# ENDÜSTRİYEL HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE LoRa ve LoRaWAN TEKNOLOJİSİNİN UYGULANMASI

Endüstri 4.0 Çerçevesinde Uzak Sensör Ağları,
Enerji Verimliliği ve Gerçek Zamanlı İzleme

**Derleme Makale / Review Article**

**Dr. Burak Olgun**
burakolgun@solutionhome.net
Solution Home Bilişim Tekn. ve Dan. Hizm., İstanbul

Anahtar Kelimeler: LoRa • LoRaWAN • Endüstriyel IoT • LPWAN • SX1276 • STM32 • Endüstri 4.0 • Kablosuz Sensör Ağı • MQTT • ChirpStack

www.burakolgun.com

## ÖZET

Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (Industrial IoT — IIoT) uygulamaları; enerji izleme, çevre takibi, akıllı tarım, altyapı denetimi ve üretim süreçleri gibi kritik alanlar için güvenilir, düşük enerjili ve uzun menzilli kablosuz haberleşme altyapısı gerektirmektedir. Geleneksel kablosuz teknolojilerinin (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee) sınırlı menzil ve yüksek enerji tüketimi sorunlarını aşmak amacıyla geliştirilen LoRa (Long Range) modülasyon tekniği ve üzerine inşa edilen LoRaWAN protokol yığını, son yıllarda endüstriyel haberleşme alanında öne çıkan tercih haline gelmiştir.

Bu çalışma; LoRa fiziksel katmanının teorik temellerini (Chirp Spread Spectrum — CSS modülasyon, Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate parametrelerini), LoRaWAN ağ mimarisini (Sınıf A/B/C cihaz tipleri, ağ sunucusu, uygulama sunucusu), SX1276 tabanlı donanım tasarımını, STM32 mikrodenetleyici entegrasyonunu, enerji optimizasyonu stratejilerini ve gerçek endüstriyel dağıtım senaryolarını ayrıntılı biçimde ele almaktadır. Semtech SX1276 transceiver yongasının 137 dBm alıcı hassasiyeti ile sağladığı link bütçesi açık alanda 15 km, şehir içinde 3–5 km menzil imkânı sunarken, derin uyku modunda 2 µA seviyesine inen enerji tüketimi 2000 mAh batarya ile yıllarca kesintisiz çalışma olanağı tanımaktadır.

Çalışmada ayrıca LoRaWAN ağ sunucusu yazılımları (The Things Network — TTN ve açık kaynaklı ChirpStack), MQTT veri entegrasyonu, gerçek zamanlı bulut görselleştirme ve endüstriyel SCADA sistemleriyle entegrasyon da ele alınmıştır. Sonuç olarak, LoRa/LoRaWAN teknolojisinin; bant genişliğinin sınırlı ancak mesafenin kritik olduğu endüstriyel ortamlarda, yüksek güvenilirlik ve kabul edilebilir maliyet dengesiyle uygulanabilir olduğu ortaya konulmuştur.


*Anahtar Kelimeler: LoRa, LoRaWAN, Endüstriyel IoT, LPWAN, SX1276, STM32, Endüstri 4.0, Kablosuz Sensör Ağı, MQTT, ChirpStack.*


## ABSTRACT

Industrial Internet of Things (IIoT) applications — including energy monitoring, environmental surveillance, smart agriculture, infrastructure inspection and manufacturing process control — demand reliable, low-power, long-range wireless communication infrastructure. Developed to overcome the limited-range and high-energy limitations of conventional wireless technologies (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee), the LoRa (Long Range) modulation technique and the LoRaWAN protocol stack built upon it have emerged as the preferred choice in industrial communication applications in recent years.

This study covers in detail the theoretical foundations of the LoRa physical layer (Chirp Spread Spectrum modulation, Spreading Factor, Bandwidth and Coding Rate parameters), LoRaWAN network architecture (Class A/B/C device types, network server, application server), SX1276-based hardware design, STM32 microcontroller integration, energy optimization strategies,


www.burakbgun.com

and real-world industrial deployment scenarios. The 137 dBm receiver sensitivity of the Semtech SX1276 transceiver chip offers 15 km range in open areas and 3–5 km in urban environments, while power consumption dropping to 2 µA in deep sleep mode enables years of continuous operation on a 2000 mAh battery.

*Keywords: LoRa, LoRaWAN, Industrial IoT, LPWAN, SX1276, STM32, Industry 4.0, Wireless Sensor Network, MQTT, ChirpStack.*

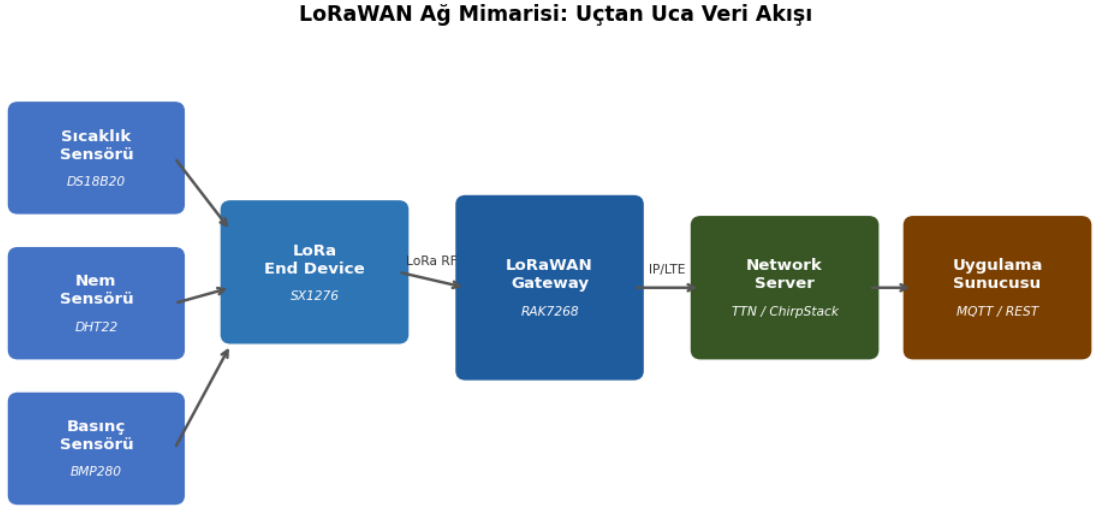
www.burakolgun.com

# 1. GİRİŞ

Küresel ölçekte hızlanan kentleşme, artan enerji talebinin yönetimi ve sanayi tesislerinin rekabet baskısı altında verimliliğini artırma zorunluluğu; makineler, sensörler ve bilgi sistemleri arasında kesintisiz veri akışı sağlayan bağlantı altyapısına olan ihtiyacı her geçen yıl derinleştirmektedir. Gartner araştırmalarına göre 2025 yılı itibarıyla bağlı IoT cihaz sayısının 75 milyarı aşması beklenmekte olup bu cihazların önemli bir bölümünü endüstriyel sensörler oluşturmaktadır.

Endüstriyel haberleşme teknolojileri tarihsel olarak kablolu sistemler — özellikle RS-485, Modbus, PROFIBUS ve daha sonra Ethernet tabanlı PROFINET ve EtherNet/IP — üzerine kurulmuştur. Bu sistemler yüksek güvenilirlik ve belirlenimci (deterministic) gecikme karakteristikleri sunarken, kurulum maliyeti, kablo altyapısı ve esneklik eksikliği açısından önemli kısıtlara sahiptir. Kablosuz alternatiflerin endüstriyel ortama girişi 2000'li yılların başında ISM bandında çalışan ZigBee ve WirelessHART ile başlamış; ancak bu protokoller menzil kısıtları nedeniyle geniş alan uygulamalarında yetersiz kalmıştır.

LoRa (Long Range) modülasyon tekniği, Semtech Corporation tarafından 2012 yılında geliştirilen ve 2013'te tescillenen bir mülkiyet teknolojisidir. Chirp Spread Spectrum (CSS) modülasyon ilkesine dayanan LoRa, konvansiyonel dar bant modülasyonların ulaşamadığı mesafelerde güvenilir veri iletimi sağlamaktadır. 2015 yılında IBM, Semtech ve Actility iş birliğiyle LoRa Alliance kuruluşunun oluşturulması ve LoRaWAN protokol standardının yayımlanmasıyla birlikte LoRa, lisanssız ISM bantlarında çalışan küresel bir standart haline gelmiştir.




*Şekil 1. LoRaWAN Ağ Mimarisi: Uçtan uca veri akışı — sensör düğümünden uygulama sunucusuna kadar her bileşen.*

Bu çalışma; LoRa fiziksel katmanının matematiksel temellerinden başlayarak LoRaWAN protokol yığınını, SX1276 transceiver donanımını ve STM32 tabanlı son düğüm tasarımını,

farklı endüstriyel dağıtım senaryolarını ve enerji optimizasyon stratejilerini kapsamlı biçimde ele almaktadır. Amaç; mühendis ve teknik okuyucuya hem kuramsal zemin hem de doğrudan uygulanabilir tasarım kılavuzu sunmaktır.

Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de LPWAN teknolojileri karşılaştırmalı biçimde incelenmektedir. Bölüm 3'te LoRa modülasyonunun teorik temelleri açıklanmaktadır. Bölüm 4'te LoRaWAN protokol mimarisi ele alınmaktadır. Bölüm 5'te SX1276 transceiver entegrasyon detayları verilmektedir. Bölüm 6'da STM32 tabanlı son düğüm tasarımı anlatılmaktadır. Bölüm 7'de enerji optimizasyonu stratejileri tartışılmaktadır. Bölüm 8'de ağ sunucusu yazılımları ve bulut entegrasyonu ele alınmaktadır. Bölüm 9'da endüstriyel dağıtım senaryoları sunulmaktadır. Bölüm 10'da güvenlik konuları incelenmektedir. Bölüm 11'de tartışma ve sonuçlar yer almaktadır.

www.burakolgun.com

# 2. LPWAN TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ

## 2.1 Düşük Güçlü Geniş Alan Ağlarına (LPWAN) Genel Bakış

Düşük Güçlü Geniş Alan Ağı (Low-Power Wide-Area Network — LPWAN), menzil ve enerji tüketimi açısından geleneksel mobil ağlar ile kısa menzilli kablosuz teknolojiler arasında konumlanan bir haberleşme paradigmasıdır. LPWAN'ın üç temel tasarım hedefi şunlardır: (i) geniş kapsama alanı (açık alanda 10–50 km, şehir içinde 2–10 km); (ii) düşük enerji tüketimi (pil ömrü hedefi 5–10 yıl); (iii) düşük veri hızı (tipik olarak 0.3–50 kbps). Bu üç hedef birbirini dengeler: enerji verimliliği ve geniş kapsama, kaçınılmaz olarak düşük veri hacmini gerektirir. Endüstriyel sensör uygulamalarının büyük çoğunluğu (sıcaklık, nem, titreşim, doluluk seviyesi vb.) dakikada ya da saatte bir küçük veri paketleri (10–50 byte) ilettiğinden, bu kısıtlama pratikte ciddi bir engel teşkil etmemektedir.

