



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DIŞ MEKAN AYDINLATMASI ARIZA BİLDİRİMİ
VE KESTİRİMİ İÇİN LORA TABANLI BİR İoT
UYGULAMASI GELİŞTİRİLMESİ**

EZGİM ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENFORMATİK ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2021

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ MEKAN AYDINLATMASI ARIZA BİLDİRİMİ
VE KESTİRİMİ İÇİN LORA TABANLI BİR İoT
UYGULAMASI GELİŞTİRİLMESİ

EZGİM ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Enformatik Anabilim Dalı

KAHRAMANMARAŞ 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

EZGİM ÇELİK



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir

DIŞ MEKAN AYDINLATMASI ARIZA BİLDİRİMİ VE KESTİRİMİ İÇİN LoRa TABANLI BİR IOT UYGULAMASI GELİŞTİRİLMESİ (YÜKSEK LİSANS TEZİ)

EZGİM ÇELİK

ÖZET

Sokak aydınlatmaları, yüzyıllardır geceyi aydınlatan temel bir hizmettir. İnsanların karanlıkta saldırıya veya soyguna uğrama gibi güvenlik zafiyetlerini önlemede önemli bir yardımcıdır. Dolayısıyla, aynı zamanda toplum huzuruna katkıda bulunan bir hizmettir. Ancak, günümüz sokak aydınlatmalarının arızalarını otomatik olarak rapor edecek bir sistem bulunmamaktadır. Geliştirilecek akıllı bir sistem, enerji tüketimi ve kapsama sorununu çözmeli, arıza olup olmadığının kestirimini yapabilmelidir. Bu çalışmada nesnelerin interneti konseptiyle geliştirilen LoRa teknolojisi ile oluşabilecek aydınlatma arızalarının tespiti hedeflenmektedir. LoRaWAN baz istasyonu yapılandırılmış, ışık şiddeti bilgisini LoRa sinyali ile gönderen uç cihaz geliştirilmiştir. Bu kapsamda, uygulama yazılımları geliştirilmiştir. Şehir içinde ve dışında saha testleri yapılmıştır. Elde edilen sinyal değerleri analiz edilmiş ve test noktaları bazında iletim oranları incelenmiştir. 11 km yarıçaplı kapsama alanı sağlanmış ve yol kayıpları hesaplanmıştır. Ölçülen ışık şiddeti değerinden, bir arıza kestirim modeli tasarlanarak arıza tespiti yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LoRa, LoRaWAN, akıllı şehir, Kablosuz Sensör Ağları, IoT

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimler Enstitüsü

Enformatik Ana Bilim Dalı, Haziran/2021

Danışman: Prof. Dr. Mehmet TEKEREK

Sayfa Sayısı:62

**DEVELOPING A LoRa BASED IoT APPLICATION FOR FAULT DETECTION
AND ESTIMATION IN OUTDOOR LIGHTNING
(M.Sc. THESIS)**

EZGİM ÇELİK

ABSTRACT

Street lights have been an essential service that illuminates the night for centuries. It is an important aid in preventing security vulnerabilities such as people being attacked or robbed in the dark. Therefore, it is also a service that contributes to public peace. However, there is no system to automatically report the failures of today's street lighting. A smart system to be developed should solve the energy consumption and coverage problem, and be able to predict whether there is a malfunction or not. In this study, it is aimed to detect the lighting failures that may occur with the LoRa technology developed with the concept of the Internet of Things. A LoRaWAN base station is configured, and an end device that sends light intensity information with LoRa signal is developed. In this context, software applications has been developed. Field tests were carried out in and outside the city. Field tests were carried out in and outside the city. The obtained signal values were analyzed and the transmission rates were examined on the basis of test points. A coverage area of 11 km radius is provided and path losses are calculated. Fault detection was made by designing a fault prediction model from the measured light intensity value. Obtained results were evaluated.

Anahtar Kelimeler: LoRa, LoRaWAN, smart city, Wireless Sensor Networks, Internet of Things

Kahramanmaraş Sütçü Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Informatics, June/2021

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet TEKEREK

Page number: 62

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bana bilimsel düşünmeyi öğreten, her daim destek veren ve yol gösteren danışman hocam; Prof. Dr. Mehmet TEKEREK'e, çalışmam boyunca değerli desteklerinden dolayı Talha BÜYÜKAKKAŞLAR'a ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan sevgili eşim Esra ÇELİK'e, bana olan karşılıksız emeklerinden dolayı annem Suzan ÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ezgim ÇELİK



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. IoT Açısından LPWAN Teknolojileri	2
1.2. LoRaWAN	5
1.3. Mevcut Problem.....	7
1.4. Tezin Amaç ve Hedefleri.....	7
1.5. Tezin yapısı.....	8
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	9
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	12
3.1. LoRa	12
3.1.1. Shannon-Hartley Teoremi.....	12
3.1.2. LoRa Modülasyonu.....	13
3.1.3. RSSI ve SNR.....	14
3.1.4. Bağlantı Maliyeti	15
3.2. LoRaWAN	15
3.2.1. LoRaWAN Cihaz Sınıfları.....	15
3.2.2. LoRaWAN Protokolü ve LoRaWAN Ağı	19
3.2.3. Batarya Ömrü.....	20
3.2.4. Ağ Kapasitesi	21
3.2.5. Güvenlik.....	21
3.3. Ağ Geçidi.....	23
3.4. Uç Sensör (Node)	25
3.5. LoRaWAN Ağı.....	25
3.6. Lojistik Regresyon.....	27
3.7. Log Distance Path.....	27

3.8. NodeRed	28
3.9. Sistemin Çalışma Yapısı.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
4.1. RSSI ve SNR Analizi.....	31
4.2. Test Noktalarının Uzaklıkları Ve İletim Oranları.....	34
4.3. Sinyal İletim Analizi.....	35
4.4. Arıza Tespiti Kestirim Modeli.....	38
4.5. Yol Kaybı (Path Loss) Hesaplanması.....	39
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	42
KAYNAKLAR.....	HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 LoRaWAN Mimarisi (De Carvalho Silva ve ark., 2017).....	6
Şekil 3.1 LoRa Protokol Yığını	12
Şekil 3.2 LoRaWAN Sınıfları Aşağı yönlü bağlantı ve Pil Ömrü İlişkisi.....	16
Şekil 3.3 LoRa A sınıfı sinyal trafiği.....	17
Şekil 3.4 LoRa B Sınıfı sinyal trafiği	18
Şekil 3.5 LoRa C Sınıfı sinyal trafiği	18
Şekil 3.6 LoRaWAN Ağı	19
Şekil 3.7 Havadan Aktivasyon	22
Şekil 3.8 F8L10 GW.....	23
Şekil 3.9 D22 Saha Kurulumu.....	24
Şekil 3.10 D2A Saha Kurulumu	24
Şekil 3.11 Uç Cihaz.....	25
Şekil 3.12 LoRaWAN sunucusu ekranı.....	26
Şekil 3.13 NodeRed Veri Tabanı Kayıt Akışı	28
Şekil 3.14 Aydınlatması Arıza Tespit ve İzleme Sistemi	29
Şekil 4.1 RSSI ve SNR Analizi	32
Şekil 4.2 D2A Histogram	33
Şekil 4.3 D22 Histogram	33
Şekil 4.4 Başarılı iletim Oranı	35
Şekil 4.5 GW Bazlı Sinyal Dağılımı	36
Şekil 4.6 TestM TestK TestZ ve Diğer Test Yatakları.....	37
Şekil 4.7 Test Z Noktası	37
Şekil 4.8 Lojistik Regresyon Kestirim Modeli.....	38
Şekil 4.9 Lojistik Regresyon Karmaşıklık Matrisi	39
Şekil 4.10 D22 Path Loss	40

Şekil 4.11 D2A Path Loss	40
--------------------------------	----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Sigfox, NB-IoT ve LoRaWAN karşılaştırılması.....	3
Çizelge 3.1 LoRa SF değerleri (Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019)	14
Çizelge 3.2 LoRaWAN sınıfları karşılaştırılması.....	16
Çizelge 4.1 Test noktaları uzaklıkları ve test noktası bazında başarılı iletim oranları.....	34



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABP	: Activation By Personalization
BW	: BandWidth/ Bant Genişliği
CR	: Coding Rate / Kodlama Hızı
DBM	: Desibel Miliwatt
ETSI	: Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü
LoRa	: Long Range
LoRaWAN	: Long Range Wide Area Network
LPWAN	: Low Power Wide Area Network
MQTT	: Message Queuing Telemetry Transport
OTAA	: Over The Air Activation
PL	: Path Loss (Yol Kaybı)
RSSI	: Recieved Signal Strength
SF	: Spread Factor
SNR	: Signal Nose Ratio
WSN	: Kablosuz Sensör Ağları

1. GİRİŞ

Şehirlerde ve kırsal kesimlerde gece boyunca ışık eksikliği insanoğlu adına her zaman bir sorun olmuştur. İnsanların karanlıktan dolayı nereye gittiklerini göremedikleri anlarda saldırıya veya soyguna uğraması gibi güvenlik zafiyetleri, tehlikeleri söz konusu olabilir. Bu temel sorun, insanlar topluluk halinde yaşamaya başladığından beri var olduğu için, sokak aydınlatmalarının geçmişi oldukça eskiye dayanmaktadır. Eski Romalılar ve eski Yunanlılar evlerinin önünde yağ dolgulu kandilleri kullanmışlardır (Payzanoğlu, 1998) . Bu noktadan hareketle, sokak aydınlatmalarının, günlük hayatımızda yüz yıllardır vazgeçilmez hizmetlerden biri olduğu görülebilir. Bu yüzden sağlıklı ve sürekli aydınlatma hizmeti, insanlık için her zaman önemli bir konu olmuştur. Günümüzde, aydınlatma sistemleri karmaşık ve devasa yapılara ulaşmıştır. Gelişen teknolojiler, şehir yönetim tarzına dâhil olmuştur. Buradan akıllı şehir kavramı ortaya çıkmıştır.

Akıllı şehir, sakinlerine sunulan hizmetleri dönüştüren böylece operasyonel verimliliği artırarak daha iyi kararlar vermek için bilgi toplama, analiz etme ve dağıtma olanağı sunan teknolojileri barındıran şehirleri ifade eder (Hashem ve ark., 2016). Dolayısıyla ideal bir dünyadaki herhangi bir şehir, elde edilen bilgiyi, yeni teknolojileri ve nesnelerin internetini kullanarak her bir sakininin ihtiyaçlarına cevap vermeli ve daha da kişiselleşmelidir (Muthanna, Muthanna, Khakimov ve Muthanna, 2018). Nesnelerin İnterneti (IoT) paradigması, bir telekomünikasyon ara yüzü ile donatılmış sensörler ve / veya aktüatörler gibi cihazların işleme ve depolama birimlerinin birbirine bağlı olduğu nesnelerden oluşan bir ağ anlamına gelmektedir (Centenaro, Vangelista, Zanella ve Zorzi, 2016).

Değişen ve dönüşen ihtiyaçlarımızın karşılanması için akıllı şehir ve IoT kavramları birbirleri için vazgeçilmez hale gelmiştir. Bu iki kavram birlikte önemli teknolojik gelişmeleri teşvik etmektedir. IoT, akıllı şehir kavramının kalbine yerleşmiştir. Akıllı şehir uygulamalarında sensörleri taşıyan uç cihazların merkezi sistemlere erişebilirliği önemli rol oynamaktadır (Yaqoob ve ark., 2017). Daha uzak mesafeleri kapsayan iletişimi sağlamak için radyo sinyalinin gücü artırılır ve bu da daha fazla enerji tüketimine yol açar. Bu gibi durumlar, akıllı şehir ve IoT dünyası bir araya gelirken ortaya çıkan zorluklar olarak nitelenebilir (Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019). Söz konusu zorluklar, haberleşme ve iletişim teknolojilerinde enerji verimliliği, kapsama alanı, düşük enerji

sarfiyat ve uzun mesafeli veri iletimidir (Liu, Dong ve Sun, 2013; Mehmood, Görg, Muehleisen ve Timm-Giel, 2015). Bu zorlukların çözümü, çok sayıda düşük güçle çalışan uç cihazla kablosuz haberleşme ihtiyacını doğurmuştur.

