Daha düşük RX hassasiyeti            |
|                       | Daha düşük SPI hızı                       | Daha düşük SPI hızı                       | Daha düşük SPI hızı       | Daha düşük SPI hızı                  |
|                       | Daha düşük işlemci hızı                   | Daha düşük işlemci hızı                   | Daha düşük işlemci hızı   | -                                    |
|                       | Daha düşük RAM                            | Daha düşük RAM                            | -                         | -                                    |

Testler sonucunda en eski model SX1308 modeli ve SX1302 kıyaslandığında, ağ geçitlerinin performansındaki değişiklik açık şekilde gözlemlenmektedir. Çip verilerinden alınan sonuçlara göre olumlu ve olumsuz yönlerinin karşılaştırması Tablo 5.2’de belirtilmiştir. Ulaşılan verilerin hızı, yoğun veri akışına maruz kalsa dahi SX1302 serisinde daha stabil şekilde elde edilmiştir. Gelişmiş model ve yayın tarihi itibarıyla en çok tercih edile modeli biraz daha detaylı incelemek adına SX1302 donanım detayları belirtilmiştir. SX1302 LoRa Ağ Geçidi temel band alıcı-vericileri, güç tüketimini önemli ölçüde azaltan bir mimari sunarak, güç dağıtımının zor olabileceği yüksek düzeyde entegre ortamlara kolay yerleştirmeye olanak tanımaktadır.



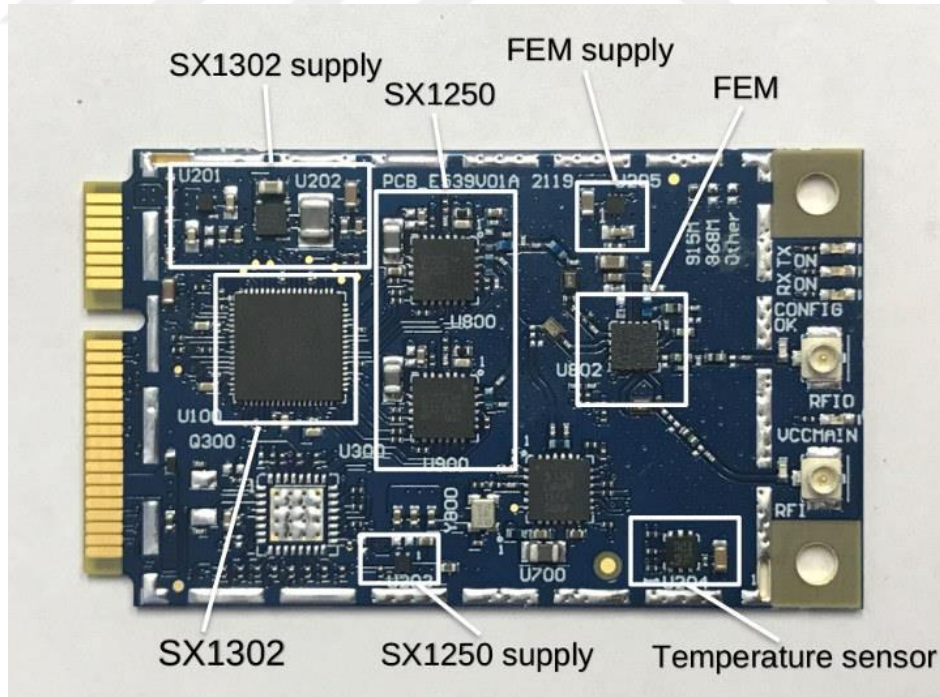
**Şekil 5.1** Semtech SX1302 çipi

Performans analizlerinde daha verimli sonuçlar elde edebilmek için Semtech referansları baz alınarak üretilmiş hazır ürünler tercih edilmiştir ancak Semtech referansı açık kaynak olarak sunulmaktadır ve bu anlamda LoRaWAN geliştiricilerinden, son kullanıcılara kadar herkes bu ürünlerle Ar-Ge ve ağ geçidi ortaya çıkarabilmektedir. Kendi devremiz kurulmak istenirse Şekil 5.2’de LoRa Ağ geçidi temel band işlemcisinin referans donanım blok diyagramı görülmektedir.



**Şekil 5.2** SX1302 LoRa Çip Referans Blok Diyagramı

Semtech firması ayrıca LoRa ağı geçidi oluşturmak için bir SX1302 alıcı-verici ve iki SX1250 RF ön uç, bir 27dBm ön uç modül ve 8 kanallı bir model için gerekli tüm filtreler ve güç kaynaklarını temel alan bir Corecell referans tasarımı oluşturmuştur. Semtech Corecell referans tasarımı Şekil 5.3'te görülmektedir.