LPWAN pazarında günümüz itibarıyla rekabet eden başlıca teknolojiler şunlardır: LoRa/LoRaWAN (Semtech/LoRa Alliance), Sigfox (Sigfox SA), NB-IoT ve LTE-M (3GPP standardı, lisanslı bant) ve Weightless-P. Her teknolojinin güçlü ve zayıf yönleri, hedeflediği uygulama alanlarına göre belirginleşmektedir.

**Tablo 5. Endüstriyel Kablosuz Protokol Karşılaştırması**

| Protokol | Frekans | Menzil (açık alan) | Veri Hızı | Güç Tüketimi | Topoloji | Endüstriyel Uygunluk |
|---|---|---|---|---|---|---|
| LoRa/LoRaWAN | 433/868/915 MHz | 2–15 km | 0.3–50 kbps | Çok Düşük | Yıldız | ★★★★★ |
| Zigbee (802.15.4) | 2.4 GHz | 10–100 m | 250 kbps | Düşük | Mesh | ★★★★☆ |
| Wi-Fi (802.11n) | 2.4/5 GHz | 50–150 m | 300 Mbps | Yüksek | Altyapı | ★★★☆☆ |
| NB-IoT | 700–900 MHz | 1–10 km | 20–250 kbps | Düşük | Hücresel | ★★★★☆ |
| Bluetooth LE | 2.4 GHz | 10–50 m | 1 Mbps | Çok Düşük | P2P/Mesh | ★★★☆☆ |
| Wired (RS-485) | Kablolu | 1.2 km | 10 Mbps | Orta | Bus | ★★★★★ |

*Şekil 2. Endüstriyel kablosuz protokol karşılaştırma tablosu — menzil, veri hızı, güç tüketimi ve topoloji açısından.*

## 2.2 LoRa ile NB-IoT Karşılaştırması

LoRa ve NB-IoT arasındaki temel ayrım altyapı bağımlılığı üzerinedir. NB-IoT, mevcut 4G/5G baz istasyonu altyapısını kullanır; bu, geniş kapsama alanına düşük donanım yatırımıyla ulaşmayı mümkün kılar. Ancak operatöre bağımlı abonelik modeli, uzun vadeli toplam sahip olma maliyetini (TCO) artırabilir. Buna karşın LoRa, kullanıcının kendi ağını kurmasına olanak tanıyan özel (private) ağ senaryolarında üstünlük sağlar. Bir fabrika veya geniş tarım arazisi için kurulan özel LoRaWAN ağı; abonelik ücreti gerektirmemesi, veri gizliliği ve çevrimdışı çalışabilme yetenekleri nedeniyle NB-IoT'ye kıyasla tercih edilir hale gelmektedir.

Bant genişliği açısından değerlendirildiğinde NB-IoT, 200 kHz kanalda teorik olarak 250 kbps downlink hızı sunabilirken LoRa SF7/BW500 yapılandırmasında 21.9 kbps ile sınırlı kalır. Ancak endüstriyel sensör uygulamalarında bu hız farkı operasyonel açıdan anlamsızlaşır; sıcaklık verisi için 5 kbps bile yeterlidir. Sinyal penetrasyon gücü (bina, zemin altı) açısından LoRa'nın CSS modülasyonu, derin yerleşik sensörlerle (su sayacı, yeraltı tankı) kullanımda NB-IoT'ye kıyasla avantaj sağlar.

## 2.3 Sigfox ile Karşılaştırma

Sigfox, Ultra Narrow Band (UNB) modülasyonu kullanarak 100 Hz kanalda son derece yüksek spektral verimlilik elde eder. 192.000 kHz bant genişliğindeki ISM bandında binlerce eş zamanlı kanala olanak tanıyan bu yaklaşım, gürültüye dayanıklılık açısından LoRa'nın gerisinde kalmaktadır. Daha önemli bir dezavantaj, Sigfox'un kapalı operatör modeli nedeniyle özel ağ kurulumuna olanak vermemesidir. Sigfox ağının bulunmadığı coğrafyalarda (ki Türkiye'nin kırsal bölgelerinin büyük çoğunluğu buna dahildir) tamamen yetersiz kalır. LoRa tabanlı özel ağlar bu boşluğu birkaç uygun maliyetli gateway ile doldurabilmektedir.

| Kriter | LoRa/LoRaWAN | NB-IoT | Sigfox |
|---|---|---|---|
| Frekans Bandı | 433/868/915 MHz (ISM) | 700-900 MHz (Lisanslı) | 868/915 MHz (ISM) |
| Menzil (açık alan) | 2–15 km | 1–10 km | 3–50 km |
| Veri Hızı | 0.3–50 kbps | 20–250 kbps | 100 bps |
| Mesaj/Gün Limiti | Sınırsız (özel ağ) | Sınırsız | 140 uplink / 4 downlink |
| Özel Ağ Kurulumu | Evet | Hayır | Hayır |
| Batarya Ömrü | 5–10 yıl | 5–10 yıl | 5–10 yıl |
| Roaming | LoRa Alliance üyesi ağlar | Global (4G coverage) | Sınırlı |

*Tablo 1. LoRa/LoRaWAN, NB-IoT ve Sigfox teknolojilerinin karşılaştırması.*

www.

# 3. LoRa FİZİKSEL KATMAN: MODÜLASYON TEORİSİ

## 3.1 Chirp Spread Spectrum (CSS) Modülasyon İlkesi

LoRa'nın en önemli ayırt edici özelliği, Chirp Spread Spectrum (CSS) modülasyon tekniğini kullanmasıdır. Konvansiyonel FSK veya GFSK modülasyonlardan farklı olarak CSS, veriyi geniş bir bant genişliğine çeşitli hız ve faz değişimli sinüs sinyalleri (chirp) kullanarak yayar. Temel chirp, sinyal frekansının zaman içinde doğrusal olarak arttığı ya da azaldığı bir sinyaldir. Up-chirp'te frekans düşükten yükseğe, down-chirp'te ise yüksekten düşüğe doğrusal şekilde taranır.

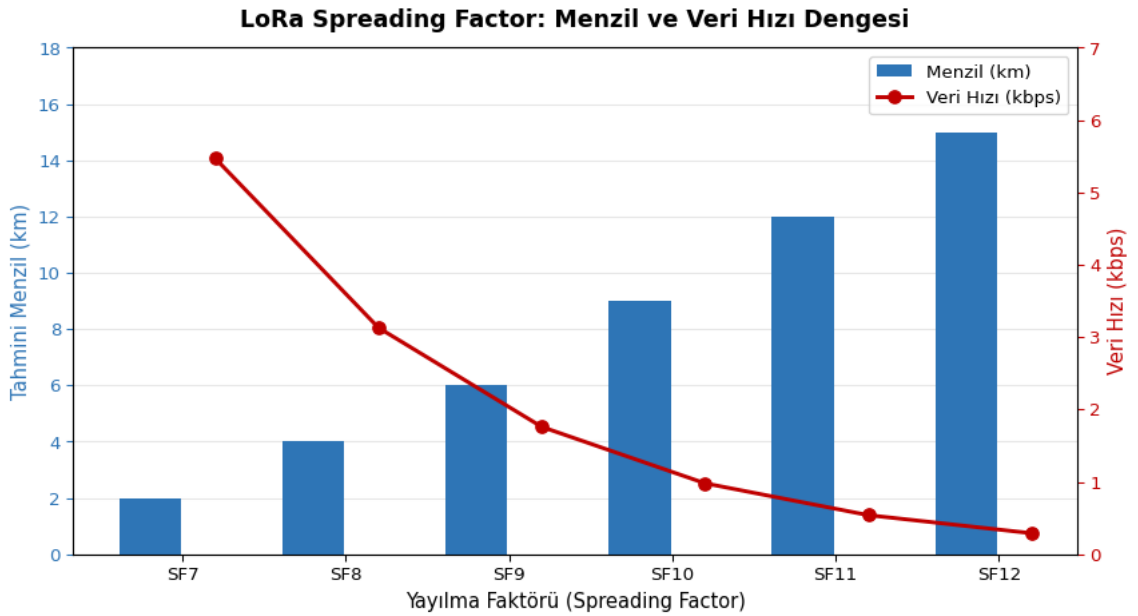
Semboller, up-chirp başlangıç fazı ve frekans sapma noktaları kontrol edilerek kodlanır. Bu yaklaşımın üç kritik avantajı vardır: (i) Gürültüye dayanıklılık: CSS sinyali, gürültü bandının çok altında (negatif SNR değerlerinde, teorik olarak -20 dB SNR'da bile) alınabilmektedir. Geleneksel FSK alıcısı bu koşulda işlevini yitirir. (ii) Çoklu yol (multipath) etkisine direnç: CSS, frekansı sürekli değiştirdiği için multipath fading'e karşı inherent bağışıklık sağlar. (iii) Doppler kaymasına direnç: Sabit frekanslı sinyallerde kritik olan Doppler etkisi, CSS için yalnızca küçük bir zaman kaymasına dönüşür ve kolayca düzeltilebilir.

## 3.2 Spreading Factor (SF) ve Parametrelerinin Etkisi

Spreading Factor (SF), LoRa modülasyonunun en kritik parametresidir. SF7'den SF12'ye kadar altı değer alır; değer arttıkça her sembol 2^SF chirp içerir. Somutlaştırmak gerekirse: SF7'de bir sembol 128 chirp, SF12'de ise 4096 chirp içermektedir. Bu durum iki ters yönlü etkiye yol açar: yüksek SF daha yüksek link bütçesi (daha uzun menzil, daha derin bina penetrasyonu) sağlarken havada geçirdiği süre (time-on-air) dramatik biçimde artar. SF12'deki bir paket, SF7'ye kıyasla yaklaşık 50 kat daha uzun süre kanalı meşgul eder.