Düşük Güçlü Geniş Alan Ağ (Low Power Wide Area Network, LPWAN)) teknolojileri, düşük enerji sarfiyatı, yüksek kapsama alanı ve uzun mesafeli veri iletimi gibi hususları temel özellik olarak barındırmasından dolayı LPWAN, IoT için fiili bir iletişim standardı haline gelmiştir (El Chall, Lahoud ve El Helou, 2019; Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019). LPWAN teknolojileri geniş alanlara yayılmış çok sayıdaki düşük güçle çalışan uç cihazlara kablosuz haberleşme altyapısı sağlar. Yeni protokollerin amacı daha düşük enerji tüketimiyle daha verimli iletim sağlamaktır (De Carvalho Silva, Rodrigues, Alberti, Solic ve Aquino, 2017; Mekki, Bajic, Chaxel ve Meyer, 2019). LPWAN'da genellikle, bir uç cihaz, diğer uç cihazlar ile değil, veriyi uygulama sunucusuna taşımada köprü olan baz istasyonu ile iletişim kurmaktadır. Aşağı yönlü bağlantı (downlink) trafiğinin miktarının yukarı yönlü bağlantıyı (uplink) aştığı geleneksel hücresel ağların aksine, LPWAN'lar için uplink trafiği daha yoğundur (Mikhaylov, Petäjärvi ve Hänninen, 2016).

Bluetooth, Wifi gibi bilinen ve çok kullanılan kablosuz haberleşme teknolojileri düşük güç ve uzun haberleşme menzilini aynı anda gerçekleştirememektedirler (Afzal, Rehmani, Pescape, Kim ve Ejaz, 2017; Rosmiati, Fachru Rizal, Susanti ve Fahreza Alfisyahrin, 2019). Hücresel ağlarda ise uzun menzil ve yüksek veri hızı sağlamalarına rağmen LPWAN teknolojileri ile kıyaslandığında maliyet ve güç tüketimi noktasında dezavantajları vardır. Mevcut hücresel ağ standartları; çok sayıdaki makinelerin birbirleri ile haberleşmeleri için tasarlanmamıştır. Bu yüzden binlerce uç cihaz verisinin toplandığı sistemlerde LPWAN kullanımının yeri açıkça görülebilir (Yu, Zhu ve Fan, 2017).

1.1. IoT Açısından LPWAN Teknolojileri

LPWAN, uzak mesafelerden düşük güç kullanarak az boyutlu veri iletimini gerçekleştirir. Lisanslı, lisanssız birçok LPWAN teknolojisi ortaya çıkmıştır. Bunların arasında, Sigfox ("Our story | Sigfox," n.d.), Dar Bant IoT (Narrow Band IoT, NB-IoT), LoRa (Long-Range) teknolojileri öne çıkmaktadır. Bir IoT uygulaması için uygun LPWAN teknolojisini seçerken hizmet kalitesi, pil ömrü, gecikme süresi, ölçeklenebilirlik, yük uzunluğu, kapsama alanı, mesafe, dağıtım ve maliyet dâhil birçok faktör dikkate alınmalıdır.

Sigfox, NB-IoT ve LoRa LPWAN teknolojilerinin IoT uygulama faktörlerine göre karşılaştırılması Çizelge 1.1’de sunulmuştur.

Çizelge 1.1 Sigfox, NB-IoT ve LoRaWAN karşılaştırılması

	Sigfox	NB-IoT	LoRaWAN
Standart	Sigfox	3GPP	LoRa Alliance
Modülasyon	BPSK	QPSK	CSS
Frekans	ISM: 433 MHz,868 MHz, 915 MHz	LTE altında lisanslı	ISM: 433 MHz,868 MHz, 915 MHz
Kapsama	10-40 km	2-20 km	1-10 km
TX Limiti	Her gün için 140 paket	Limit yok	Görev döngüsü limiti
Maks. Veri Hızı	100 bps	200 kbps	50 kbps
Özel Kurulum	Hayır	Hayır	Evet
Enerji Sarfıyatı	Düşük	Düşük	Düşük
Güvenlik	Düşük	Yüksek	Yüksek

Sigfox IoT iletişimde ultra dar bant genişliğinin potansiyeli üzerine çalışmalar yapan ilk şirketlerdendir. Şirket, küresel bir IoT operatörü olmak için bir plan geliştirmiştir. Sigfox iş modeli olarak bütün altyapıya sahip olmayı tercih etmiştir. Avrupa, Orta Doğu ve Amerika olmak üzere 70’den fazla ülkeye hizmet vermektedir. Sigfox 300 kbps 'a kadar düşük bant genişliğine sahip uplink iletimi ve günde sadece 12 baytta çok sınırlı bir downlink sağlar (Mekki ve ark., 2019). Temel olarak, Sigfox sadece sensör verilerini toplamak için etkili bir şekilde kullanılabilir, ancak sensörlere herhangi bir komut göndermez. Düşük bant genişliği sayesinde güç tüketimi düşüktür. Bir uç cihaz tek bir AA pil ile 10 yıla kadar çalışabilir. Sinyal, kırsal alanda 50 km'ye, büyük şehirlerin karmaşasında ise 10 km'ye kadar iletilir (Noreen, Bounceur ve Clavier, 2017).

NB-IoT, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) tarafından geliştirilen bir açık teknoloji standardıdır. İç kısmında Uzun-dönemli evrim (long-term evolution, LTE) spektrumunun bandını kullanır, bu açıdan hücreli ağ altyapısına dayanır. NB-IoT sinyali kent ortamında ve kırsalda iyi iletişim sağlayabilir ve özellikle bina iç kısımları ve yeraltına erişimde çok iyidir. 100 bin cihaza kadar her hücre için 250 kbps’ a kadar uplink ve downlink

iletişimini destekler. Altyapı hücrel ağ operatörleri tarafından sağlanır, lisans ücreti söz konusudur. Özel bir ağ altyapısına sahip olunamaz (Noreen, Bounceur ve Clavier, 2017).

IoT ağları için dünya çapında fiili olarak haberleşme teknolojisi haline gelen, kablosuz radyo frekans teknolojilerden olan LoRa, uzun menzilli kapsama alanına sahip, cihazlarının ise düşük güçte çalıştığı bir platformdur (El Chall ve ark., 2019; What Is LoRa, 2020). LoRa, Semtech tarafından sunulan bir fiziksel katman teknolojisidir ve modülasyonun fikri mülkiyet hakları bu şirket tarafından tutulmaktadır, LoRa, Yayılım Spektrumu (Chirp Spread Spectrum, CSS) teknolojisinden türetilmiş bir yayılım spektrumu radyo frekans modülasyon tekniğidir (What Is LoRa, 2020 ; Henriksson, 2016). CSS, 1940'lı yıllarda radar uygulamaları için geliştirilmiş, askeri ve güvenli haberleşme uygulamalarında kullanılmıştır (Semtech, 2015).

Sigfox, NB-IoT ve LoRa uç cihazlar uyku modunda çoğu zaman dış ortamda çalışırken, tüketilen enerji miktarını azaltarak uç cihazların enerji ömrünü uzatmaktadır. Ancak, NB-IoT uç cihazı, senkron iletişim ve Hizmet Kalitesi (Quality of Service, QoS) işleme nedeniyle ek enerji tüketir ve OFDM (Orthogonal frequency-division multiple access) erişim modları daha fazla pik akımı gerektirir (Mehmood ve ark., 2015; Mekki ve ark., 2019). Bu ek enerji tüketimi, Sigfox ve LoRa'ya kıyasla NB-IoT uç cihaz ömrünü kısaltırken, düşük gecikme avantajı sunar. LoRa uç cihazları A, B ve C sınıfı olarak ayrılır. Sigfox'tan farklı olarak LoRa, C sınıfının aynı zamanda artan enerji tüketimi pahasına düşük çift yönlü gecikmeyi de işleyebilmesini sağlar. Bu nedenle, gecikmeye duyarlı olan ve gönderilecek büyük miktarda veriye sahip olmayan uygulamalar için Sigfox ve A sınıfı LoRa en iyi seçeneklerdir. Düşük gecikme gerektiren uygulamalar için NB-IoT ve Class-C LoRa daha iyi seçeneklerdir. Çok sayıda cihaz desteği verebilmesi, Sigfox, NB-IoT ve LoRa'nın temel özellikleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Mekki ve ark., 2019). Bu teknolojiler, sistemlerine bağlı cihazların sayısının ve yoğunluğunun artmasına rağmen iyi çalışmaktadır. Bu ölçeklenebilirlik özelliğini yerine getirmek için bir kanalda ve ayrıca zaman ve mekânda çeşitliliğin verimli bir şekilde kullanılması gibi çeşitli teknikler uygulanmaktadır. NB-IoT, Sigfox ve LoRa'dan çok yüksek ölçeklenebilirlik avantajı sunar (Mekki ve ark., 2019)

NB-IoT ayrıca maksimum yük boyutu avantajı sunmaktadır. NB-IoT 1600 bayta kadar veri aktarımına izin verir. LoRa maksimum 243 bayt verinin gönderilmesine izin vermektedir (Mekki ve ark., 2019). Aksine, Sigfox, büyük veri boyutları göndermesi gereken IoT uygulamalarına engel olan 12 baytlık en düşük yük uzunluğunu önermektedir (Mekki ve ark., 2019). Ek olarak, LoRa ekosisteminin önemli bir avantajı esnekliğidir.

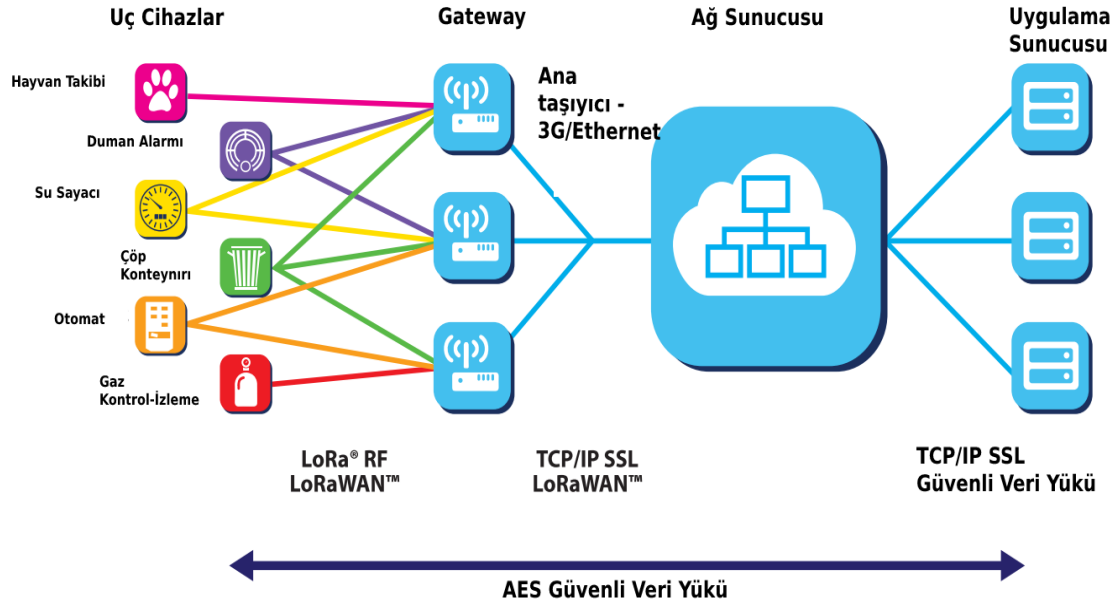
Sigfox ve NB-IoT'nin aksine, yerel olarak LoRa ağı geçidi kullanan LAN ve baz istasyonları aracılığıyla genel ağı operasyonu sunmaktadır.

Endüstriyel alanda yerel bir LoRa ağını kurmak için hibrit bir işletim modeli kullanılabilir ve dış alanları kapsamak için genel LoRa ağı kullanılabilir. Sigfox ve LoRa'nın NB-IoT'ye kıyasla daha uygun maliyetli olduğu açıktır. Özetle, Sigfox, LoRa ve NB-IoT'nin her birinin farklı IoT faktörleri açısından kendi avantajları bulunmaktadır. Eğer az boyutlu veri taşıyan bir izleme sistemi kurulacaksa, yerel bir istasyon kurma imkânı veren LoRaWAN lisanssız radyo frekansı özelliği ile LoRa öne çıkmaktadır.

1.2. LoRaWAN

LoRaWAN, 460'dan fazla şirketi bir araya getiren LoRa Alliance tarafından geliştirilen açık bir protokoldür. OSI Modelinin fiziksel katmanına karşılık gelen LoRa modülasyon teknolojisine dayanmaktadır. Bu teknoloji uzun menzilli iletişime izin vermektedir. Kırsal alanda 15 ila 20 kilometre ve kentsel alanda 2 ila 8 kilometredir. LoRa, düşük enerji tüketimi, düşük veri hızlarıyla uçtan uca güvenli iletişim sağlayan bir spektrum yayma modülasyonu kullanır (Centenaro ve ark., 2016; Lorient, Aljer ve Shahrour, 2017). LoRaWAN açık spesifikasyonu, LoRa teknolojisine dayanan düşük güçlü, geniş alan ağı (LPWAN) protokolüdür. Pille çalışan uç cihazları bölgesel, ulusal veya küresel ağlarda kablosuz olarak İnternet'e bağlamak için tasarlanan LoRaWAN protokolü, endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi (ISM) bandındaki lisanssız radyo spektrumundan yararlanır.