**Şekil 5.3** Semtech Corecell SX1302 LoRa Gateway Reference Design

Öne çıkan özelliklerinde eski modellere kıyasla 10 kat güç tüketimi sağlanmıştır. Maksimum TX çıkış gücü = +27 dBm seviyesindedir. 8 LoRa kanalı çoklu veri hızı (SF5 ~ SF12 / 125 Eşzamanlı olarak kHz) + 2 mono veri hızı (LoRa 250 / 500 kHz ve FSK 50 kbps) baz alınmaktadır. Half-duplex (yarım çift yönlü) mod desteği bulunmaktadır.

Tipik hassasiyet seviyesi olarak aşağıdaki değerlere sahiptir.

1. -141 dBm, SF12 BW 125 kHz'de
2. -127 dBm, SF7 BW 125 kHz'de
3. -111 dBm, FSK 50 kbps'de

Her teknoloji gibi LoRaWAN'ın da bazı açıkları bulunmaktadır.

1. Şifreleme: LoRaWAN, AES-128 bit şifreleme kullanır. Ancak daha güçlü şifreleme algoritmaları bulunmasına rağmen, bazı güvenlik uzmanları tarafından AES-128'in güvenliğine ilişkin endişeler dile getirilmektedir.
2. Kimlik Doğrulama: LoRaWAN, bir cihazın ağa katılmasına izin vermek için bir ön paylaşılmış anahtar (AppKey) kullanır. Bu anahtarın güvenli bir şekilde saklanması ve iletilmesi önemlidir. Ancak yanlış yapılandırma veya kötü niyetli saldırılar sonucunda anahtarın ele geçirilmesi riski vardır.
3. Radyo Frekansı Engelleme: LoRaWAN, genellikle ISM (Sanayi, Bilimsel, Tıbbi) bantları olarak bilinen lisanssız frekans bantlarında çalışır. Bu bantlar, diğer kablosuz cihazların kullanımıyla yoğun olabilir ve cihazların sinyal iletimini etkileyebilir.
4. Replay Saldırıları: Bir saldırgan, önceden kaydedilmiş bir iletiyi tekrar göndererek LoRaWAN ağını kandırabilir. Bu, güvenlik açığına yol açabilir ve veri bütünlüğünü tehlikeye atabilir.

Bu açıkların bazıları, uygun güvenlik önlemleri ve iyi bir yapılandırma ile ele alınabilir.

1. Şifreleme: AES-128 bit şifreleme yerine daha güçlü şifreleme algoritmalarını kullanmayı düşünebilirsiniz. Örneğin, AES-256 gibi daha güvenli algoritmalar tercih edilebilir.
2. Anahtar Yönetimi: Anahtarları güvenli bir şekilde saklamak ve iletme için güvenli anahtar yönetimi protokollerini kullanabilirsiniz. Anahtarları düzenli olarak değiştirmek de önemlidir.
3. Radyo Frekansı Engelleme: Diğer kablosuz cihazların kullanımı nedeniyle yaşanabilecek sorunları en aza indirmek için frekans planlaması yapılabilir. RF spektrum analizi kullanarak, mevcut frekansları izleyip yoğun olanları tespit edebilirsiniz.
4. Replay Saldırılarına Karşı Koruma: Mesajlara zaman damgası eklemek veya güvenlik açısından benzersiz kimlikler kullanmak gibi önlemler alabilirsiniz. Ayrıca, mesaj doğrulama (message integrity) mekanizmalarını kullanarak iletilerin bütünlüğünü kontrol edebilirsiniz.

İlgili tez çalışmasında gözlemlenen teknoloji açıkları ortaya çıkarılarak detayları belirtilmiş ve gelişmekte olan LoRaWAN ekosistemine yapılandırma ve iyileştirme önerileri, akademik katkı maksadıyla not düşülmüştür.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nesnelerin İnterneti (IoT) son yıllarda her alanda hayatımıza dahil olmuştur. Uzun menzillere, düşük güç tüketimi ile veri taşıma çözümlerinden ötürü LoRaWAN protokolü ile geliştirilen sistemler günden güne popülerlik kazanmıştır. Akıllı sayaçlar, güvenlik sistemleri, tarım izleme, akıllı ev ve şehirler başta olmak üzere birçok alanda, süreci hızlandırmak ve maliyetleri düşürmek adına LoRaWAN ağ yapısı genişlemeye devam etmektedir. Tek bir ağ geçidi maliyetiyle kurulan ekosisteme farklı tiplerde uç birimler ve sensörler dahil edilmektedir, bu sayede hem bireysel hem de kurumsal anlamda ağ topolojileri kurulmaktadır.