Bandwidth (BW) parametresi de menzil ve veri hızı üzerinde belirleyici rol oynar. LoRa'da standart BW değerleri 125 kHz, 250 kHz ve 500 kHz'dir. Geniş bant genişliği daha yüksek veri hızı sağlar; dar bant ise daha düşük gürültü tabanına ve dolayısıyla daha iyi alıcı hassasiyetine olanak tanır. Coding Rate (CR) ise forward error correction (FEC) oranını belirler: CR4/5, CR4/6, CR4/7, CR4/8 arasında seçim yapılabilir. CR4/8'de her 4 bit veri için 4 bit hata düzeltme biti eklenir; bu link kalitesini artırır ancak veri hızını yarıya indirir.

www.burakogun.com



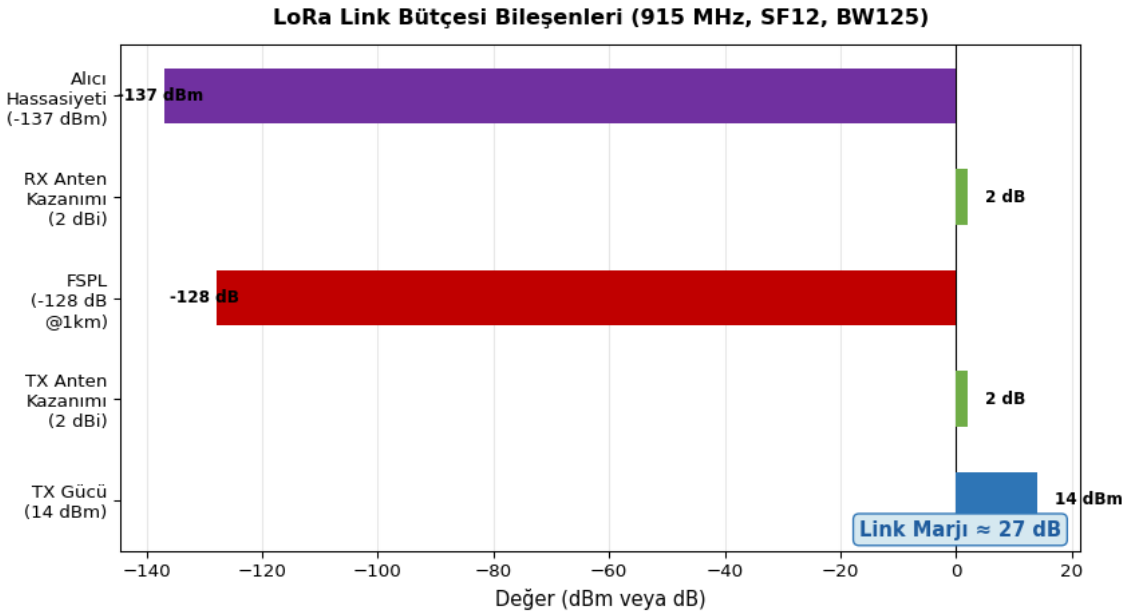

*Şekil 3. LoRa Spreading Factor değerlerine göre menzil ve veri hızı dengesi. SF7 en hızlı veri iletimini, SF12 en uzun menzili sağlar.*

### 3.3 Link Bütçesi Hesabı

LoRa bağlantısının menzil kapasitesi, link bütçesi hesabı ile tahmin edilir. Temel formül şöyledir: Link Marjı = EIRP + Alıcı Hassasiyeti + Kazanımlar - Kayıplar. Burada EIRP (Effective Isotropic Radiated Power), verici gücü artı anten kazanımını; alıcı hassasiyeti ise minimum algılanabilir sinyal seviyesini ifade eder. SX1276'nın SF12/BW125 yapılandırmasında alıcı hassasiyeti -137 dBm'dir; bu değer, geleneksel FSK alıcıların 10–15 dB önündedir.

Avrupa'da kullanılan 868 MHz bandında maksimum anten güç çıkışı yasal olarak +14 dBm (25 mW) ile sınırlıdır. 2 dBi kazanımlı basit bir anten varsayımıyla EIRP = 14 + 2 = 16 dBm olur. Serbest uzay yol kaybı (FSPL) 1 km için yaklaşık 92 dB'dir (FSPL = 20 log(d) + 20 log(f) + 20 log(4π/c) formülüyle). Bu değerler kullanılarak minimum link marjı hesaplaması: 16 - 92 + (-137) = -213 dBm değil, daha doğru ifade etmek gerekirse; Alınan Güç = EIRP - FSPL = 16 - 92 = -76 dBm olur. Hassasiyet sınırı -137 dBm olduğundan link marjı = -76 - (-137) = 61 dB elde edilir. Bu olağanüstü marj, binanın içinde, bodrum katlarda veya yeraltı tesislerinde ciddi ek kayıplar yaşansa bile haberleşmenin sürdürülmesini mümkün kılar.

www.burakogun




*Şekil 4. LoRa link bütçesi bileşenleri — 915 MHz, SF12, BW125 yapılandırması için hesaplanan marj değerleri.*

## 3.4 Kanal Planlaması ve Duty Cycle Kısıtı

Avrupa'daki ISM bantları (863–870 MHz), radyo düzenleyici kuruluş ETSI tarafından belirlenmiş duty cycle kısıtlamalarına tabidir. Duty cycle, bir vericinin belirli bir zaman penceresi içinde kanalı meşgul edebileceği maksimum oranı ifade eder. 868 MHz bandının büyük bölümünde bu oran %1'dir; yani cihaz her 100 saniyenin en fazla 1 saniyesini iletimde geçirebilir. Bu kısıtlama, yüksek SF'li (uzun time-on-air) iletimler için önemli bir tasarım kısıtı oluşturur. SF12/BW125'te 50 byte'lık bir paketin time-on-air değeri yaklaşık 2.8 saniyedir; bu da her iletim için 280 saniyelik bekleme zorunluluğu anlamına gelir. Dolayısıyla yüksek güncelleme frekansı gerektiren uygulamalarda SF7 veya SF8 kullanımı ya da birden fazla kanalın dönüşümlü kullanımı tercih edilmelidir.

| SF | BW (kHz) | Veri Hızı (bps) | Hassasiyet (dBm) | Time-on-Air 50B (ms) | Menzil (açık alan) |
|---|---|---|---|---|---|
| SF7 | 125 | 5.469 | -123 | 102 | ~2 km |
| SF8 | 125 | 3.125 | -126 | 184 | ~4 km |
| SF9 | 125 | 1.758 | -129 | 329 | ~6 km |
| SF10 | 125 | 977 | -132 | 659 | ~9 km |
| SF11 | 125 | 537 | -134 | 1.319 | ~12 km |
| SF12 | 125 | 293 | -137 | 2.793 | ~15 km |

*Tablo 2. LoRa SF ve BW kombinasyonlarına göre temel performans parametreleri.*

# 4. LoRaWAN PROTOKOL MİMARİSİ

## 4.1 Katmanlı Ağ Yapısı

LoRaWAN, LoRa fiziksel katmanı üzerine inşa edilmiş bir MAC (Medium Access Control) protokolüdür. LoRa Alliance tarafından tanımlanan standart, aşağıdaki katmanlardan oluşur: (i) Fiziksel Katman (PHY): CSS modülasyonu, frekans, güç ve SF parametreleri. (ii) MAC Katmanı: Cihaz bağlantısı, mesaj çerçeveleme, ADR (Adaptive Data Rate), güvenlik ve sınıf yönetimi. (iii) Uygulama Katmanı: Uç uygulama protokolleri, payload formatı ve iş mantığı.

Ağ topolojisi yıldız (star-of-stars) mimarisini temel alır. Son düğümler (end nodes) doğrudan ağ geçitleri (gateway) ile haberleşir; ağ geçitleri ise arka uç ağ sunucusu (network server) ile IP ağı üzerinden bağlantı kurar. Bu mimaride ağ geçitleri yalnızca katman-2 işlevleri üstlenir: alınan LoRa çerçevelerini IP paketlerine kapsüller ve ağ sunucusuna iletir. Karmaşık protokol işleme ve cihaz yönetimi tamamen ağ sunucusunda gerçekleştirilir. Bu tasarım, düşük maliyetli ve basit gateway donanımlarının kullanımını mümkün kılar.

## 4.2 Cihaz Sınıfları: A, B ve C

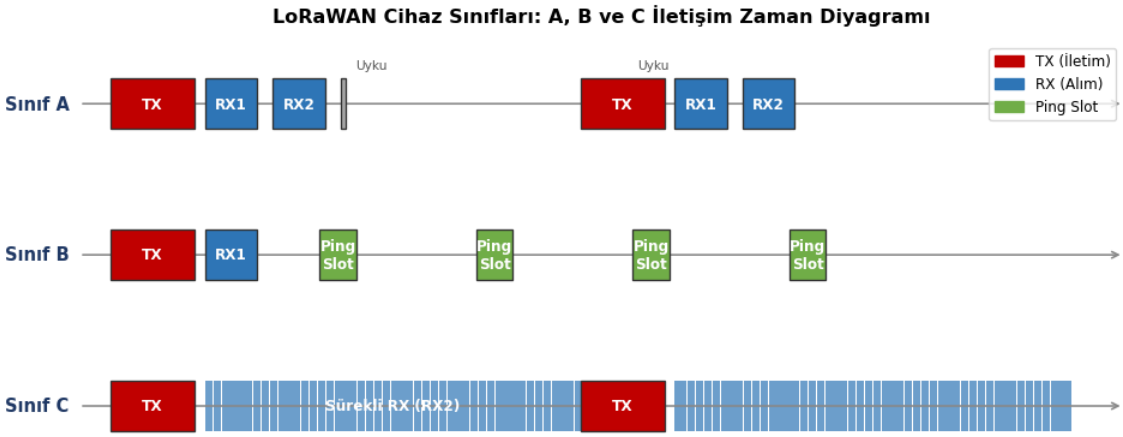
LoRaWAN standardı, farklı uygulama gereksinimlerine göre üç cihaz sınıfı tanımlar. Her sınıf, downlink (ağ → cihaz yönünde) veri alımı için farklı bir strateji benimser ve güç tüketimi açısından belirgin farklılıklar taşır.