LoRa, fiziksel katman parametreleri ve LoRaWAN protokolünün cihaz üzerinden altyapısına tanımlar ve cihazlar arasında sorunsuz birlikte çalışabilirlik sağlar. LoRaWAN yalnızca 125 kHz, 250 kHz ve 500 kHz bant genişliği aralıklarını kullanır (Semtech, 2015; Lavric ve Popa, 2017; El Chall ve ark., 2019). Bu 3 aralıktan hangisinin fiili olarak kullanıldığı, bölgeye veya sıklık planına bağlıdır. Örneğin Avrupa'da sadece 125kHz ve 250 kHz bant genişlikleri kullanılmaktadır. Hızlı büyüyen LoRa Alliance® teknoloji ittifakı ile LoRaWAN protokolünün standartlaştırılmasını ve küresel uyumunu yönlendirir (What Is LoRa, 2020; LoRa Alliance, 2015). Şekil 1.1'de LoRaWAN mimarisinde genel olarak kullanılan yıldızlar topolojisi verilmiştir.



Şekil 1.1 LoRaWAN Mimarisi (De Carvalho Silva ve ark., 2017)

MAC katmanı veriyi, hata kontrol kodu, alıcı ve gönderenin MAC adresleri ile birlikte paketleyerek fiziksel katmana aktarımını sağlar. LoRaWAN da, genel IoT yapıları için MAC katmanı teknolojisidir. Çok geniş bir uygulama alanı, LoRaWAN teknolojisini iletişim katmanları için kullanabilir. LoRaWAN , hala standartlaştırma aşamasında olan 3GPP NB-IoT gibi alternatiflerle karşılaştırıldığında, standardizasyonda daha olgun ve dağıtım için daha kolaydır (Yu ve ark., 2017).

LoRaWAN protokolü bataryalı, hareketli veya sabit kablosuz sensöre sahip uç cihazlar için optimize edilmiştir. LoRaWAN , Avrupa'da 868 mhz frekans bandında çalışmaktadır (Iborra, Gomez, Viñas, Cano ve Skarmeta, 2018; Aoudia ve ark., 2018; Adelantado ve ark., 2017). Aşağıdaki, üç varsayılan kanal, her EU863-870 uç cihazında uygulanmaktadır.

Çizelge 1.2 EU 868-870 bandı kanal frekansları (Sornin, M., Eirich, Kramp ve Hersent, 2015)

Modülasyon	Bant Genişliği [khz]	Frekans Kanalı[Mhz]	LoRa DR / BitRate
LoRa	1125	868.10 868.30 868.50	DR0 to DR5 /0.3-5 kbps

Çizelge 1.2 'de belirtilen bu kanallar, tüm ağ geçitlerinin dinlemesi gereken kanallardır.

1.3. Mevcut Problem

İnsanların, güvenliği ve huzuruna direkt katkısından dolayı aydınlatmaya olan ihtiyacın önemine rağmen, sokak aydınlatmalarının arızalarını insandan bağımsız sorumlulara iletecek bir IoT sistemi bulunmamaktadır. Akıllı şehir konsepti altında sokak aydınlatmaları için kurgulanacak ışık şiddeti ölçerek, arıza kestirimi yapacak bir IoT sistemi kilometrelerce alanda kapsama sağlamalıdır. Aydınlatma armatürü çalışıyor ama eski olması sebebiyle az ışık veriyor olabilir, şebeke kaynaklı olmayan bir sebeple tam kapasite çalışmıyor olabilir. . Bu gibi durumlar da arıza anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, ışık verse de arızalı olduğunun kestiriminin yapılması gerekmektedir. Fiziksel bir darbe ile kırılmış veya trafodan kaynaklı bir arızası olabilir ve hiç ışık vermiyor olabilir. Bu uygulama için çözülmesi gereken sorunlardan biri de aydınlatma direğine konulacak uç cihazın enerji tüketimidir. Özetle; insan faktörü olmadan arıza tespiti, enerji tüketimi ve kapsama alanı sorununa kurgulanacak sistem çözüm getirmelidir. Sistemden gelecek ölçümlerden arıza olup olmadığına dair kestirim yapabilmelidir.

1.4. Tezin Amaç ve Hedefleri

IoT hem akademi hem de sanayi çevresinde yoğun bir şekilde çalışmaların sürdürüldüğü bir alandır. Bu noktada LoRA (Long Range) ve LoRaWAN (Low Power Wide Area Network) benzer teknolojilere göre avantajlı özelliklere sahip olması açısından, bir IoT çözümü olarak bilimsel araştırmaya ve geliştirmeye açık bir teknolojidir. Çalışma kapsamında, dış mekan sokak aydınlatmalarının sayısı ve coğrafi dağılımı ve bu alanda yapılan literatür çalışmaları incelenmiştir. Bu doğrultuda, LoRA teknolojisinin, gerçek dünya senaryosunda test edilmesi literatür açısından da önemlidir. LoRa teknolojisi maliyet ve verimlilik olarak çalışmamız için eşleşme sağlamaktadır. Sokak aydınlatmaları LoRa teknolojisinin deneyimlenmesi adına, enerji sarfıyatı, kapsama alanı ve başarılı sinyal iletimi gibi konularda uygulama ve deneysel çalışma zemini sunmaktadır.

Bu çalışmada, dış mekan aydınlatmalarının hizmet vermemesi durumunda otomatik olarak arıza tespitinin kestirim ile yapılması amaçlanmıştır. Söz konusu arıza tespitinin yapılması için, çalışma kapsamında, LoRa kablosuz haberleşme protokolünü kullanan ışık şiddeti algılayan uç cihazlar tasarlanması hedeflenmiştir. LoRaWAN temelli uzaktan haberleşme istasyonu kurulmuştur. Aydınlatma ışık şiddeti uç cihazlardan alınan veriler ağ

geçidi (gateway) üzerinden LoRaWAN sunucusuna aktarılmıştır. Elde edilen verinin tutulması, analizi ve izlenmesi ve arıza kestirimi için bir uygulama geliştirilmiştir.

1.5. Tezin yapısı

Bu tez çalışması 5 ana bölümden oluşmaktadır.

1. Bölümde IoT ile birlikte akıllı şehir kavramını tanımı ve önemi verilmiş, LPWAN, LoRa teknolojileri hakkında bilgi verilerek, diğer benzer teknolojilerle birlikte karşılaştırmalı analizi de verilmiştir.
2. Bölümde, literatürdeki LoRa ve LoRaWAN ile ilgili önceki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.
3. Bölümde, deneysel yöntem için kullanılan malzemeler ve yapılar detaylı verilmiştir. LoRa teknolojilerinin detayına inilerek, radyo frekans modülasyonu, sinyal kalitesi ölçütleri ve bağlantı maliyeti konuları hakkında bilgi verilmiştir. LoRaWAN kısmında da, protokol ve ağ üzerine detaylı cihaz sınıfları, batarya ömrü, ağ kapasitesi ve güvenlik kavramları detaylı verilmiştir.
4. Bölümde, gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve arıza kestirim çalışması verilmiştir. RSSI (Alınan Sinyal Gücü Göstergesi, Recieved Signal Strength), SNR (Sinyal Gürültü Oranı, Signal Noise Ratio), PL (Yol kaybı, Path Loss) gibi performans ölçütleri analiz edilmiş, arıza kestirim algoritmasına ve sinyal iletim analizine yer verilmiştir.
5. Bölümde, gerçekleştirilen tez çalışmasının bulgularından ortaya çıkan sonuçlar verilmiş ve değerlendirilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatür incelendiğinde, LoRaWAN , SIGFOX, INGENU, TELENDA ve 3GPP NB_IOT gibi LPWAN teknolojileri ile karşılaştırıldığında birçok açıdan güçlüdür ve LoRaWAN ile ilgili ticari anlamda pilot çalışmaları birçok ülkede gerçekleştirildiği görülmüştür (Yu ve ark., 2017). LoRa tabanlı ağların performansı çeşitli akademik çalışmalarda da incelenmiştir (Adelantado ve ark., 2017; Pop, Raza, Kulkarni ve Sooriyabandara, 2017; Georgiou ve Raza, 2017; Di ve Dell, 2016).

Bor ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada, LoRa uygulamalarında uç cihazların, genellikle tek hop üzerinden direkt merkezi bir alıcıya (ağ geçidi, gateway) sinyal gönderdiklerini vurgulanmıştır. Farklı bir yöntem uygulayarak, uç cihazların birbirleri üzerinden sinyali ileterek merkezi alıcıya ulaştırmaları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Multi-hop yaklaşımın, iki yönlü iletişime olanak vereceğini böylece daha kapsamlı bir IoT ağına sahip olunabileceğini öne sürmüşlerdir fakat uç cihazlar üzerinden merkezi alıcıya sinyal iletimlerinin zorluklarını da analiz ederek yıldızlar topolojisinin kapsadığı alanların çok daha altında düşük menzilli bir kapsama alanı iletim sağlamışlardır (Bor, Vidler, & Roedig, 2017).

LoRa üzerine birçok endüstriyel alanda çeşitli bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Muthanna ve arkadaşları tarafından LoRa teknolojisi, akıllı sokak aydınlatma servisinin geliştirilmesinde kullanılarak, otomatik yanıp sönen yapı geliştirilmiştir. Sistem mimarisi, ağ geçidi ve uç cihazdan oluşmaktadır ve yıldız topolojisine sahiptir. Semtech SX1276 radyo modülasyon çipi tabanlı kablosuz modülleri ve Raspberry Pi bileşenleri kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmada, ortamda yayalar yoksa led aydınlatmanın ışığını ortama göre ayarlamayı amaçlamışlardır. Ana kaynaktan enerji sağladıkları için ve herhangi bir zamanda merkezi sistemden uç cihaza sinyal gönderme senaryosuna sahip olmaları sebebiyle C sınıfı lora cihazı kullanmayı tercih etmişlerdir. LoRa teknolojisi ile kalabalık kent ortamında veri iletildiğinde çevreden dolayı yüksek düzeyde parazit gözlemlenirken, açık alan için uygun bir teknoloji olduğu sonucuna varmışlardır (Muthanna ve ark., 2018).

Aoudia ve arkadaşları (2018), yaptıkları bu çalışmada, kablosuz algılayıcı ve aktüatör ağların, nesnelerin internetinde merkezi bir rol oynadığını ve hem enerji tasarruflu ve hem de az gecikmeli iletişimi sağlamak için büyük çaba harcandığını vurgulamışlardır. Son yıllarda, uzaktan haberleşme mimarilerinin LoRa gibi düşük güç iletimli, kilometrelerce alanı kapsayan ve düşük bit hızında çalışan yaklaşımlara doğru geliştiğini belirtmişlerdir.

Uzun-kısa menzilli ağlarda hem az enerji ile çalışan hem de az gecikmeli iletişim sağlamak için uzun mesafeli iletişimi, ultra düşük güçlü kısa menzilli uyandırma alıcılarıyla birleştirerek kısa ve uzun menzilli çalışan bir mimari önermişlerdir. Bu iki iletişim şemasının faydalarından yararlanmak için bir donanım mimarisi ve bir protokol önermişlerdir (Aoudia ve ark., 2018).

Centenaro ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, multi-hop (çok atlamalı) kısa mesafeli iletişim teknolojilerinin (örneğin; zigbee, bluetooth), nesnelerin interneti hizmetlerinin uygulamalarında geçerli bir yol olarak nitelendirildiğini belirtmişlerdir. Fakat bu teknolojilerin, özellikle tipik akıllı şehir senaryolarında olduğu gibi geniş kapsama alanı ihtiyacının söz konusu olduğu uygulamalarda yetersiz kaldıkları belirtilmiştir. Bu kısa mesafe teknolojilerin kapsama alanı yeteneğinin sınırlı olması, şehirde geniş alanlarda çalışmasına engel bir durum oluşturduğu vurgulanmıştır. Yine bu çalışmalarında, UMTS (Universal Mobile Communication Service), LTE (Long Term Evolution) gibi son teknoloji kablosuz hücresel ağların devasa sayıdaki cihazın ihtiyacı olan makine tipi hizmeti verebilecek şekilde tasarlanmadıklarını vurgulayarak, mevcut hücresel ağların uzun menzilli nesnelerin interneti senaryoları için uygun olmadığını belirtmişlerdir. LPWAN ailesinin bir üyesi olarak LoRA teknolojisinin akıllı şehir uygulamalarında LoRa'nın uzun kapsama bağlantısı özelliği sayesinde çok büyük fayda sağlayacağı sonucuna varmışlardır (Centenaro ve ark., 2016).