Bu tez çalışmasında LoRaWAN teknolojisine genel bir bakış sağlanarak ağ mimarisi detaylı olarak aktarılmıştır. Teknolojinin teknik imkanlarını anlayabileceğimiz ve enerji tüketimine hakim olabileceğimiz şekilde, sınıflandırma ve paket formları incelenmiştir. Ağ kurulumu aşamasında dikkat edilmesi gereken bölgesel sınırlamalar ve kullanıcının verilerini nasıl koruyabileceğini nitelendiren güvenlik anahtarlamaları belirtilmiştir. Akıllı şehir ya da ev senaryosu tasarlanarak, çeşitli sensörlerden veriler alınıp performans analizleri yapılmış ve ulaşan değerlerin nerede, nasıl ve hangi amaçla ekosisteme dahil edilebileceği gözlemlenmiştir.

LoRaWAN ağının sunduğu imkanlar sayesinde en dar bölgesel kapsamlardan, en geniş ağlara, evlerden, şehirlere bit ekosistem oluşturulup izleme imkanı sağlanabilmektedir. Tez uygulamasındaki sensörler sayesinde kullanım alanlarına geniş perspektif katılmıştır. Aynı ağ içerisinde konum takibi yapılırken eş zamanlı olarak sıcaklık, nem, sızıntı tespiti gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında kurulan sistemler şehir içi ve parazite açık bir ortamda yapılmıştır. Çeşitli konumlara yerleştirilen uç birim sensörleri A sınıfı güç tüketiminde verilerini ağ geçitlerine ileterek, ağ sunucusunda anlık olarak görüntülenmiştir. Ulaşılan verilerin performansları değerlendirildiğinde gecikme ve enerji tüketimi minimal seviyede kalmıştır. Ölçümler sonucu enerji tüketiminin esnekliği kullanıcılara uzun süreli sahada çalışan cihazlarla, müdahale yükünden kurtararak maliyet avantajı katmaktadır. Gelecekte bu protokolün daha gelişerek global yayılıma sahip kapsamaya ulaşacağını öngörmekteyiz.

## 7. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

- [1] <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference> (Erişim Tarihi: 20.10.2022)
- [2] Gufran B., 2022. Akıllı şehirler için LoRaWAN ağlarında makine öğrenimi tabanlı dış mekan konumlandırma tekniklerinin performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Ahmet Furkan A., 2022. LoRaWAN kablosuz haberleşme protokolünün güvenlik analizi ve lorawan kullanan IoT cihazlarına karşı yapılan saldırıların incelenmesi ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yalova.
- [4] İsmail Hakkı Ö., 2022. Lorawan teknolojisi kullanarak erken uyarı sistemi tasarımı ve uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- [5] Ali T., 2021. Tarımsal sulamada düşük maliyetli bir lorawan test platformu: Uygulama ve ölçümler. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis.
- [6] Bushra Fuaad K., 2021. Efficient energy management in smart homes using IoT- based low-power wide-area network (lorawan) protocol. Altınbas University Institute of Graduate Studies, MSc Thesis, İstanbul.
- [7] Gökçer Y., 2019. Improving the performance of LoRaWAN IoT System. Bogazici University Graduate Program in Computer Engineering, MSc Thesis, İstanbul.
- [8] Gürkan D., 2019. LoRaWAN kablosuz iletişim protokolünün incelenmesi ve bir IoT uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [9] Tuğrul Y., 2019. Smart spreading factor assignment for lorawans. İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, MSc Thesis, İstanbul.
- [10] Muhammet Talha B., 2019. LoRa ve LoRaWAN teknolojilerinde performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Mekki K, Bajic E, Chaxel F, Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express. 2019 Mar 1;5(1):1–7.
- [12] Askhedkar A, Chaudhari B, Zennaro M. Hardware and software platforms for low-power wide-area networks. LPWAN Technol IoT M2M Appl. 2020 Jan 1;397–407.