Sınıf A (All), tüm LoRaWAN cihazlarının uygulamak zorunda olduğu temel sınıftır. Bir uplink iletiminin hemen ardından iki kısa downlink alım penceresi açılır: RX1, iletimden 1 saniye; RX2, iletimden 2 saniye sonra. Ağ sunucusu bu iki pencereden birini downlink için kullanabilir. Her iki pencere boş geçerse downlink gönderimi bir sonraki uplink iletimini beklemelidir. Bu kısıtlama en düşük güç tüketimini sağlar çünkü cihaz iletim ve alım pencereleri dışında tamamen uyku moduna geçebilir.

Sınıf B (Beacon), Sınıf A'ya ek olarak periyodik ping slotları ekler. Gateway'ler her 128 saniyede bir GPS'e senkronize beacon yayınlar; Sınıf B cihazlar bu beacon'a göre zamanlanmış downlink pencerelerini açar. Bu yöntem, ağın öngörülebilir aralıklarla downlink göndermesine olanak tanır ancak beacon alımı için ek enerji harcar. Sınıf B, aktüatör kontrolü gibi orta gecikme gerektiren uygulamalar için uygundur.

Sınıf C (Continuous), en yüksek güç tüketen sınıftır. Cihaz iletim anları dışında sürekli alım modunda kalır, böylece network serverdan gelen downlink mesajlar neredeyse gerçek zamanlı olarak iletilir. Sınıf C tipik olarak şebeke gücüne bağlı cihazlarda (priz bağlantılı aktüatörler, akıllı şebeke ekipmanları) kullanılır.

www.burakolgun.com




*Şekil 5. LoRaWAN cihaz sınıfları A, B ve C iletişim zaman diyagramı. Sınıf A en düşük güç tüketimini, Sınıf C en hızlı downlink yanıtı sunar.*

## 4.3 OTA ve ABP Aktivasyon Yöntemleri

LoRaWAN'da bir son düğümün ağa katılması için iki aktivasyon yöntemi tanımlanmıştır. Over-The-Air Activation (OTAA), cihazın her seferinde şifreli bir ağa katılma (join) prosedürü gerçekleştirdiği dinamik yöntemdir. Cihaz, AppEUI ve DevEUI kimlik bilgilerini ve AppKey şifreleme anahtarını içeren JoinRequest mesajı gönderir; ağ sunucusu kimlik doğrulaması yaparak her oturum için yeni NwkSKey ve AppSKey oturum anahtarları türetir. Bu yaklaşım, her oturum için farklı şifreleme anahtarları kullandığından en yüksek güvenliği sağlar.

Activation by Personalization (ABP) ise oturum anahtarlarının (NwkSKey, AppSKey) ve DevAddr'in doğrudan cihaza yazıldığı statik yöntemdir. Join prosedürü yoktur; cihaz doğrudan veri gönderebilir. Bu yöntem düşük gecikme avantajı sunar ancak sabit anahtarlar güvenlik açısından risk taşır ve anahtarların ele geçirilmesi durumunda yenilenmesi karmaşık hale gelir. Güvenlik gereksinimlerinin düşük olduğu, kapalı özel ağ uygulamalarında tercih edilebilir.

## 4.4 Adaptive Data Rate (ADR) Mekanizması

Adaptive Data Rate (ADR), LoRaWAN'ın kanal koşullarına göre SF ve güç parametrelerini otomatik olarak optimize eden mekanizmasıdır. ADR etkinleştirildiğinde ağ sunucusu, son 20 uplink mesajının sinyal kalitesi verilerini (RSSI ve SNR) izler. SNR marjı yeterince yüksekse (örneğin -5 dB gerekli iken -2 dB alınıyorsa) sunucu, cihaza daha düşük SF veya daha az TX gücü kullanmasını söyler. Bu mekanizma ağ kapasitesini artırır: daha düşük SF'li cihazlar kanalı daha kısa süre meşgul eder ve diğer cihazlara daha fazla hava süresi bırakır. Endüstriyel uygulamalarda ADR, sabit konumlu sensörler için idealdir; hareketli cihazlarda ise dinamik kanal koşulları nedeniyle ADR devre dışı bırakılmalıdır.

# 5. SX1276 TRANSCEIVER: DONANIM MİMARİSİ VE ENTEGRASYON

## 5.1 SX1276 Yonga Mimarisi

Semtech SX1276, LoRa modülasyonunu gerçekleştiren özel entegre devre olup endüstride en yaygın kullanılan LoRa transceiver yongasıdır. Yonga 137 mW RX güç tüketimi, 120 mW TX güç tüketimi (13 dBm) ile 137 dBm alıcı hassasiyeti sunmaktadır. Frekans aralığı 137–1020 MHz'i kapsar ve hem LoRa hem de FSK modülasyon modlarını destekler.

SX1276'nın iç yapısı şu bloklardan oluşur: RF ön uç (LNA, PA ve T/R anahtarı); Frekans sentezleyici (frekans adımı 61 Hz); ADC/DAC (12-bit, 9.6 MS/s); DSP bloğu (CSS modülatör/demodülatör, FEC kodlayıcı/çözücü, whitening ve CRC); SPI ara yüzü (MCU'ya bağlantı için); DIO pinleri (6 adet yapılandırılabilir dijital giriş/çıkış, kesme sinyalleri için). FIFO tamponu 256 byte olup TX ve RX arasında paylaşılır. Maksimum TX çıkış gücü, entegre PA Boost pininin kullanılması durumunda +20 dBm'e ulaşmaktadır.

## 5.2 SX1276 Konfigürasyon Kayıtları

SX1276 tüm parametreleri SPI üzerinden yazılabilir/okunabilir 8-bit kayıtlarla yönetilir. Temel konfigürasyon akışı şu adımları içerir: (i) Uyku moduna geçiş ve LoRa modu seçimi (RegOpMode = 0x81); (ii) Frekans ayarı (RegFrfMsb/Mid/Lsb üçlüsü); (iii) Modem yapılandırması (SF, BW, CR, implicit/explicit header); (iv) TX güç ayarı (RegPaConfig); (v) Preamble uzunluğu (tipik 8); (vi) CRC etkinleştirme. Aşağıda temel kayıt yazım örnekleri verilmektedir.

```
// SX1276 temel başlatma — STM32 HAL SPI ile
void SX1276_Init(void) {
  // 1. Uyku moduna geç + LoRa seç
  SX1276_WriteReg(REG_OP_MODE, 0x00);   // Sleep
  HAL_Delay(10);
  SX1276_WriteReg(REG_OP_MODE, 0x80);   // LoRa + Sleep

  // 2. Frekans: 868.1 MHz
  // Frf = 868.1e6 / (32e6/2^19) = 14222516
  SX1276_WriteReg(REG_FRF_MSB, 0xD9);   // 0xD9088A
  SX1276_WriteReg(REG_FRF_MID, 0x06);
  SX1276_WriteReg(REG_FRF_LSB, 0x66);

  // 3. Modem Config: SF9, BW 125kHz, CR 4/5, implicit hdr off
  SX1276_WriteReg(REG_MODEM_CONFIG1, 0x72); // BW=125k, CR=4/5
  SX1276_WriteReg(REG_MODEM_CONFIG2, 0x94); // SF=9, CRC on
  SX1276_WriteReg(REG_MODEM_CONFIG3, 0x04); // LNA Gain auto

  // 4. PA Boost, +14 dBm
  SX1276_WriteReg(REG_PA_CONFIG, 0x8F);
```

www.burakozdin.com

```
  // 5. Preamble 8 sembol
  SX1276_WriteReg(REG_PREAMBLE_MSB, 0x00);
  SX1276_WriteReg(REG_PREAMBLE_LSB, 0x08);

  // 6. Stand-by moda geç
  SX1276_WriteReg(REG_OP_MODE, 0x81);   // Standby
}
```

## 5.3 TX ve RX İşlem Akışı

Veri iletim akışı standart bir SPI master-slave ilişkisini izler. MCU FIFO tamponuna veriyi yazar, TX modunu başlatır ve DIO0 pini üzerinden 'TX Done' kesimine kadar bekler ya da düzenli aralıklarla RegIrqFlags kaydını sorgular. Aşağıda TX gönderimi için basit bir C fonksiyonu verilmiştir:

```
// Veri gönder (polling tabanlı)
HAL_StatusTypeDef SX1276_Send(uint8_t *data, uint8_t len) {
  if (len > 255) return HAL_ERROR;

  // FIFO TX tabanına konumlan
  SX1276_WriteReg(REG_FIFO_ADDR_PTR,
    SX1276_ReadReg(REG_FIFO_TX_BASE_ADDR));

  // Uzunluk yaz
  SX1276_WriteReg(REG_PAYLOAD_LENGTH, len);

  // Veriyi FIFO'ya yaz
  for (uint8_t i = 0; i < len; i++)
    SX1276_WriteReg(REG_FIFO, data[i]);

  // TX modunu başlat
  SX1276_WriteReg(REG_OP_MODE, MODE_LORA_TX);

  // TX Done bekle (timeout: 5 sn)
  uint32_t t0 = HAL_GetTick();
  while (!(SX1276_ReadReg(REG_IRQ_FLAGS) & IRQ_TX_DONE)) {
    if (HAL_GetTick() - t0 > 5000) return HAL_TIMEOUT;
  }
  // Flag temizle
  SX1276_WriteReg(REG_IRQ_FLAGS, IRQ_TX_DONE);
  SX1276_WriteReg(REG_OP_MODE, MODE_LORA_STDBY);
  return HAL_OK;
```

www.burakolgun.com

```
}
```

## 5.4 Anten Tasarımı ve Eşleşme

SX1276'nın RF performansının tam anlamıyla kullanılabilmesi için anten ve empedans eşleştirme devresinin doğru tasarlanması şarttır. SX1276 RF çıkışı 50 Ω nominal empedans sunar. Baskılı devre kartı üzerinde koplanar dalga kılavuzu (CPW) veya mikro-şerit (microstrip) hattı ile SMA konektörüne iletilmelidir. FR4 malzemeli PCB'de 50 Ω hat için tipik hat genişliği 1.6 mm kalınlıkta yaklaşık 2.8 mm'dir.

868 MHz için en yaygın anten seçeneği çeyrek dalga boyu dikey antenidir (λ/4 monopole). 868 MHz'de λ/4 ≈ 86.4 mm uzunluğundadır. Zemin düzlemi olan bir devrede bu anten yaklaşık 0 dBi kazanım sunar ve VSWR < 1.5 kolayca elde edilir. Daha kompakt tasarımlarda PIFA (Planar Inverted-F Antenna) veya hazır çip anten (örn. Molex 2137120100) tercih edilebilir; ancak bu seçenekler kazanım açısından monopol antene kıyasla 2–3 dB geride kalır. Uzun menzil gereken uygulamalarda 5 dBi kazanımlı yagi veya 8 dBi kazanımlı omni anten gateway tarafında kullanılır.