Akıllı sulama sistemlerinde, LoRa tabanlı akıllı sulama sistemi deneyimlenmiştir. Çalışmanın amacı maliyet, enerji verimliliği ve su tasarrufu sağlamak olduğu ifade edilmiştir. Saha testlerinde, RSSI ve SNR değerleri incelenmiştir. Mesafe arttıkça sinyal gücünün zayıfladığı gözlemlenmiştir (Zhao, Lin, Han, Xu, & Hou, 2018). -118 dbm RSSI ve -16.5 dbm den sonra uç sensör cihazının gönderdiği uplink sinyallerinin artık ağ geçidi tarafından algılanmadığı ortaya çıkmıştır. Yaptıkları çalışmanın deneysel sonuçları, önerdikleri sistemin uygulanabilirliğini doğruladığını ifade etmişlerdir. Ve bu sonuçlara göre, düğüm cihazları ile ağ geçidi arasındaki haberleşme mesafelerinin 8 kilometreye kadar çıktığı gözlemlenmiştir (Zhao ve ark., 2018).

LoRaWAN kullanılarak trafik yoğunluğu izleme sistemi kurulmuştur (Nor, Zaman, & Mubdi, 2017). Sıkışan trafiğe çözüm getirmek adına sahaya yerleştirilen çeşitli sensörlerin verilerini toplayarak gelen veri yorumlanmıştır, bu analiz ile o andaki araç yoğunluğu tespit edilmiştir. Sensör verilerini toplamak için uzun menzil kapsama alanı ve düşük güç tüketim özelliği sağlayan LoRa - LoRaWAN teknolojisi kullanılmıştır. SNR ve RSSI değerlerini inceleyip test noktalarına göre yorumlamışlardır. 15 km yarıçapı bulan kapsama alanı ile

sahada bir takım testler yaparak olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Trafik ışıkları sistemine alternatif bir model sunmuşlardır (Nor ve ark., 2017).

Rosmiati ve arkadaşları (2019) LoRa modülünü alıcı-verici sistem olarak kullanarak hava kirliliği izleme sistemi tasarlamışlardır. Hava sensörlerini Raspberry Pi cihazına entegre ederek, Raspberry Pi'yi bir veri işleyicisi olarak kullanmışlardır. LoRa modülü de alıcı-verici görevi üstlenmiştir. Bu şekilde verinin, göndericiden alıcıya internete gerek duymadan gönderilmesi sağlanmıştır. Veri iletim menzili görüş mesafesindeki test noktalarında maksimum 1.7 km olurken, görüş mesafesinde olmayan test noktalarında ise veri iletim menzilin 400 m seviyelerinde kaldığını belirtmişlerdir (Rosmiati ve ark., 2019).

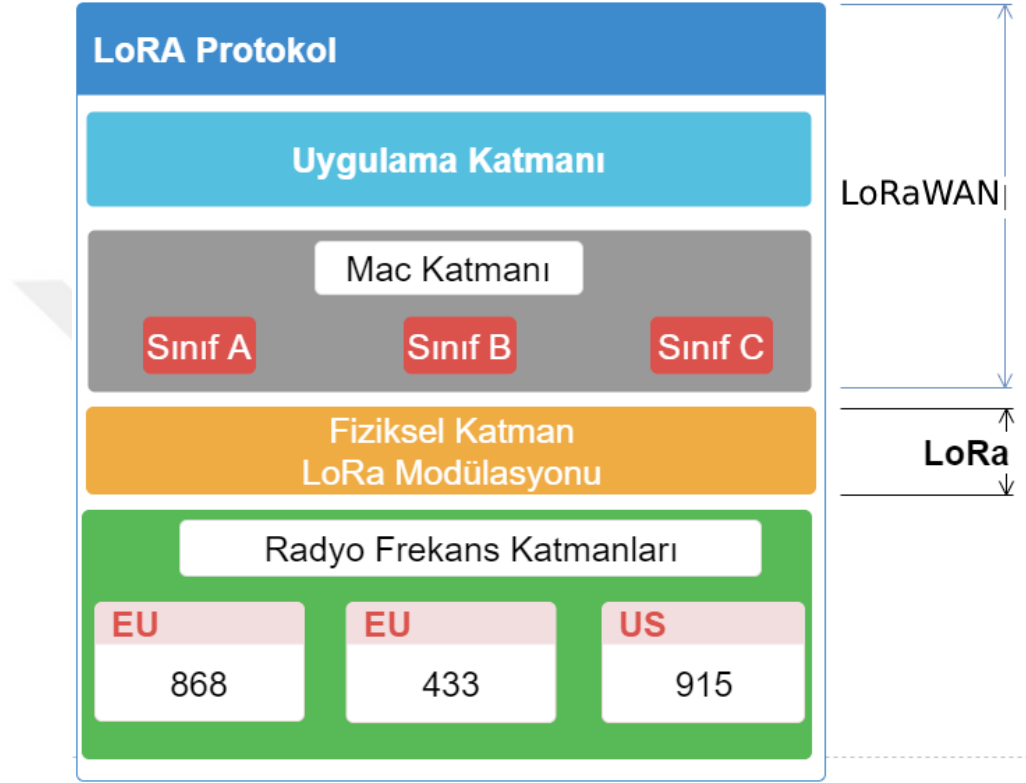
Çalışma LoRa performans analizi üzerinedir. Bir kablosuz sensör ağına dağınık kablosuz uç cihazların etkinliği, kablosuz iletişimin yayılma etkileri, ağ paraziti ve termal gürültü gibi çeşitli mekansal bozukluklardan dolayı kısıtlanır. Kablosuz ortamda sinyal yayılmasının faktörleri arasında, yayılan sinyaller mesafe arttıkça zayıflaması olarak bilinen yol kaybı (path loss) yer almaktadır. Bununla birlikte büyük engellerin (dağ, bina vs.) neden olduğu sinyallerin engellenme durumu (gölgeleme olarak da adlandırılır) ve aynı iletilen sinyalin birden fazla kopyasının oluşması da yer almaktadır. (Noreen ve ark., 2017).

Hücre ve kablosuz sensör ağları bağlamında çeşitli iç ve dış ortamlarda çok sayıda saha ölçümü yapılmıştır. Genel olarak yol kaybı (PL), engeller, binalar, tepeler, dağlar, insanlar, mesafe, frekans bandı, ortalama anten yükseklikleri, coğrafya ve arazi gibi birçok faktörden etkilenir (El Chall ve ark., 2019). LoRa teknolojisinin performansı, farklı uygulama türleri için analiz edilirken, yol kaybı da literatürde yapılan bu analiz çalışmalarında incelenmiştir (Linka, Rademacher, Aliu ve Jonas, 2018; Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019; Plets, Podevijn, Trogh, Martens ve Joseph, 2018; Reda, Daely, Kharel ve Shin, 2018).

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1. LoRa

LoRa protokolü Şekil 3.1’de verilmiştir. Uygulama katmanı, MAC katmanı ve radyo frekans katmanlarından oluşan LoRa protokolü, bölgesel olarak farklı frekanslarda çalışmaktadır.



Şekil 3.1 LoRa Protokol Yığı

LoRa ve LoRaWAN teknolojilerinin hangi katmanlarda devreye girdiği yukarıdaki görselde görülmektedir. Fiziksel katmanda, LoRa modülasyonu yer almaktadır.

3.1.1. Shannon-Hartley Teoremi

Bilgi teorisinde, Shannon-Hartley teoremi, bilginin gürültü varlığında belirli bir bant genişliğine sahip bir iletişim kanalı üzerinden iletilebileceği maksimum hızı belirtir (Semtech, 2015). Bu teorem, Shannon'un bir iletişim bağlantısı için kanal kapasitesini belirlerken, gürültü girişiminin olduğu ortamda belirli bir bant genişliği içinde iletilebilecek maksimum veri hızını tanımlar. Eşitlik 3.1:

$$C = B * \log_2 \left(1 \pm \frac{S}{N} \right) \quad (3.1)$$

C: Kanal Kapasitesi (bit/s)

B: Kanal Bant Genişliği (Hz)

S: Ortalama Alınan Sinyal Gücü (Watt)

N: Ortalama Gürültü veya Girişim Gücü (Watt)

S/N: Doğrusal bir güç olarak ifade edilen Sinyal Gürültü Oranı (SNR) eşitlik 3.1, doğal logaritmaya dönüştürülerek tekrar yazılırsa;

$$\frac{C}{B} = 1.433 * \frac{S}{N} \quad (3.2)$$

Yayılı spektrum uygulamaları için (sinyal / gürültü) oranı, sinyal gücü genellikle gürültü tabanının altında yer aldığı için dolayısıyla küçüktür. $S / N < 1$ gibi bir gürültü seviyesi varsayıldığında, Eşitlik 3.2 şu şekilde yeniden formüleleştirilebilir:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3' ten, sabit gürültü-sinyal oranına sahip bir kanalda hatasız bilgi iletmek için sadece iletilen sinyal bant genişliğinin artırılması gerektiği görülebilir (Semtech, 2015).

3.1.2. LoRa Modülasyonu

LoRa modülasyonu, bitleri kanal üzerinden iletmek amacıyla ihtiyacı olan enerji miktarını azaltmak için geleneksel yayılı spektrum ilkeleri üzerinden hareket etmektedir (Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019). Cıvıltı modülasyonunun kullanılmasıyla, kablosuz iletişim bağlantısı -137 dBm'lik bir hassasiyet ve 157 dB'ye kadar bir bağlantı maliyeti elde edilebilir. Böyle bir performansın elde edilmesindeki olay, veri hızını saniye başına kilobit mertebesine düşürmektir (Lavric & Popa, 2017). 157 dB, uzun iletişim aralıkları elde etmeyi veya iletim gücünü azaltmayı ve böylece uç cihazların enerjisinden tasarruf etmeyi sağlar (Petäjäjärvi, Mikhaylov, Pettissalo, Janhunen, & Iinatti, 2017).

Ulaşılabilir iletişimdeki Veri Hızı (DR), bant genişliği (BW) (Hz), Yayılma Faktörü (SF, Spread Factor) ve Kodlama Hızı'ndan (CR) hesaplanır. SF, hizmet kalitesini sağlayan anahtar değişkendir (Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019). Daha düşük SF değerleri kullanılırken, veri hızı çok yüksektir ve yayın süresi düşüktür. Daha yüksek SF değerleri mesafeyi arttırır fakat hizmet kalitesini sınırlar. 7'den 12'ye kadar olan SF'ler ortogonal iletişime izin verir, farklı ağlar aynı frekans bandında parazit olmadan aynı anda konuşabilir. Eşitlik 3.4, veri aktarım hızını ve SF, Sembol Hızı (RS), BW arasındaki ilişkiyi tanımlar.

$$RS = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (3.4)$$

Çizelge 3.1, Chirps / Symbol ve Demodülasyon SNR'sine karşı SF değerlerini göstermektedir. SF LoRa modülasyonu, her bir bilgi bitinin çoklu cıvıltı(multi-chirps) bilgileriyle temsiline dayanır.

Çizelge 3.1 LoRa SF değerleri (Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019)

SF	Sembol	Demodülasyon SNR
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

3.1.3. RSSI ve SNR

RSSI miliwatt cinsinden alınan sinyal gücüdür, RSSI dBm cinsinden ölçülür ve negatif bir değerdir. 0'a ne kadar yakınsa sinyal o kadar iyidir [2]. Örneğin, RSSI = -20 dbm ise iyi sinyal anlamına gelirken, RSSI = -120 dbm ise kötü sinyal anlamına gelmektedir.

SNR, alınan güç sinyali ile gürültü tabanı güç seviyesi arasındaki orandır. Gürültü tabanı, iletilen sinyali bozabilen tüm istenmeyen parazitli sinyal kaynaklarının bulunduğu bir alandır ve bu nedenle yeniden iletimler meydana gelmektedir. SNR 0'dan büyükse, alınan

sinyal gürültü tabanının üzerinde çalışıyor anlamına gelmektedir. SNR 0'dan küçükse, alınan sinyal gürültü tabanının altında çalışıyor anlamına gelmektedir. Normalde gürültü tabanı fiziksel hassasiyet sınırındır, ancak LoRa gürültü seviyesinin altında da çalışmaktadır. Tipik LoRa SNR değerleri şunlardır: -20dB ile + 10dB + 10dB'ye daha yakın bir değer, alınan sinyalin daha az bozuk olduğu anlamına gelmektedir. LoRa, gürültü tabanının -7.5 dB ila -20 dB altındaki sinyalleri demodüle etmektedir [2].