- [13] Semtech Corporation, LoRa™ Modulation Basics, AN1200.22, May 2015.
- [14] <https://www.antenna-theory.com/basics/friis.php> (Erişim Tarihi: 02.03.2023)
- [15] Jonathan de Carvalho Silva; Joel J. P. C. Rodrigues; Antonio M. Alberti; Petar Solic; Andre L. L. Aquino. LoRaWAN- A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities Conference Paper. 2017
- [16] Orion Afisiadis, A. Burg, Alexios Balatsoukas-Stimming, 2020. Coded LoRa Frame Error Rate Analysis. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). DOI:[10.1109/ICC40277.2020.9148806](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148806)
- [17] Congduc Pham, AHCÈNE BOUNCEUR, Laurent Clavier, Umber Noreen, and Muhammad Ehsan, 2019. Investigating and Experimenting Interference Mitigation by Capture Effect in LoRa Networks. In 3rd International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS '19), July 1-2 2019, Paris, France. ACM, New York, NY, USA, 6 pages. <https://doi.org/10.1145/3341325.3342022>
- [18] <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/> (Erişim Tarihi: 22.10.2022)
- [19] José S, Sanchez, Ramon S, Antonio S. LPWAN-Based Vehicular Monitoring Platform with a Generic IP Network Interface Jan.2019
- [20] <https://lora-alliance.org/about-lorawan/> (Erişim Tarihi: 27.10.2022)
- [21] <https://www.freertos.org/lorawan/index.html> (Erişim Tarihi: 27.10.2022)
- [22] Sornin, N. and Yegin, A. (2017). LoRaWAN 1.1 Specification, Technical Report, LoRa Alliance, Beaverton, Oregon, USA. Retrieved May 3, 2019, from <https://lora-alliance.org/sites/default/>
- [23] <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2022/11/rp002-1-0-4-regional-parameters.pdf> (Erişim Tarihi: 02.12.2022)
- [24] <https://lora.readthedocs.io/en/latest/> (Erişim Tarihi: 02.12.2022)
- [25] <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/148-lps8.html> (Erişim Tarihi: 12.12.2022)
- [26] <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/140-lg308.html> (Erişim Tarihi: 12.12.2022)
- [27] <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7268/Datasheet/#certification> (Erişim Tarihi: 12.12.2022)
- [28] <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/156-lt-22222-1.html> (Erişim Tarihi: 12.12.2022)
- [29] <https://www.dragino.com/products/temperature-humidity-sensor/item/151-lht65.html> (Erişim Tarihi: 12.12.2022)

- [30] <https://www.dragino.com/products/lorawan-nb-iot-door-sensor-water-leak/item/180-lwl02.html> (Erişim Tarihi: 12.12.2022)
- [31] <https://www.dragino.com/products/distance-level-sensor/item/161-ldds75.html> (Erişim Tarihi: 12.12.2022)
- [32] <https://www.dragino.com/products/lorawan-nb-iot-door-sensor-water-leak/item/181-lds02.html> (Erişim Tarihi: 14.12.2022)
- [33] <https://www.dragino.com/products/temperature-humidity-sensor/item/168-lsn50v2-d20.html> (Erişim Tarihi: 14.12.2022)
- [34] <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/159-lse01.html> (Erişim Tarihi: 15.12.2022)
- [35] <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/142-lgt-92.html> (Erişim Tarihi: 14.12.2022)
- [36] <https://www.thethingsnetwork.org/tech-stack#section1> (Erişim Tarihi: 14.12.2022)
- [37] <https://news.rakwireless.com/things-to-consider-when-picking-a-lorawan-gateway/> (Erişim Tarihi: 30.12.2022)
- [38] <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core> (Erişim Tarihi: 30.12.2022)

## 8. EKLER

### EK 1

```
function Decoder(bytes, port) {  
  // Decode an uplink message from a buffer  
  // (array) of bytes to an object of fields.  
  var latitude;//gps latitude,units: Â°  
  latitude=(bytes[0]<<24 | bytes[1]<<16 | bytes[2]<<8 | bytes[3])/1000000;//gps  
  latitude,units: Â°  
  var longitude;  
  longitude=(bytes[4]<<24 | bytes[5]<<16 | bytes[6]<<8 | bytes[7])/1000000;//gps  
  longitude,units: Â°  
  var alarm=(bytes[8] & 0x40)?"TRUE":"FALSE";//Alarm status  
  var batV=((bytes[8] & 0x3f) <<8 | bytes[9])/1000;//Battery,units:V  
  if((bytes[10] & 0xC0)==0x40)  
  {  
    var motion_mode="Move";  
  }  
  else if((bytes[10] & 0xC0) ==0x80)  
  {  
    motion_mode="Collide";  
  }  
  else if((bytes[10] & 0xC0) ==0xC0)  
  {  
    motion_mode="User";  
  }  
  else  
  {  
    motion_mode="Disable";  
  }  
  //mode of motion  
  var led_updown=(bytes[10] & 0x20)?"ON":"OFF";//LED status for position,uplink  
  and downlink
```

## EK 1

```
var Firmware = 160+(bytes[10] & 0x1f); // Firmware version; 5 bits
var roll=(bytes[11]<<24>>16 | bytes[12])/100; //roll,units: Â°
var pitch=(bytes[13]<<24>>16 | bytes[14])/100; //pitch,units: Â°
var hdop = 0;
if(bytes[15] > 0)
{
    hdop =bytes[15]/100; //hdop,units: Â°
}
else
{
    hdop =bytes[15];
}
var altitude =(bytes[16]<<24>>16 | bytes[17]) / 100; //Altitude,units: Â°
return {
Latitude: latitude,
Longitude: longitude,
Roll: roll,
Pitch: pitch,
BatV: batV,
ALARM_status: alarm,
MD: motion_mode,
LON: led_updown,
FW: Firmware,
HDOP: hdop,
Altitude: altitude,
};
}
```