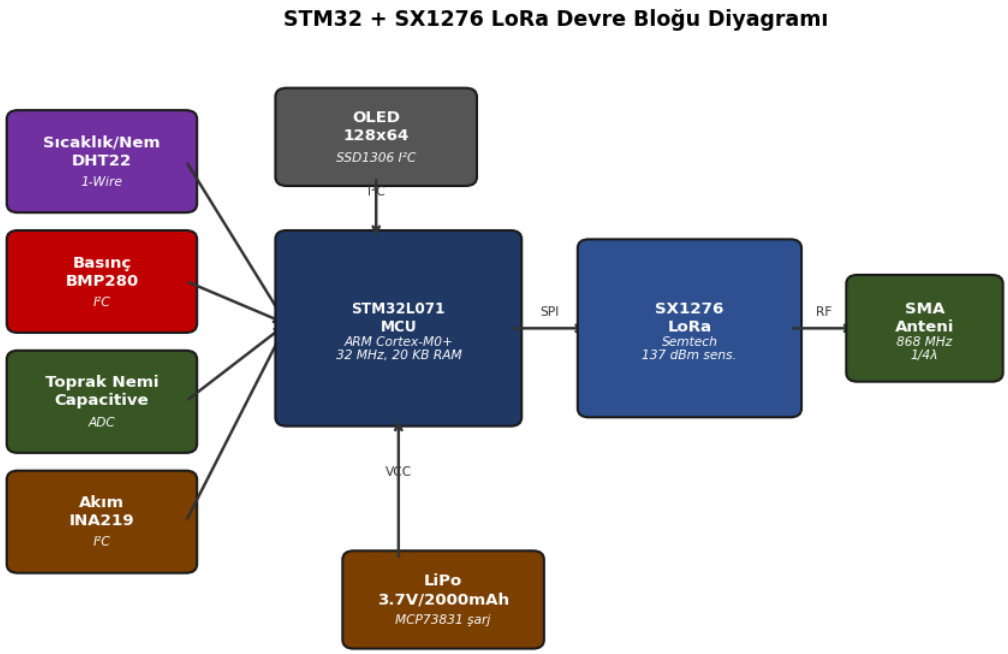
www.burakolgun.com

# 6. STM32 TABANLI SON DÜĞÜM TASARIMI

## 6.1 Donanım Seçimi ve Güç Optimizasyonu

STM32 mikrodenetleyici ailesi, LoRa son düğüm tasarımı için güç verimliliği ve işlem gücü dengesini optimum biçimde sunar. Bu çalışmada STM32L071 (Ultra-Low-Power seri) tercih edilmiştir. STM32L071'in seçim gerekçeleri şunlardır: derin uyku modunda 0.4 µA standby akımı; 32 MHz ARM Cortex-M0+ çekirdek ile SPI, I²C, UART, ADC gibi tüm gerekli çevre birimlerini barındırması; 192 KB Flash ve 20 KB SRAM; geniş giriş voltaj aralığı (1.65–3.6 V) sayesinde LiPo pil ile doğrudan çalışabilmesi.

Güç verimliliği, pil ömrünü doğrudan belirlediğinden devre tasarımının her aşamasında önceliklendirilmesi gerekir. Kritik tedbirler şunlardır: kullanılmayan GPIO'ların analog modda bırakılması (floating digital girişler leakage akımı oluşturur); harici bileşenler (sensörler, LED) için enerji yönetimli güç hattı oluşturulması (MOSFET anahtar ile MCU GPIO'sundan kontrol); SX1276'nın uyku modunda tutulması ve yalnızca iletim anında aktive edilmesi; ADC referans voltajının ölçüm arasında kapatılması.




*Şekil 6. STM32L071 + SX1276 son düğüm blok diyagramı. Sensörler I²C/UART/ADC üzerinden MCU'ya, SX1276 SPI üzerinden bağlanır.*

## 6.2 Sensör Entegrasyonu

Endüstriyel uygulamalarda en yaygın ölçüm parametreleri sıcaklık, nem, basınç, titreşim, akım, voltaj ve çevre ışığıdır. Her parametre için uygun sensör seçimi ve arayüz tasarımı kritik önem taşır. I²C veri yolu (400 kHz fast-mode), çok sayıda sensörün yalnızca iki GPIO pini (SDA ve SCL) ile bağlanabilmesi avantajı sunar. BMP280 (basınç/sıcaklık), SHT31 (nem/sıcaklık), MPU6050 (ivme/jiroskop) ve INA219 (akım/güç ölçer) bu kategoride yaygın kullanılan endüstriyel sınıf sensörlerdir.

```
// DHT22 nem/sıcaklık okuma (1-Wire benzeri protokol)
```

```
typedef struct {
  float temperature; // °C
  float humidity;    // %RH
  uint8_t valid;
} DHT22_Data_t;

DHT22_Data_t DHT22_Read(GPIO_TypeDef *port, uint16_t pin) {
  DHT22_Data_t result = {0, 0, 0};
  uint8_t data[5] = {0};

  // Başlatma: 18 ms low, sonra high bırak
  HAL_GPIO_WritePin(port, pin, GPIO_PIN_RESET);
  HAL_Delay(18);
  HAL_GPIO_WritePin(port, pin, GPIO_PIN_SET);
  DHT22_DelayUs(30);

  // 40 bit veri oku (her bit: low + high süresi)
  SetPinInput(port, pin);
  for (int i = 0; i < 40; i++) {
    while (!HAL_GPIO_ReadPin(port, pin));
    uint32_t t = GetMicros();
    while (HAL_GPIO_ReadPin(port, pin));
    uint32_t pw = GetMicros() - t;
    data[i/8] = (data[i/8] << 1) | (pw > 40 ? 1 : 0);
  }
  // CRC kontrol
  if (((data[0]+data[1]+data[2]+data[3]) & 0xFF) == data[4]) {
    result.humidity    = ((data[0]<<8)|data[1]) / 10.0f;
    result.temperature = (((data[2]&0x7F)<<8)|data[3]) / 10.0f;
    if (data[2] & 0x80) result.temperature = -result.temperature;
    result.valid = 1;
  }
  return result;
}
```

## 6.3 LoRaWAN Payload Formatı ve Codec

Endüstriyel uygulamalarda payload verimliliği kritik önem taşır. Duty cycle kısıtı ve menzil/enerji dengesi göz önüne alındığında, 10–50 byte'lık kompakt payload formatları tercih edilmelidir. Float değerleri doğrudan göndermek yerine ölçekleme (scaling) ile integer'a dönüştürmek payload boyutunu önemli ölçüde azaltır.

```
// Kompakt payload packing (10 byte ile 4 ölçüm)
```

www.burakolgun.com

```
typedef struct __attribute__((packed)) {
  int16_t  temp;      // °C × 10 (örn. 23.5°C → 235)
  uint16_t humidity;  // %RH × 10 (örn. 65.2% → 652)
  uint16_t pressure;  // hPa - 900 × 10 (örn. 1013.25 → 1132)
  int16_t  current_mA; // mA × 10
  uint16_t battery_mv; // batarya mV
} Payload_t; // Toplam 10 byte

// Payload doldurma
void Pack_Payload(Payload_t *pld, SensorData_t *s) {
  pld->temp        = (int16_t)(s->temperature * 10);
  pld->humidity    = (uint16_t)(s->humidity * 10);
  pld->pressure    = (uint16_t)((s->pressure - 900.0f) * 10);
  pld->current_mA  = (int16_t)(s->current * 10);
  pld->battery_mv  = (uint16_t)(ADC_ReadBattery());
}
```

Ağ sunucusu tarafında (The Things Network veya ChirpStack), gelen raw payload yukarıdaki paketten geri çözümlenir. JavaScript tabanlı TTN codec fonksiyonu aşağıda verilmiştir:

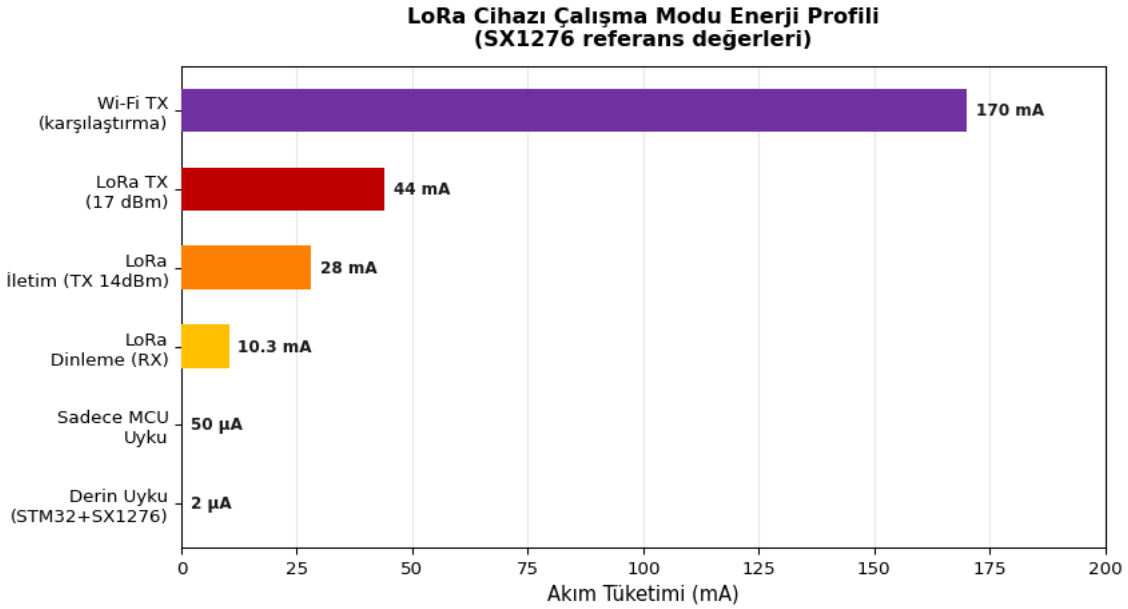
```
// TTN v3 Uplink Codec (JavaScript)
function decodeUplink(input) {
  var bytes = input.bytes;
  if (bytes.length < 10) return { errors: ["Kisa payload"] };
  var buf = new DataView(new Uint8Array(bytes).buffer);
  return {
    data: {
      temperature: buf.getInt16(0, false) / 10.0,
      humidity:    buf.getUint16(2, false) / 10.0,
      pressure:    buf.getUint16(4, false) / 10.0 + 900.0,
      current_mA:  buf.getInt16(6, false) / 10.0,
      battery_mv:  buf.getUint16(8, false),
    }
  };
}
```

www.burakolgun.com

# 7. ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE BATARYA ÖMRÜ OPTİMİZASYONU

## 7.1 Enerji Tüketim Profili

LoRa son düğümünün enerji tüketimi iki ana bileşenden oluşur: aktif görev dönemi (ölçüm, iletim, alım) ve uyku dönemi. Tipik bir endüstriyel düğümün görev döngüsü (duty cycle) %0.1–1 arasındadır; bu, günün büyük bölümünün derin uyku modunda geçtiği anlamına gelir. Dolayısıyla uyku modundaki sızıntı akımı, aktif dönemdeki ortalama tüketimi doğrudan belirler.