3.1.4. Bağlantı Maliyeti

Bağlantı maliyeti (link budget) ise, bir telekomünikasyon sisteminde vericiden ortam, diğer bir deyişle boş alan aracılığıyla alıcıya gelen tüm kazanç ve kayıpların toplamıdır. Bağlantı performansını ölçmenin bir yoludur [2]. Alıcı hassasiyeti, alıcının sinyali alabileceği veya demodüle edebileceği en düşük güç seviyesidir.

3.2. LoRaWAN

Bu bölümde, cihaz sınıfları, LoRaWAN protokolü, batarya ömrü, ağ kapasitesi ve güvenlik konuları detaylı bir şekilde incelenmektedir.

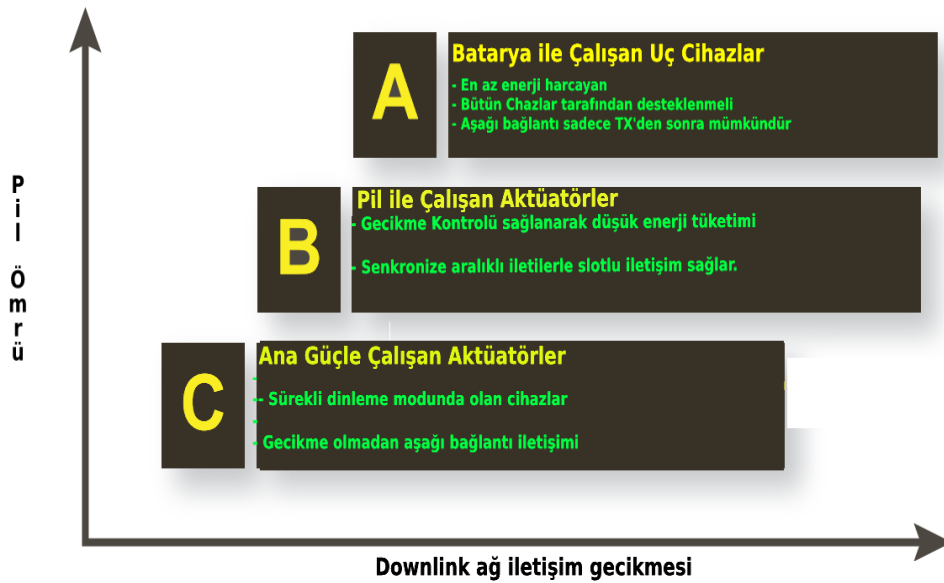
3.2.1. LoRaWAN Cihaz Sınıfları

Uç cihazlar, tasarıya ve amaca göre farklı uygulamalara hizmet eder. Bu durum farklı gereksinimler, yapılar, roller ortaya çıkarmaktadır. LoRaWAN™, çeşitli uygulama özelliklerini optimize etmek için farklı cihaz sınıflarını kullanmaktadır. Cihaz sınıfları, ağın downlink iletiminin gecikmesi ile pil ömrü arasında değiş tokuş yaparak denge kurmaktadır. Hem downlink hem uplink'in eşit derecede yoğun ve önemli olduğu kontrol veya aktüatör tipi bir uygulamada, downlink iletiminin gecikmesi önemli bir faktördür (Semtech Corporation, 2015). LoRaWAN spesifikasyonu, Çizelge 3.2'de de belirtildiği üzere 3 cihaz sınıfı tanımlamaktadır.

Çizelge 3.2 LoRaWAN sınıfları karşılaştırılması

Sınıf	Enerji Tüketimi	Açıklama
A	Enerji Açısından En Verimli	Bütün Uç Cihazlar Tarafından desteklenmelidir.
B	Kontrollü downlink ile verimlidir	Senkronize aralıklı iletilerle slotlu iletişim sağlar.
C	En az verimli olandır	Sürekli dinleme modundadır, Gecikme olmadan aşağı yönlü bağlantı sağlar.

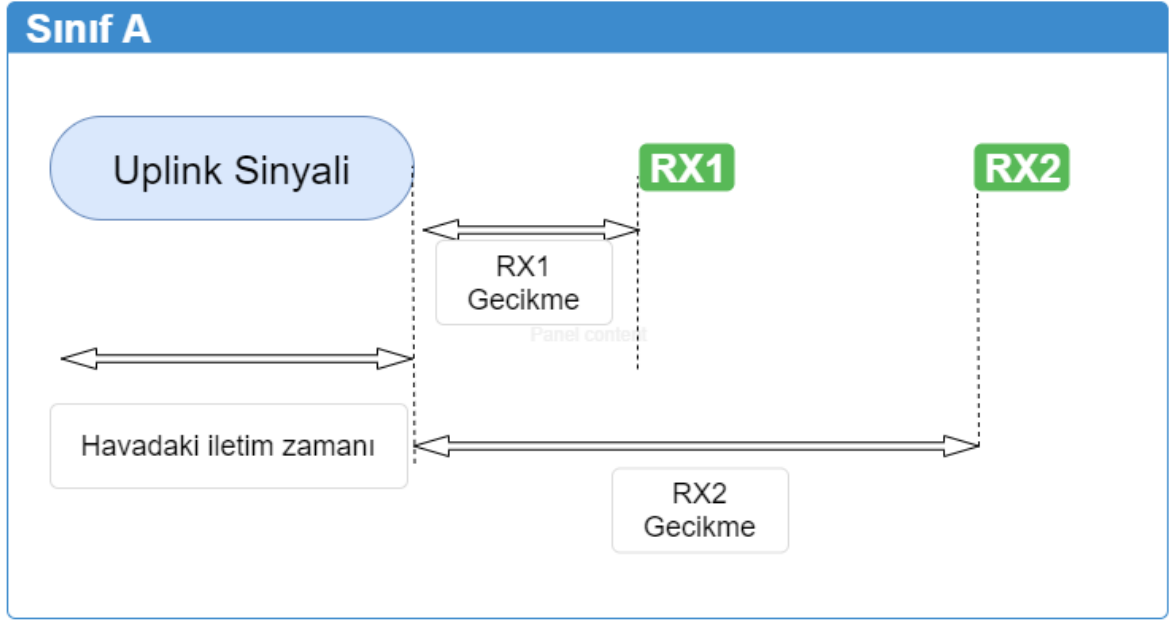
A, Pille çalışan cihazlar. Her cihaz ağ geçidine uplink gönderir ve ardından iki kısa downlink penceresi gelir. B, Sınıf A ile aynı özelliklere sahip ancak bu cihazlar ayrıca planlanan zamanlarda ekstra alma pencereleri açar. C sınıfı da keza A ile aynıdır ancak bu cihazlar sürekli dinleme modundadır. Bu nedenle, bu cihazlar daha fazla güç kullanır ve genellikle şebekeden beslenir. Söz konusu sınıfların özellikleri, Şekil 3.2’de LoRaWAN cihaz sınıflarının pil veya batarya ömrü ile downlink ağ iletişimi gecikmesi ilişkisi ile birlikte verilmiştir.



Şekil 3.2 LoRaWAN Sınıfları Aşağı yönlü bağlantı ve Pil Ömrü ilişkisi

3.2.1.1 A sınıfı

Belirlenen herhangi bir zamanda bir uç cihaz sinyal yayınlayabilir. Bu uplink iletiminden (tx) sonra, uç cihaz ağ geçidinden uplink’e karşılık bir yanıtı dinleyecektir.

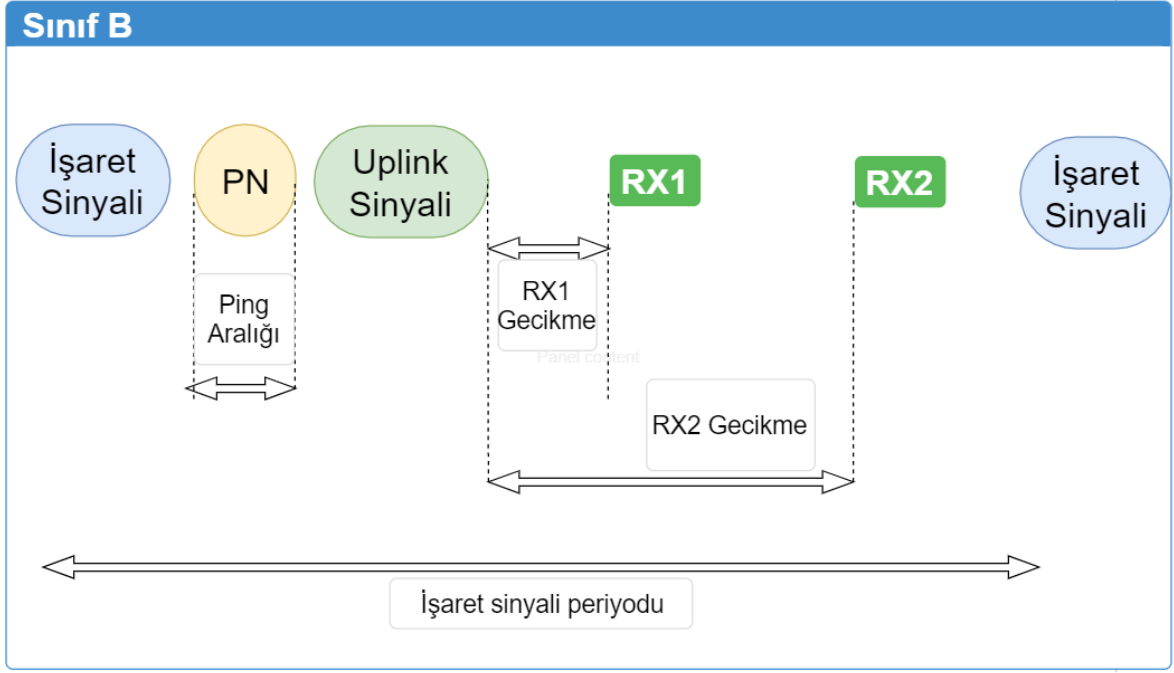


Şekil 3.3 LoRa A sınıfı sinyal trafiği

Şekil 3.3’ te verildiği üzere uç cihazdan ağ geçidine gönderilen mesajdan (uplink) sonra, uç cihaz belirlenen zamanda iki alıcı yuva (RX1 gecikme ve RX2 gecikme) açar. Eğer sunucudan bir sinyal gelmezse bir sonraki uplink periyoduna kadar uç cihaz, sunucudan mesaj (downlink) sinyali alamaz. Bu demektir ki, uç cihaz uplink göndermedikçe downlink alamaz. A sınıfı cihaz çoğunlukla uyku modundadır dolayısıyla en az enerji tüketim harcayan sınıftır. Uplink gönderim periyotları arasında genellikle uzun zaman aralıkları bulunur. Downlink’e ihtiyacın olmadığı izleme sistemleri için idealdir.

3.2.1.2 B Sınıfı

B sınıfı cihazlar, A sınıfı alıcı yuvalarına ek olarak, planlanan zamanlarda ekstra alıcı yuvaları açar.

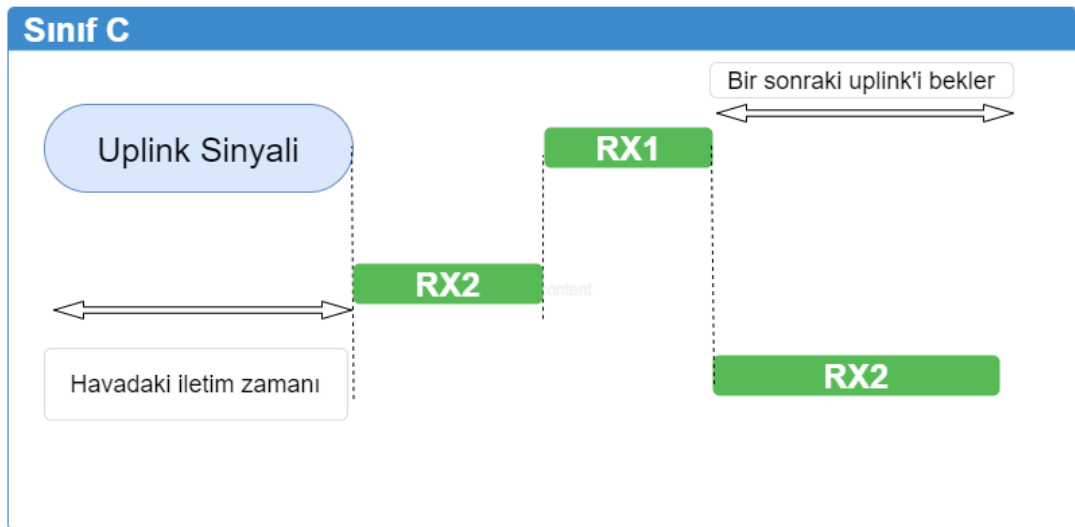


Şekil 3.4 LoRa B Sınıfı sinyal trafiği

Şekil 3.4'te B sınıfı sinyal trafiği verilmiştir. Uç cihaz, ağ geçidinden senkronize edilmiş, zamanlandırılmış bir işaret alır ve ağ geçidinin uç cihazın ne zaman dinlediğini bilmesini sağlar. Downlink sinyalinin alınmaya müsait olduğu bu zaman aralığına ping aralığı denir (Device Classes, 2020). B sınıfı bir cihaz, C cihazı işlevselliğini desteklemez.

3.2.1.3 C Sınıfı

Şekil 3.5 LoRa C Sınıfı sinyal trafiği verilmiştir.

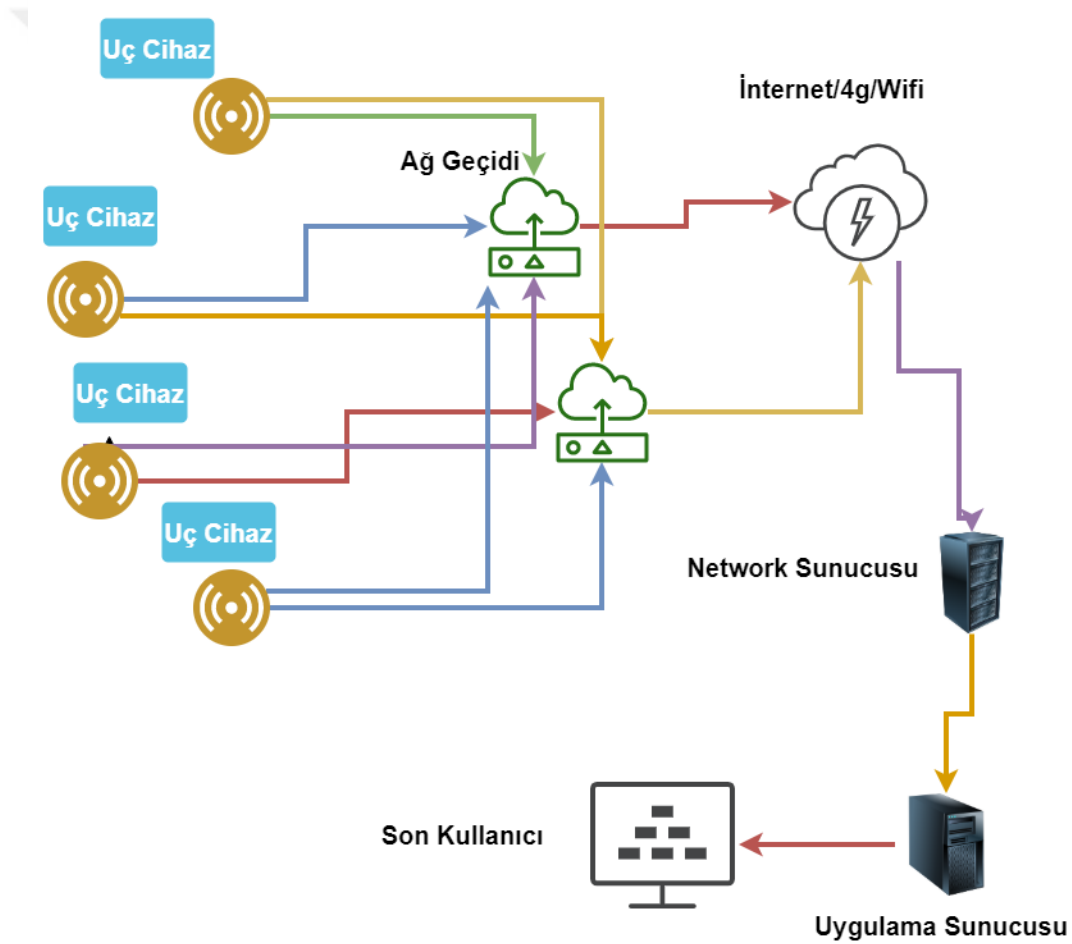


Şekil 3.5 LoRa C Sınıfı sinyal trafiği

C sınıfı, A sınıfı alıcı yuvalarına ek olarak, ağ geçidinden gelen yanıtları sürekli olarak dinleyecektir. C sınıfı bir cihaz, B cihazı işlevselliğini desteklemez. Enerji tüketimi A sınıfından daha fazladır. Merkezi sunucudan gelecek olan downlink sinyaline göre hareket edecek mimarilerde kullanılır.

3.2.2. LoRaWAN Protokolü ve LoRaWAN Ağı

Burada fiziksel protokol olan LoRa uzun menzilli bağlantıyı sağlarken, iletişim protokolünü ve ağ sistemi mimarisini tanımlayan bir yapıdır. Protokol ise, bir uç cihaz pil ömrünü, ağ kapasitesini, QoS, güvenliği ve ağ tarafından sunulan uygulamaların miktarını belirlemeyi etkiler (De Carvalho Silva ve ark., 2017; Lorient ve ark., 2017).



Şekil 3.6 LoRaWAN Ağı

Bu tez çalışmasında kullandığımız topoloji Şekil 3.6'daki gibidir. Tipik bir LoRaWAN ağı “yıldızların yıldızı” topolojisidir (Lavric & Popa, 2017). Uç cihazlar, LoRa ve LoRaWAN teknolojilerini kullanarak iletişim gerçekleştirir (Şekil 3.6). Ağ geçitleri LoRaWAN

çerçevelerini, genellikle Ethernet, 3G / 4G, uydu veya Wi-Fi olmak üzere daha yüksek verime sahip bir veri iletim arabirimi kullanarak uç cihazlardan bir ağ sunucusuna gönderir. Mevcut konuşlandırılmış ağların çoğu, bir örgü (mesh) ağ mimarisi kullanır. Bir örgü ağında, her bir uç cihaz bilgiyi bir diğer uç cihaza ileterek haberleşme kapsama alanını ve ağın hücre büyüklüğünü artırır. Bu durum haberleşme kapsama alanını artırır fakat aynı zamanda karmaşıklığa yol açar, ağ kapasitesini azaltır ve her bir uç cihaz, kendisiyle alakalı alakasız her bilgiyi alıp bir diğerine ilettiği için batarya ömrünü azaltır (Semtech Corporation, 2015; Lee ve Ke, 2018). Uzun menzilli haberleşmenin başarılması için batarya ömrünün korunduğu, düşük enerji harcayan yıldızlar ağı en mantıklı ağ seçeneğidir. Uzun menzilli bağlantı, baz istasyonları sayısı ve cihazın pil ömrü, yıldızların ağı mimarisi sayesinde yapılan iyileştirmelerdir.

Bir LoRaWAN ağında, uç cihazları sadece belirli bir ağ geçidi ile ilişkili olmayabilir, sadece bir ağ geçidine veri gönderir koşulu yoktur. Bunun yerine, bir uç cihaz tarafından iletilen veri birçok ağ geçidi tarafından algılanabilir. Her bir ağ geçidi, uç cihazdan alınan paketi bulut tabanlı bir ağ sunucusuna hücresel, Ethernet, uydu veya Wi-Fi gibi ana taşıyıcı iletim sistemi aracılığıyla iletir. Yapının zeka ve karmaşıklığı ağı yöneten fazladan alınan paketleri filtreleyen ağ sunucusunda yer almaktadır. Ağ sunucusu, aygıtlar tarafından gönderilen paketlerin kodunu çözer, güvenlik kontrolleri ve uyarlanabilir veri hızını gerçekleştirir, böylece cihazlara geri gönderilmesi gereken paketleri oluşturur. Her uygulama ağ sunucusundan veri alır. Güvenlik paketlerinin kodunu çözmekte ve bilgileri, uygulamadaki eyleme karar vermek için kullanmaktadır.

Uzun menzilli bir ağda, ağ geçidinin çok sayıda uç cihazdan mesaj almak için yüksek kullanılabilirliğe sahip olması gerekir. Bu yüksek kapasite, uyarlanabilir veri hızı ve çok kanallı bir verici kullanılarak tahsis edilir, böylece ağ üzerinden eşzamanlı mesajlar alınabilir. Bu yeteneği etkileyen kritik faktörler: eşzamanlı kanalların sayısı, veri hızı, payload uzunluğu ve uç cihazların kullandığı frekanstır.

3.2.3. Batarya Ömrü

Bir LoRaWANTM ağındaki uç cihazlar eş zamansızdır ve olay güdümlü veya programlanmış verileri göndermeye hazır olduklarında iletişim kurarlar. Bu tarz protokol genellikle Aloha yöntemi olarak adlandırılır. Bir örgü ağda veya hücresel gibi senkronize bir ağda, uç cihazlar ağ ile senkronize olmak ve mesajları kontrol etmek için sık sık "uyanmak" zorundadır. Bu senkronizasyon önemli ölçüde enerji tüketir ve pil ömrünü kısaltmanın bir numaralı

faktörüdür. LPWAN alanını ele alan çeşitli teknolojiler üzerinde GSMA tarafından yapılan bir çalışmada, LoRaWAN™, diğer tüm teknoloji seçeneklerine kıyasla 3 ila 5 kat avantaj gösterdiği ortaya koyulmuştur (Semtech Corporation, 2015).

3.2.4. Ağ Kapasitesi

Uzun menzilli bir yıldız ağını uygulanabilir-yaşayabilir kılmak ve ağ geçidinin çok yüksek hacimli uç cihazlardan gelen mesajları alması için çok yüksek bir kapasiteye veya yeteneğe sahip olması gerekir. Bir LoRaWAN™ ağındaki yüksek ağ kapasitesi, uyarlanabilir veri hızı kullanılarak ve ağ geçidinde çok kanallı bir multi-modem alıcı-verici kullanılarak elde edilir, böylece birden çok kanaldan eşzamanlı mesajlar alınabilir. Kapasiteyi etkileyen kritik faktörler, eşzamanlı kanalların sayısı, veri hızı (yayın süresi), veri yükü boyutu ve uç cihazların hangi sıklıkla iletim yaptığıdır. LoRa®, cıvıltılı yayılma spektrum tabanlı bir modülasyon olduğundan, farklı yayma faktörleri kullanıldığında sinyaller pratik olarak birbirine ortogonaldır. Yayılma faktörü değiştikçe, etkin veri hızı da değişir. Ağ geçidi, aynı anda aynı kanalda birden fazla farklı veri hızı alabildiği için bu özellikten yararlanarak avantaj sağlar. Bir uç cihazın iyi bir bağlantısı varsa ve bir ağ geçidine yakınsa, her zaman en düşük veri hızını kullanması ve mevcut spektrumu gerekenden daha uzun süre doldurması için hiçbir neden bulunmamaktadır. Veri hızını daha yükseğe kaydırarak, yayındaki süre kısaltılır ve diğer uç cihazların iletimi için daha fazla potansiyel alan açılır. Uyarlanabilir veri hızı, bir uç cihaz pil ömrünü de optimize eder. Uyarlanabilir veri hızının çalışmasını sağlamak için, yeterli downlink kapasitesi ile simetrik uplink ve downlink gereklidir. Bu özellikler, bir LoRaWAN™ ağının yüksek bir kapasiteye sahip olmasını ve ağı ölçeklenebilir hale getirmesini sağlar.

3.2.5. Güvenlik

Herhangi bir LPWAN'ın güvenliği sağlaması son derece önemlidir. LoRaWAN™ iki güvenlik katmanı kullanır: biri ağ için, diğeri uygulama için. Ağ güvenliği, ağıdaki uç cihazın gerçekliğini teyit ederken, uygulama güvenliği katmanı, ağ operatörünün son kullanıcının uygulama verilerine erişiminin olmamasını sağlar. AES şifrelemesi, bir IEEE EUI64 tanımlayıcısı kullanan anahtar değişimiyle birlikte kullanılır. Uç cihazdan uygulamaya ve uç cihazdan ağ sunucusuna giden veriler, dört bileşenle AES 128 şifreleme ile korunur:

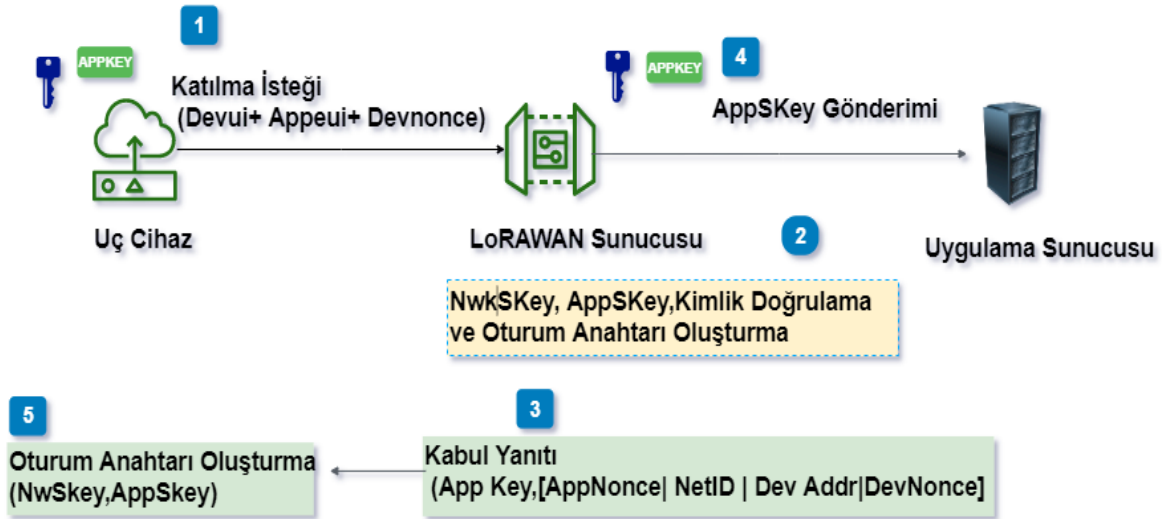
- DevAddr: 32 bit uç cihaz tanımlayıcı kimliği.