*Şekil 7. SX1276 tabanlı LoRa cihazının çalışma modlarına göre enerji profili. Derin uyku modunda tüketim 2 µA'nın altına iner.*

STM32L071 + SX1276 birlikteliğinde ölçülen tipik akım değerleri şunlardır: Derin uyku (STOP+WFI, tüm çevre birimleri kapalı): 1.8–2.1 µA; Yalnızca MCU uyku (SX1276 kapalı): 45–55 µA; LoRa alım (RX single, BW125): 10.3 mA; LoRa iletim (TX +14 dBm): 28 mA; LoRa iletim (TX +17 dBm PA Boost): 44 mA; Sensör okuma + MCU aktif: 6–8 mA.

## 7.2 Batarya Ömrü Hesabı

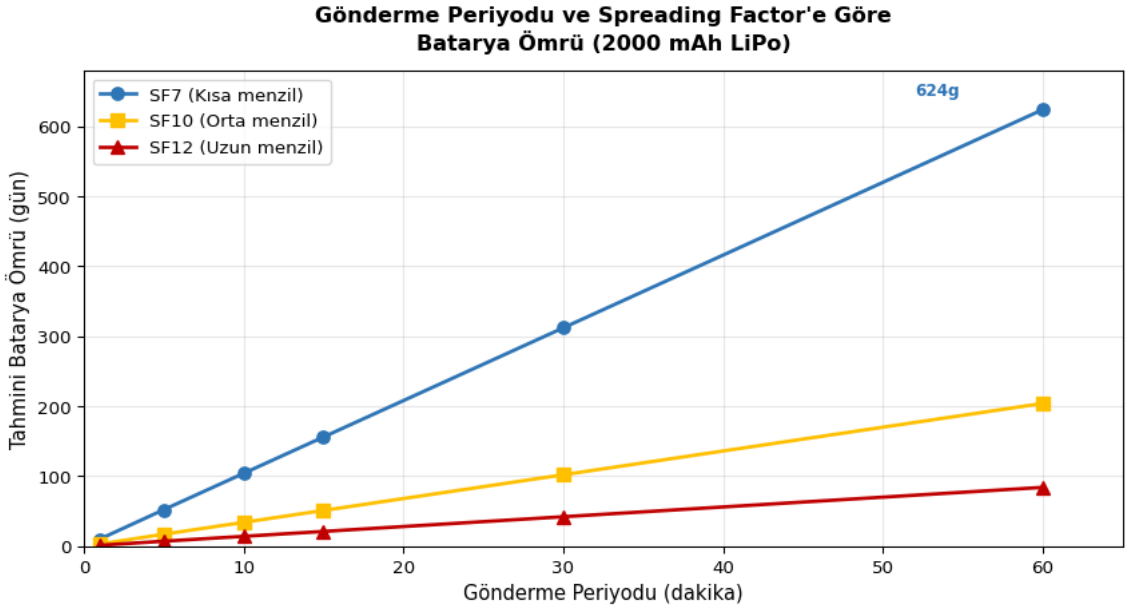
Tipik bir endüstriyel izleme düğümü için batarya ömrü hesabını somutlaştıralım. Senaryo: 15 dakikada bir sıcaklık, nem ve basınç ölçümü; SF10, BW125, +14 dBm TX, OTAA (Sınıf A); 2000 mAh LiPo pil.

| İşlem | Süre (ms) | Akım (mA) | Enerji (µAh) |
|---|---|---|---|
| Uykudan uyanma + MCU başlatma | 5 | 3.5 | 4.86 |
| Sensör okuma (I²C) | 30 | 6.0 | 50.0 |
| SX1276 başlatma + TX | 659 | 28.0 | 5131 |
| RX1 penceresi | 10 | 10.3 | 28.6 |
| RX2 penceresi | 10 | 10.3 | 28.6 |

| İşlem | Süre (ms) | Akım (mA) | Enerji (µAh) |
|---|---|---|---|
| MCU derin uyku (15 dk - işlem süreleri) | 899.286 sn | 0.0021 | 525 |
| TOPLAM (1 döngü) | ~900 sn | — | ~5768 µAh |

*Tablo 3. SF10 yapılandırmasında 15 dakikalık bir ölçüm döngüsünün enerji bütçesi analizi.*

Saatlik tüketim ≈ 5768 µAh × 4 döngü = 23.072 µAh = 23.1 mAh. Günlük tüketim = 23.1 × 24 = 554 mAh. Teorik batarya ömrü = 2000 mAh / 0.554 mAh/gün ≈ 3610 gün ≈ 9.9 yıl. Depolama ömrü (LiPo'nun %20 self-discharge ile 10 yıl), kablo ve konektör direnci, düşük sıcaklıkta kapasite kaybı gibi pratik faktörler göz önüne alındığında gerçekçi hedef 5–7 yıl pil ömrüdür.




*Şekil 8. Farklı Spreading Factor ve gönderme periyotlarına göre tahmini batarya ömrü (2000 mAh LiPo, SF7/SF10/SF12).*

## 7.3 Pratik Enerji Optimizasyon Stratejileri

Pil ömrünü uzatmak amacıyla yazılım ve donanım düzeyinde alınabilecek tedbirler şu şekilde özetlenebilir. Her şeyden önce mümkün olan en düşük SF değerinin seçilmesi gerekir; ADR mekanizması bu optimizasyonu otomatik yapar. İletim gücü gereksiz yere artırılmamalıdır: link marjı yeterince büyükse +14 dBm yerine +7 dBm kullanmak TX akımını neredeyse yarıya indirir. Payload biriktirme (data aggregation) stratejisi ile birkaç sensör ölçümü tek pakette gönderilebilir; bu hem duty cycle kullanımını hem de enerjiyi azaltır.

Donanım düzeyinde en etkili önlemler arasında sensörlere güç anahtarı (P-MOSFET) konularak yalnızca ölçüm anında aktive edilmesi, SX1276'nın reset pini çekilene kadar uyku modunda tutulması ve MCU'nun STOP moduyla (RTC alarm ile uyandırma) çalıştırılması yer almaktadır. Titiz bir PCB tasarımında pull-up dirençlerinin değerlerini artırmak (1 kΩ yerine 100 kΩ), gereksiz bypass kapasitörlerini kaldırmak ve voltaj regülatörü yerine LDO (Low Drop-Out) tercih etmek de önemli tasarruf sağlar.

www.burakolgun.com

# 8. LORAWAN AĞ SUNUCUSU VE BULUT ENTEGRASYONU

## 8.1 The Things Network (TTN)

The Things Network (TTN), açık kaynaklı ve topluluk destekli küresel bir LoRaWAN ağ altyapısıdır. TTN v3 (The Things Stack), dünya genelinde binlerce topluluk gateway'ini tek bir şebeke çatısı altında birleştirir. Türkiye'de özellikle İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyük şehirlerde TTN kapsama alanı mevcuttur. Geliştiriciler için kritik bir avantaj, ücretsiz prototipleme ve test imkânıdır; cihaz başına günlük mesaj sayısında kısıtlama bulunmakla birlikte geliştirme aşamaları için tatmin edici bir kota sunar.

TTN üzerinde uygulama oluşturma süreci şu adımları izler: (i) TTN konsolünde yeni uygulama kayıt; (ii) son düğümü DevEUI, AppEUI ve AppKey bilgileriyle cihaz olarak tanımlama; (iii) payload codec yazma (JavaScript decode/encode fonksiyonları); (iv) MQTT veya HTTP entegrasyonunu etkinleştirme. TTN'nin MQTT sunucusu (eu1.cloud.thethings.network:1883 veya TLS için 8883) üzerinden gelen mesajlar gerçek zamanlı olarak abone sistemlerce alınabilir.

```
# TTN v3 MQTT aboneliği (Python paho-mqtt)
import paho.mqtt.client as mqtt
import json, base64

TTN_HOST  = "eu1.cloud.thethings.network"
TTN_PORT  = 8883
APP_ID    = "your-app-id@ttn"
API_KEY   = "NNSXS.xxxxx"   # TTN API Key

def on_connect(client, userdata, flags, rc):
  topic = f"v3/{APP_ID}/devices/+/up"
  client.subscribe(topic)
  print(f"Baglandi, abone: {topic}")

def on_message(client, userdata, msg):
  payload = json.loads(msg.payload)
  dev_id  = payload["end_device_ids"]["device_id"]
  uplink  = payload["uplink_message"]
  decoded = uplink.get("decoded_payload", {})
  rssi    = uplink["rx_metadata"][0]["rssi"]
  snr     = uplink["rx_metadata"][0]["snr"]
  print(f"{dev_id}: temp={decoded.get('temperature')} C, " ',
        f"rssi={rssi} dBm, snr={snr} dB")

client = mqtt.Client()
client.username_pw_set(APP_ID, API_KEY)
client.tls_set()   # TLS etkinlestir
```

www.burakolgun.com

```
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message
client.connect(TTN_HOST, TTN_PORT)
client.loop_forever()
```

## 8.2 ChirpStack: Açık Kaynaklı Özel Ağ Sunucusu

ChirpStack, endüstriyel uygulamalar için özel (private) LoRaWAN ağı kurmaya yönelik olarak geliştirilmiş açık kaynaklı bir ağ sunucusu çözümüdür. Go programlama diliyle yazılmış olan ChirpStack, üç bileşenden oluşur: ChirpStack Network Server (LoRaWAN MAC katmanı yönetimi), ChirpStack Application Server (API, web arayüzü, entegrasyonlar) ve ChirpStack Gateway Bridge (gateway'den gelen Semtech UDP protokolünü MQTT'ye dönüştürür).