- AppEUI: IEEE UI64 adres alanı olan bir uygulamaya özel tekil tanımlayıcısı.
- NwkSKey: Uç cihazdan ağ-sunucu iletişimini şifrelemek için kullanılan bir Ağ oturum anahtarı.
- AppSKey: uygulamaya özel verileri korumak için kullanılan bir Uygulama oturum anahtarı (AES-128 anahtarı).

Bir LoRaWAN ağına katılmak için her uç cihazın kişiselleştirilmesi ve etkinleştirilmesi gerekmektedir. LoRaWAN , iki ana uç cihaz aktivasyon yöntemini desteklemektedir. Kablosuz Aktivasyon (OTAA) ve Kişiselleştirme ile Aktivasyon (ABP) söz konusu ana iki yöntemdir (Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019; Sornin (Semtech), M., Eirich (IBM), Kramp (IBM) ve Hersent (Actility), 2015).

3.2.5.1 Havadan Aktivasyon (Over-the-Air Activation - OTAA)

Uç cihazlar, uygulamaya özel veri aktarım aşamasından önce ağa katılmaları gerekmektedir. Uç cihazlar, AppEUI (8 oktet), DevUI (8 oktet) ve bir DevNonce (2 oktet) ile şifrelenmemiş bir katılma isteği ile etkinleştirme safhasını başlatır. DevNonce rastgele oluşturulur ve ağ geçidi, her uç cihaz için bu değerlerin ilişkisel izini tutar (Ertürk, Aydın, Büyükakkaşlar ve Evirgen, 2019).



Şekil 3.7 Havadan Aktivasyon

Ağ sunucusu katılma isteğine, kabul yanıtı verirse (Şekil 3.7), uç cihazın ağa katılmasına izin verilir. Cevaplanmamış mesajlar, uç cihazın ağa katılamayacağını belirtir.

Bir uç cihazdan gönderilen İlk katılma isteği mesajı şifrelenmez, ancak ağ sunucusundan gelen yanıt mesajı (Katıl Kabul Et - ;Join Accept) AppKey ile şifrelenir. NwkSKey ve AppSKey aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$NwkSKey = \text{ases128_encrypt}(AppKey, 0x01|AppNonce|NetID|DevNonce|pad16)$$
$$AppSkey = \text{ases128_encrypt}(AppKey, 0x02|AppNonce|NetID|DevNonce|pad16)$$

3.2.5.2 Kişiselleştirme ile Aktivasyon (ABP)

ABP modunda, uç cihazlar, katılma isteği / katılma yanıtı aşamalarını ortadan kaldırmak için DevAddr, NwkSKey ve AppSKey'i kendi bünyesinde kayıtlı tutar. Bu cihazlar, verilen anahtarlar ile ağ sunucusuyla doğrudan iletişim kurmaları sağlanır. Bu yöntemdeki zayıf nokta, kritik anahtarların depolanması ve güvenliğinin sağlanması hayati bir görevdir, herhangi bir donanım saldırısı bu anahtarları tehlikeye atabilir ve olmaması gereken bir ağ erişimi meydana gelebilir. Ayrıca ABP, uç cihazları belirlenmiş bir ağ geçidine bağlar, bu tarz direkt belirli ağ geçidine bağlı cihazlar LoRaWAN v1.1. den beri var olan dolaşım özelliğinden faydalanamaz.

3.3. Ağ Geçidi

Bir LoRaWAN ağ geçidi, tüm uç cihaz mesajlarının merkezileştirilmesinden ve bunları yüksek hızlı geniş bant erişimi yoluyla bir ağ sunucusuna iletmekten sorumludur, bu tanımın karşılığı olarak tez çalışmasında (Four-Faith, 2020) LoRaWAN ağ geçidi (Şekil 3.9) kullanılmıştır.



Şekil 3.8 F8L10 GW

Bir başka tanım daha yapacak olursak, LoRaWAN protokolünü temel alan ve çeşitli uygulama noktalarını LoRaWAN terminaline bağlayan endüstriyel bir kablosuz iletişim ağ

geçidi-baz istasyonudur. Toplanan veriler 3G / 4G veya kablolu Ethernet aracılığıyla sunucu bulut arayüzüne iletilmektedir. Gömülü 32-bit yüksek performanslı endüstriyel işlemciler ve endüstriyel kablosuz modüller içermektedir. Ethernet ve WIFI arayüzü ile WIFI kablosuz yapılandırma yönetimi ve çevrimiçi güncellemeyi destekler. GPS'i, 220 V güç kaynağını, POE güç kaynağını, güneş enerjisi ile beslemeyi veya DC güç kaynağını desteklemektedir. Şekil 3.6 ve 3.7 D22 ve D2A F8L10GW ağ geçitlerinin saha kurulumunu göstermektedir.



Şekil 3.9 D22 Saha Kurulumu



Şekil 3.10 D2A Saha Kurulumu

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 kurulumları gösterilen D2A ve D22 ağ geçitleri arasında yaklaşık 2 km kadar mesafe bulunmaktadır. D2A, D22'den daha yüksek bir konuma yerleştirilmiştir. Böylece yükseklikten farkının sinyal iletim değerlerine etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

3.4. Uç Sensör (Node)

Bu çalışmada geliştirilen, Şekil 3.12 de yer alan uç sensör cihazı çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Uç cihaz dış mekan aydınlatmanın ışık şiddetini ölçmesi için tasarlanmıştır.



Şekil 3.11 Uç Cihaz

GY-30 (*GY-30 Bh1750 Intensity Digital Light Sensor Module*, n.d.) lux sensörü ışık şiddetini ölçmek için kullanılmıştır. GY-30, çok yüksek hassasiyetli, ışık yoğunluğunu dijital sinyal çıkışına dönüştüren bir algılayıcıdır. Sensör, arduino nano bileşenine bağlanmıştır. Arduino Nano, Atmega328 temelli bir mikrodenetleyici kartıdır. LoRa modülasyonu için RN2483 modülü, arduino nano üzerine entegre edilmiştir. RN2483 UART arayüzü (Şekil 3.12) aracılığı ile LoRaWAN protokolü bağlantısını sağlamaktadır ve LoRaWAN A sınıfı ve C sınıfı protokol uyumluluğu bulunmaktadır (Microchip, 2015). Akıllı düşük güç modu programlanabilir uyanma özelliğine sahiptir. Uç cihazda ABP aktivasyon yöntemi kullanılmıştır. DevAddr, NwkSKey ve AppSKey anahtarları RN2483 LoRa modülüne işlenmiştir. Çalışma için tasarlanan uç cihazı A sınıfı cihaz tipidir.

3.5. LoRaWAN Ağı

Çalışma kapsamında, özel LoRaWAN sunucusu kurulmuştur. LoRaWAN sunucusu, Açık kaynak kodlu, hem ağ hem de uygulama sunucusunu entegre eden, Linux işletim sistemine

sahip LoRaWAN -Server sunucudur. LoRaWAN mimarisindeki ağ sunucusu için ise Linux işletim sistemi üzerine açık kaynak kodlu LoRaWAN-Server yazılımı kurulmuştur.

LoRaWAN -Server, hem ağ sunucusunu hem de uygulama sunucusunu entegre eden açık kaynaklı LoRaWAN Server (Gotthard, 2021) yazılımıdır, dolayısıyla kendi LoRaWAN ağlarını işleten uygulama sağlayıcıları veya cihaz ve uygulama geliştiricileri için kullanışlıdır. Şekil 3.13'te görüldüğü üzere F8L10GW ve uç cihazların sahip oldukları tekil anahtarlar, LoRaWAN sunucusuna tanıtılmıştır.

lorawan@arge-ubuntu Admin

Server >

Infrastructure v

Areas

Gateways

Networks

Multicast Channels

Devices v

Groups

Profiles

Commissioned

Activated (Nodes)

Ignored

Backends >

Frames

Edit node #2601183E

General ADR Status

DevAddr * 2601183E

Profile * aytasprofil

App Arguments

Location

NwksKey * 2AD61C01B3C48A472341B5A1E3F75C94

AppKey * A9DCE114A15F2C70E2D477BCFDCA7B48

Description hello

FCnt Up 0

FCnt Down * 1

Last Reset 2020-07-24 19:23:53

Last RX 2020-07-24 19:24:32

Device

Gateways MAC

54D0B4FFFE0A0D2A

Şekil 3.12 LoRaWAN sunucusu ekranı

Uç cihazların DevAddr anahtarları, ağ geçidi MAC adresleri Şekil 3.13'te gösterilen LoRaWAN sunucusu ekranlarından sunucuya tanıtılır böylece, uç cihazlardan gelen bilgiler izlenebilir. Ayrıca cihazların LoRaWAN ağına bağlı olup olmadığı izleme ekranlarından tespit edilebilmektedir. Uygulama sunucularına ve kestirim servisine entegrasyon LoRaWAN sunucusu üzerinden yapılmıştır.

3.6. Lojistik Regresyon

Lojistik regresyon bir veya birden fazla bağımsız değişkenin yer aldığı veri setini sınıflandırmak için kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Lojistik regresyon altında yatan temel matematiksel kavram, bir olasılık oranının doğal logaritmasıdır (Peng, Lee, & Ingersoll, 2002). Lojistik regresyon algoritması genellikle bağımlı değişkenin iki kategoride olduğu durumlarda kullanılır. Bu tez kapsamında kullanılan veri kümesi de böyle bir yapıda olduğundan dolayı lojistik regresyon algoritması arıza kestirimi için kullanılmıştır. Işık şiddeti değerleri ile arıza olduğu durumlar arasında ilişki kurularak modellenmiştir. Gözlemlenen verilere doğrusal bir model uydurmaya çalışmadan önce, bir modelci öncelikle ilgilenilen değişkenler arasında bir ilişki olup olmadığını belirlemelidir. Lojistik formüller, P olarak adlandırılan Y = 1 olasılığı cinsinden ifade edilir. Y'nin 0 olma olasılığı 1 - P'dir. ln sembolü doğal bir logaritmayı ifade eder ve $a + bX$, regresyon doğrusu için bilinen denklemdir. Lojistik regresyon, eşitlik (3.5) biçiminde bir denkleme sahiptir:

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = a + bX \quad (3.5)$$

P regresyon denkleminde de hesaplanabilir. Yani, eğer regresyon denklemini biliyorsak, teorik olarak, verilen bir X değeri için beklenen Y = 1 olasılığını hesaplayabiliriz.

$$P = \left(\frac{e^{a+bx}}{1 + e^{a+bx}} \right) \quad (3.6)$$

3.7. Log Distance Path

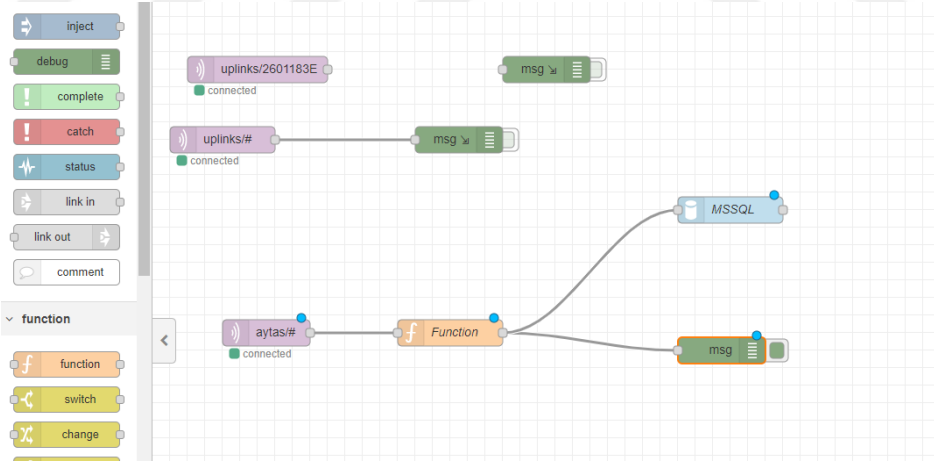
Eşitlik (3.7) da verilen formül, teorik yol kaybını hesaplamak için kullanacağımız Log Distance Path Loss formülüdür, Log-distance yol kaybı modeli, sinyalin bir binanın içinde veya uzaktaki yoğun nüfuslu alanlarda karşılaştığı yol kaybını tahmin eden bir radyo yayılma modelidir.

$$PL = P_{Tx_{dBm}} - P_{Rx_{dBm}} = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_\gamma \quad (3.7)$$

Birçok iç ve dış ortam deneylerinde kullanılan genel bir PL modelidir (El Chall ve ark., 2019). PL, desibel cinsinden beklenen yol kaybıdır. γ , yol kaybı exponentidir ve shadowing etkisi varsa, standart sapmalı sıfır ortalamalı Gauss rasgele değişkeni $X\sigma$ ile temsil edilir, bizim senaryomuzda, test noktalarının özelliklerinden dolayı 0 olarak kabul edilmiştir. PL_0 referans noktasının desibel cinsinden yol kaybıdır, d yolun uzun uzunluğu, d_0 ise referans noktanın uzaklığıdır.