Docker Compose ile ChirpStack kurulumu oldukça basittir. Debian/Ubuntu tabanlı sunucuda kurulum aşamaları şöyledir:

```
# ChirpStack Docker Compose kurulumu
git clone https://github.com/chirpstack/chirpstack-docker
cd chirpstack-docker

# Konfigürasyon dosyalarını düzenle
# configuration/chirpstack/chirpstack.toml
# - network_server.band.name = "EU868"
# - postgresql bağlantı bilgileri

docker compose up -d

# Arayüze eriş: http://localhost:8080
# Varsayılan giriş: admin / admin

# Gateway kaydı için Gateway EUI gerekmektedir:
# RAK7268 için: lorawanSettings.gateway_ID değeri
```

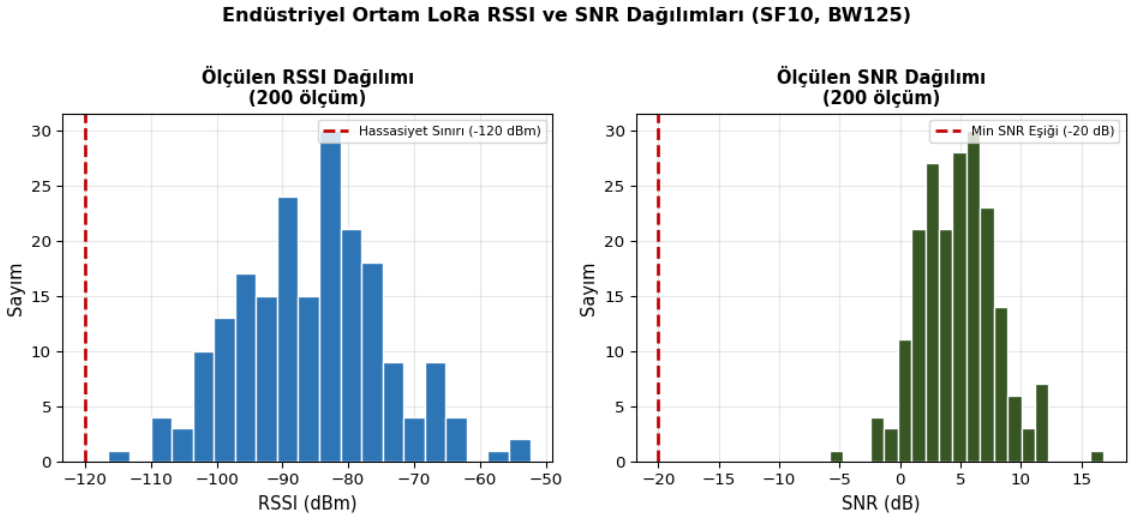
## 8.3 MQTT ve Veri Pipeline

ChirpStack, gelen uplink mesajları JSON formatında MQTT konularına yayınlar. Tipik konu yapısı: application/{id}/device/{devEUI}/event/up şeklindedir. Bu mesajlar Python, Node.js veya herhangi bir dil ile kolayca tüketilebilir. Endüstriyel uygulamalarda yaygın veri pipeline şu şekilde yapılandırılır: ChirpStack → MQTT Broker (Mosquitto/HiveMQ) → Node-RED (veri dönüşüm ve filtreleme) → InfluxDB (zaman serisi veritabanı) → Grafana (görselleştirme).

Node-RED, görsel programlama arayüzüyle akış tabanlı entegrasyonu kolaylaştırır. MQTT giriş düğümü → JSON ayrıştırıcı → InfluxDB çıkış düğümü bağlantısı oluşturularak birkaç dakika içinde çalışan bir pipeline kurulabilir. Grafana panosu üzerinde gerçek zamanlı sıcaklık,

www.burakolgun.com

nem, akım ve batarya grafiklerinin yanı sıra eşik aşımı durumunda e-posta veya Telegram alarmı yapılandırılabilir.




*Şekil 9. Endüstriyel ortamda ölçülen RSSI ve SNR dağılımları. Çoğu ölçümde RSSI -80 dBm ile -95 dBm arasında yoğunlaşmaktadır.*

www.burakolgun.com

# 9. ENDÜSTRİYEL DAĞITIM SENARYOLARI

## 9.1 Fabrika Ortamında Titreşim ve Sıcaklık İzleme

Döner makine ekipmanları (motor, kompresör, pompa, fan) üretim tesislerinin en kritik varlıklarındandır. Bu ekipmanların rulman arızaları genellikle titreşim spektrumundaki değişimle önceden kendini belli eder: belirli frekanslardaki titreşim genliğinde artış, yaklaşan bir rulman hasarının erken göstergesidir. Geleneksel koşul izleme sistemleri ya kablolu (yüksek kurulum maliyeti) ya da 2.4 GHz kablosuz (endüstriyel gürültüye hassas) çalışır.

LoRa tabanlı titreşim izleme düğümü bu boşluğu doldurur. MPU6050 veya endüstriyel sınıf ADXL355 ivme ölçer sensörü, 1 kHz örnekleme frekansında 1 saniyelik pencerede titreşim RMS ve tepe değerlerini hesaplar. Hesaplanan istatistikler (X/Y/Z eksenlerinde RMS ivme, tepe ivme, sıcaklık) LoRa üzerinden 5 dakikada bir iletilir. Endüstriyel binalarda LoRa penetrasyonu, kalın beton duvarlar ve metal çerçeveli makineler arasında bile 200–500 m menzili güvenilir biçimde karşılar.

## 9.2 Tarımsal Sulama ve Toprak Nemi İzleme

Hassas tarım uygulamaları, geniş arazilerdeki toprak nemi ve sıcaklık dağılımının gerçek zamanlı haritalamasını gerektirmektedir. Sulama kararlarını otomatikleştirmek için her 50–100 dönümlük bölgede kapasitif toprak nemi sensörü (5TE veya EC-5), toprak sıcaklığı ve ortam koşullarını izleyen düğümler yerleştirilir. Geniş açık alan koşullarında SF7 veya SF8 ile bile 5–8 km menzil elde edilmesi, tek bir gateway ile onlarca dönümlük araziyi kapsama altına almayı mümkün kılar.

Düğümler su geçirmez IP67 muhafaza içine alınır; enerji kaynağı olarak 10 W güneş paneli + 5000 mAh LiPo batarya kombinasyonu kullanılır. Bu yapılandırma, kış aylarının düşük güneşlenme dönemlerinde bile düğümün kesintisiz çalışmasını sağlar. Toprak nemi eşiğinin altına düşmesi durumunda gateway üzerinden sulama valf aktüatörüne LoRaWAN Sınıf C downlink komutu gönderilerek sulama otomatik başlatılır.

## 9.3 Akıllı Şebeke ve Enerji İzleme

Elektrik dağıtım şebekeleri ve büyük endüstriyel tesislerdeki trafo merkezleri, pano dolabı sıcaklıkları, kablo terminal sıcaklıkları ve besleme voltajları sürekli izlenmelidir. Geleneksel SCADA sistemleri RS-485 Modbus üzerinden çalışır ve kablo altyapısı gerektirmektedir. LoRa tabanlı retrofit (geriye dönük uyum) düğümleri mevcut sayaç ve trafo panolarına kablolama gerektirmeden eklenebilir. Split-core akım trafosu (non-invasive CT) ile INA219 veya CS1237 üzerinden enerji tüketimi ölçülür; IEC 62056 DLMS/COSEM protokolü yerine basit LoRaWAN payload formatı kullanılır.

| Senaryo | SF | TX Gücü | Periyot | Tahmini Batarya Ömrü | Gateway Aralığı |
|---|---|---|---|---|---|
| Fabrika titreşim izleme | SF9 | +14 dBm | 5 dk | ~4 yıl (2000 mAh) | 200–500 m |
| Tarım toprak nemi | SF7 | +14 dBm | 15 dk | Güneş enerjili (∞) | 3–8 km |
| Akıllı şebeke izleme | SF10 | +14 dBm | 1 dk | ~1 yıl (şebeke) | 500 m–2 km |

www.burakorun.com

| Senaryo | SF | TX Gücü | Periyot | Tahmini Batarya Ömrü | Gateway Aralığı |
|---|---|---|---|---|---|
| Su kaçak tespiti | SF12 | +17 dBm | 30 dk | ~8 yıl (2000 mAh) | 5–15 km |
| Soğuk zincir lojistik | SF8 | +14 dBm | 10 dk | ~3 yıl (2000 mAh) | 2–5 km |

*Tablo 4. Farklı endüstriyel senaryolar için önerilen LoRa yapılandırması ve tahmini performans değerleri.*

## 9.4 LoRaWAN Gateway Seçimi ve Kurulumu

LoRaWAN gateway seçimi, ağ tasarımının kritik bir adımıdır. Kapalı alan uygulamaları için RAK7268 (8 kanal, Ethernet/LTE, dahili Chirpstack gateway OS) popüler bir seçimdir; yaklaşık 200–300 EUR fiyat aralığında ticari kalitede bir çözüm sunar. Açık alan ve uzak bölgeler için Solar-powered seçenekler (RAK7244 + güneş enerjili besleme) kullanılabilir. Tek kanallı gateway'ler (ESP32 + SX1276 tabanlı) prototipleme için uygun olmakla birlikte üretim ortamında kullanılmamalıdır; LoRaWAN standardını tam desteklemez ve yalnızca bir SF/kanal kombinasyonunu dinleyebildiğinden ciddi mesaj kayıplarına yol açar.

www.burakolgun.com

# 10. LORAWAN GÜVENLİK MİMARİSİ

## 10.1 İki Katmanlı AES-128 Şifrelem

LoRaWAN standardı, 1.0.4 ve 1.1 sürümlerinde iki bağımsız AES-128 şifreleme katmanı tanımlamaktadır. İlk katman, ağ oturum anahtarı (NwkSKey) ile MAC başlık ve mesaj bütünlüğü kodunu (MIC) şifreler. İkinci katman, uygulama oturum anahtarı (AppSKey) ile uygulama payload'ını uçtan uca şifreler. Bu iki katmanlı yaklaşım, ağ sunucusunun MAC içeriğini okuyabilirken uygulama payload'ını görememesine olanak tanır; böylece ağ operatörü ile uygulama sahibinin güven sınırları ayrılır.

Frame Counter (FCnt) mekanizması tekrarlama (replay) saldırılarına karşı koruma sağlar. Her uplink mesajda artan bir sayaç gönderilir; ağ sunucusu sayaç değerini takip eder ve beklenen değerden düşük sayaçlı mesajları reddeder. LoRaWAN 1.1'de FCnt, 32 bit genişliğinde tutularak taşma saldırıları önlenmiştir. Ayrıca Join prosedüründe Join Nonce mekanizması, her katılma girişimini benzersiz kılarak JoinRequest tekrarlama saldırısını engeller.

## 10.2 Endüstriyel Güvenlik Gereksinimleri

Kritik altyapı ve endüstriyel uygulamalar için standart LoRaWAN güvenliği zaman zaman yetersiz kalabilir. Bu durumlarda uygulama katmanı şifrelemesi (application layer encryption) ile AppSKey'in ötesinde ek bir şifreleme katmanı eklenmelidir. Ayrıca cihaz kimlik doğrulamasının X.509 sertifika tabanlı yapıya taşınması, fiziksel cihaz güvenliği (tamper-evident muhafaza, JTAG devre dışı bırakma), ve anahtar yönetimi için Hardware Security Module (HSM) kullanımı değerlendirilmelidir.

LoRaWAN 1.1'de tanımlanan Join Server bileşeni, anahtar yönetimini ağ sunucusundan ayırarak daha güçlü bir güven zinciri sağlar. Endüstriyel ortamlarda özel (private) ağ kurulumu, yalnızca yetkili cihazların ağa katılmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda trafik analizine karşı ekstra koruma sunar; paylaşık TTN gibi genel ağlarda trafik metadata'sı (mesaj sayısı, zamanlaması) üçüncü taraflarca izlenebilir.

| Güvenlik Tehdidi | LoRaWAN Önlemi | Ek Öneri |
|---|---|---|
| Dinleme (Eavesdropping) | AES-128 AppSKey şifreleme | Uygulama katmanı ek şifreleme |
| Tekrarlama saldırısı | FCnt + Join Nonce | Zaman damgası doğrulama |
| Sahte cihaz | AppKey + MIC kontrolü | X.509 sertifika + HSM |
| Hizmet engelleme (jamming) | Frekans atlama, ADR | Çoklu kanal + yedek ağ |
| Fiziksel müdahale | Uygulama katmanı şifreleme | Tamper-evident muhafaza |
| Anahtar sızıntısı | OTAA her oturumda yeni anahtar | HSM + güvenli depolama |

*Tablo 5. LoRaWAN güvenlik tehditleri ve alınması gereken önlemler.*

# 11. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

## 11.1 Teknolojik Değerlendirme

LoRa ve LoRaWAN teknolojisi, endüstriyel haberleşme ekosisteminde köklü bir dönüşümü tetiklemektedir. Bu çalışmada incelenen teknik parametreler ışığında şu değerlendirmeleri yapmak mümkündür: CSS modülasyonunun sağladığı -137 dBm alıcı hassasiyeti, bina penetrasyonu ve kentsel mesafelerde diğer LPWAN teknolojileri arasındaki en güçlü performansı temsil etmektedir. Bu hassasiyet değeri, geleneksel ISM bant FSK sistemlerine kıyasla yaklaşık 15–20 dB avantaj anlamına gelir.

Enerji verimliliği açısından elde edilen sonuçlar da etkileyicidir: 2000 mAh LiPo pil ile 15 dakikalık ölçüm döngüsü ve SF10 yapılandırmasında hesaplanan teorik batarya ömrü 9.9 yıla ulaşmaktadır. Pratik koşullarda 5–7 yıl beklenmesi gerçekçidir; bu değer bile zorlu fiziksel ortamlarda pil değişim maliyetlerini minimize eder ve endüstriyel bakım döngüleriyle uyumludur. Kablolama gerektirmeyen bu yapı, retrofit uygulamalarında kurulum maliyetini geleneksel kablolu sistemlere kıyasla %60–80 oranında azaltabilir.

## 11.2 Sınırlamalar ve Kısıtlar

LoRa/LoRaWAN teknolojisinin belirgin kısıtları da göz ardı edilmemelidir. İlk olarak, duty cycle kısıtlamaları ve düşük veri hızı, gerçek zamanlı yüksek çözünürlüklü veri akışı gerektiren uygulamalar için elverişsizdir. Saniyede birden fazla güncelleme gerektiren kapalı döngü kontrol sistemleri (closed-loop control) veya yüksek çözünürlüklü titreşim spektrum analizi bu kategoriye girmektedir.

İkinci önemli kısıt, ağ kapasitesidir. Çok sayıda düğümün yoğun biçimde paket gönderdiği ortamlarda (kolizyon, paket çakışması riski) ağ performansı önemli ölçüde düşebilir. ALOHA tabanlı MAC protokolü belirleyici (deterministic) gecikme garantisi vermez; bu nedenle güvenlik açısından kritik komutların (acil durdurma gibi) LoRaWAN üzerinden iletilmesi önerilmez. Son olarak, LoRa frekans bandları ülkeden ülkeye farklılık gösterir ve özellikle Asya-Pasifik'te 915 MHz bandının yasal durumu dikkatli değerlendirilmelidir.

## 11.3 Gelecek Yönelimler

LoRa teknolojisinin gelişim yörüngesi birkaç kritik alanda ilerlemektedir. LoRa Alliance'ın 2022'de yayımladığı LoRaWAN 1.1 spesifikasyonu, Relay mekanizmasını tanımlayarak düğümlerin birbirlerinin kapsamını genişletmesine olanak tanımaktadır; bu özellik özellikle bodrum katı ve yeraltı sensörleri için kritik bir gelişmedir. LR-FHSS (Long Range — Frequency Hopping Spread Spectrum), düşük uzay segmenti maliyetiyle uydu bağlantısını mümkün kılmakta ve kapsama alanı bulunmayan uzak bölgeler için devrimci bir çözüm sunmaktadır. Semtech'in SX1262 ve SX1280 serisi yeni transceiver yongaları, iyileştirilmiş faz gürültüsü ve %50 daha düşük güç tüketimiyle SX1276'nın yerini almaya aday gösterilmektedir.

## 11.4 Sonuç

Bu çalışma, LoRa/LoRaWAN teknolojisini endüstriyel haberleşme perspektifinden kapsamlı biçimde ele almıştır. CSS modülasyonunun teorik temelleri, SX1276 donanım entegrasyonu,

www.burakgun.com

STM32 tabanlı son düğüm tasarımı, enerji optimizasyon stratejileri, ağ sunucusu yazılımları ve endüstriyel dağıtım senaryoları; hem kuramsal altyapı hem de uygulamaya yönelik kodlar eşliğinde sunulmuştur.

Sonuç olarak, LoRa/LoRaWAN teknolojisi; yüksek güvenilirlik, düşük kurulum ve işletme maliyeti, uzun batarya ömrü ve esnek ağ topolojisi özellikleriyle endüstri 4.0 dönüşümünün altyapı taşlarından biri haline gelmiştir. Özellikle özel ağ kurulumuna olanak tanıyan yapısı, veri egemenliği ve gizlilik açısından hassas endüstriyel müşteriler için belirleyici bir avantaj oluşturmaktadır. Gelecek araştırmaların; ağ kapasitesi optimizasyonu, yapay zeka destekli anomali tespiti ve LR-FHSS uydu entegrasyonu konularına odaklanması beklenmektedir.

www.burakolgun.com

# KAYNAKÇA

LoRa Alliance. (2020). LoRaWAN Specification v1.0.4. LoRa Alliance Technical Committee. https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/

LoRa Alliance. (2017). LoRaWAN 1.1 Specification. LoRa Alliance Technical Committee. https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawantm-specification-v1-1/

Semtech Corporation. (2020). SX1276/77/78/79 Datasheet: 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver. Semtech. https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276

Bor, M., Roedig, U., Voigt, T., & Alonso, J. M. (2016). Do LoRa low-power wide-area networks scale? Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), 59–67. https://doi.org/10.1145/2988287.2989163

Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of LoRa: Long range and low power networks for the internet of things. Sensors, 16(9), 1466. https://doi.org/10.3390/s16091466

Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. IEEE Communications Magazine, 55(9), 34–40. https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613

Cattani, M., Boano, C. A., & Römer, K. (2017). An experimental evaluation of the reliability of LoRa long-range low-power wireless communication. Journal of Sensor and Actuator Networks, 6(2), 7. https://doi.org/10.3390/jsan6020007

Reynders, B., Meert, W., & Pollin, S. (2016). Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), 1–6. https://doi.org/10.1109/ICT.2016.7500415

ST Microelectronics. (2022). STM32L071xx Ultra-low-power 32-bit MCU Arm-based Cortex-M0+ Datasheet. STMicroelectronics. https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l071kb.pdf

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express, 5(1), 1–7. https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005

Sanchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. Sensors, 16(5), 708. https://doi.org/10.3390/s16050708

Lim, K., Abdullah, A. S., Venkat, I., & Pragatheeswaran, J. G. (2022). A systematic literature review of LoRaWAN in agriculture and smart farming. Computers and Electronics in Agriculture, 200, 107212. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107212

Shanmuga Sundaram, J. P., Du, W., & Zhao, Z. (2019). A survey on LoRa networking: Research problems, current solutions, and open issues. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22(1), 371–388. https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2949598

ChirpStack Foundation. (2023). ChirpStack open-source LoRaWAN Network Server documentation. https://www.chirpstack.io/docs/

The Things Network. (2023). The Things Stack for LoRaWAN documentation. https://www.thethingsindustries.com/docs/

Yang, Z., Zhou, Q., Lei, L., Zheng, K., & Xiang, W. (2016). An IoT-cloud based wearable ECG monitoring system for smart healthcare. Journal of Medical Systems, 40(12), 286. https://doi.org/10.1007/s10916-016-0644-9

Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoRaFarm: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. Sensors, 20(7), 2028. https://doi.org/10.3390/s20072028

www.kitapdigm.com

Petäjäjärvi, J., Mikhaylov, K., Hämäläinen, M., & Iinatti, J. (2017). Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring. 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 1–5. https://doi.org/10.1109/ISMICT.2016.7492086

Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2015). Long-range IoT technologies: The dawn of LoRa. Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures, 51–58. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27072-2_7

Butun, I., Pereira, N., & Gidlund, M. (2019). Analysis of LoRaWAN v1.1 security. Proceedings of the 4th ACM MobiHoc Workshop on Experiences with the Design and Implementation of Smart Objects (SMARTOBJECTS), 1–6. https://doi.org/10.1145/3325480.3326570

www.burakolgun.com