3.8. NodeRed

NodeJs altyapısına sahip Web tarayıcıları üzerinde çalışan, akış tabanlı (flow-based) IoT uygulamaları geliştirme platformudur. Windows, Linux, MacOS, andorid OS, bulut platformları gibi birçok işletim sisteminde kurulabilir. Çalışma mimarisinde, LoRaWAN sunucusunun MQTT aracılığı ile gönderdiği verileri uygulama sunucularında göndermek için kullanılmıştır. MQTT, Nesnelerin İnterneti (IoT) için bir OASIS standardı mesajlaşma protokolüdür. Uzak aygıtları küçük bir kod alanı ve minimum ağ bant genişliği ile bağlamak için ideal olan son derece hafif bir yayınlama / abone olma mesajlaşma aktarımı olarak tasarlanmıştır (Mqtt.org, 2021). Şekil 3.13'te uç cihazdan ağ geçidi aracılığıyla gelen sinyal değerlerinin veri tabanı kayıt akışı verilmiştir.

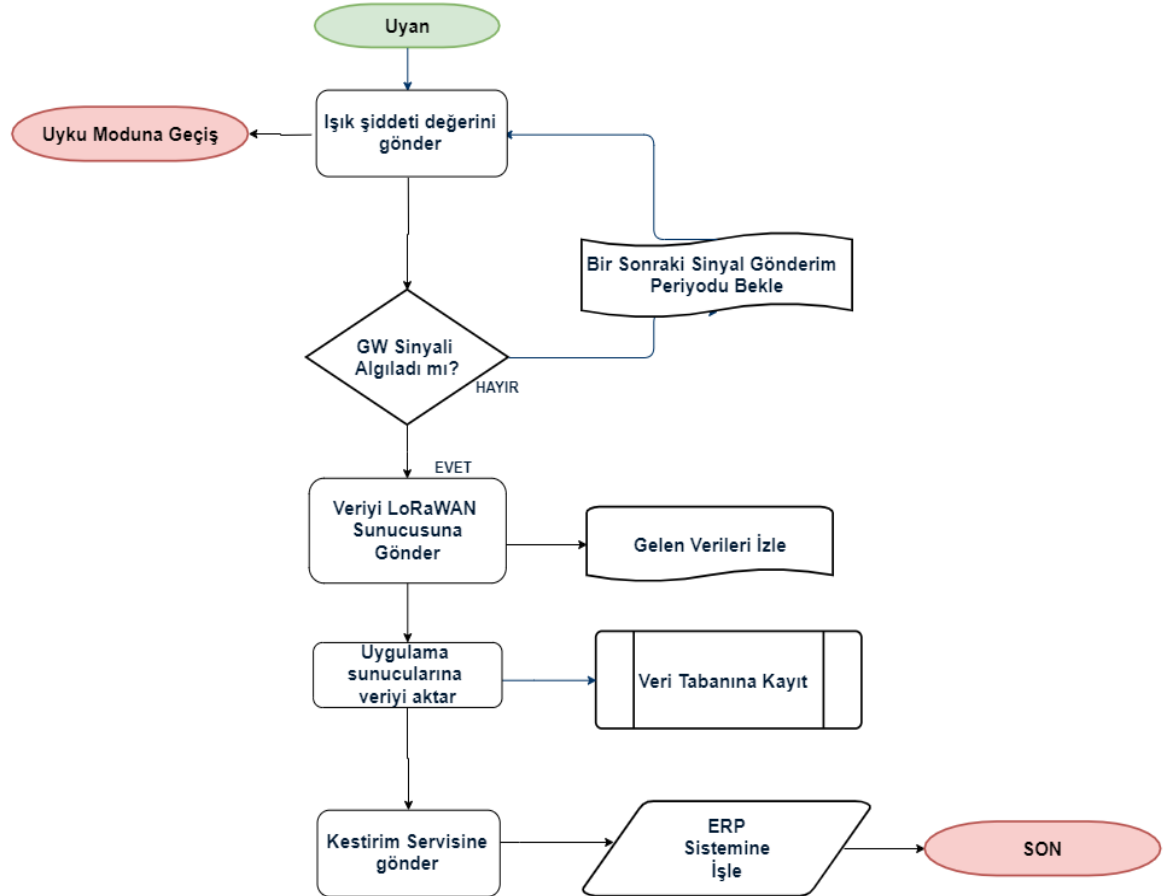


Şekil 3.13 NodeRed Veri Tabanı Kayıt Akışı

Çalışma kapsamında MQTT protokolünün kullanılabilmesi için sunucu üzerinde çeşitli yapılandırma ve kurulumlar yapılmıştır. MQTT protokolü için Windows işletim sistemine sahip sunucu üzerinde açık kaynak kodlu eclipse mosquitto (Mosquitto.org, 2021) mesaj kuyruk sistemi kullanılmıştır. Yapılan kurulumlar sonucunda windows server powershell NodeRed akışlarını kullanmak için, NodeRed hizmeti sunucuda aktif edilmiştir.

3.9. Sistemin Çalışma Yapısı

Sokak aydınlatması arıza tespit ve izleme sisteminin çalışması Şekil 3.16’de gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Aydınlatması Arıza Tespit ve İzleme Sistemi

Şekil 3.16 incelendiğinde, yapılan çalışmada, sahadaki aydınlatmalara ışık şiddetini veren sensörler yerleştirilmiş, kurulan LoRaWAN ağı sayesinde sahadaki LoRa ağ geçitleri sensör verileri LoRaWAN -server ağ sunucusuna aktarılmaktadır. LoRaWAN mimarisi, doğrudan ağ sunucusuyla iletişim kuran düğümlerden ve ağ geçidi modüllerinden oluşur. Bu düğümler, bir veya daha fazla Ağ Geçidi modülüyle iletişim kurabilen uzaktan kumanda yetenekleri sunabilen kablosuz sensör düğümüdür. Düğüm, bir mikro denetleyici tarafından yönetilen LoRa alıcı-vericisinden (transceiver) oluşur. Temel amacı mesajı modüle edip ağ geçidine ileten alıcı-verici yapılandırma komutları gönderir. Ağ geçidi modülü temelinde, bütün LoRa modülasyonunun tüm versiyonlarını paralel olarak tüm frekanslarda

özümleyebilen çok kanallı bir demodülatör olan LoRa konsantratörü bulunur. Düğüm cihazlardan ışık miktarına göre arıza olup olmadığını bildiren bir veri taşıyacak olan radyo frekans sinyalleri ağ geçidi cihazı tarafından algılanacaktır. Ağ geçidi tarafından algılanan sinyal, ağ geçidi üzerinden bulunan 4g veri hattı ile internete çıkarak, LoRa sinyali ip paketine dönüştürülür. LoRaWAN mimarisindeki ağ sunucusu için ise Linux işletim sistemi üzerine açık kaynak kodlu LoRaWAN -Server yazılımı kurulmuştur. Böylece, LoRa sinyalleri ve ağ geçidi durumları izlenebilmektedir.

LoRaWAN -server ağ sunucusuna gelen veriler MQTT haberleşme protokolünü kullanan client aracılığıyla NodeRed'te tasarlanan MQTT dinleyicisine gönderilir ve bu akış, sinyal değerlerini json veri türünde alarak MS Sql Server veri tabanına kayıt işlemini gerçekleştirir. Gelen veri içerisinde, sinyalin hangi ağ geçidinden'den geldiği, zaman bilgisi, hangi uç cihazdan geldiği, sinyal gürültü ve g  değerleri, uç cihazdan alınan bilgi dâhil olmak üzere önemli bilgiler yer almaktadır. JSON veri türünde alınan bilgi her türlü uygulama sistemine sunulabilir hale getirilmiştir.

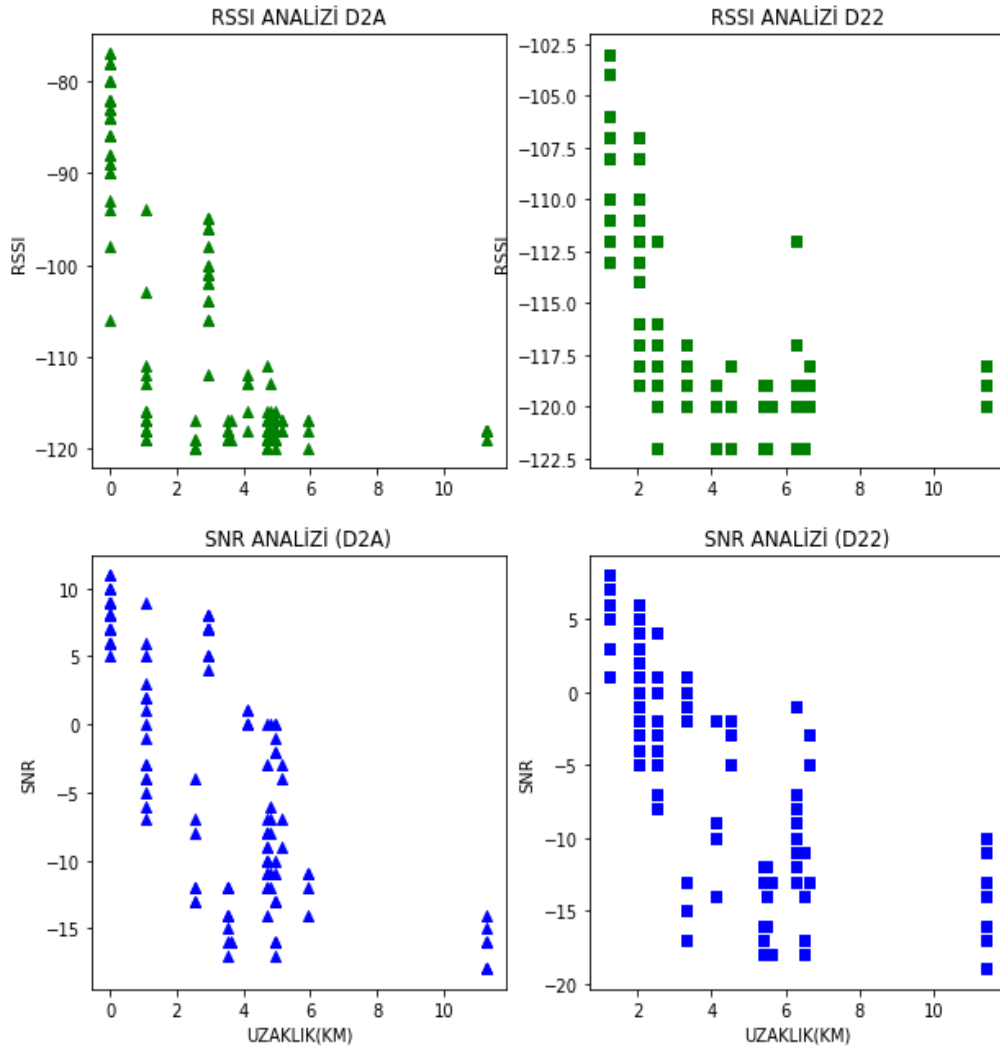
Arızalı armat rden gelen ışık şiddeti ve sorunsuz çalışan armat rden gelen ışık şiddeti değerleri üzerinden veri seti oluşturulmuştur. Elde edilen veri setinden alınan ışık şiddeti değerleri ile regresyon modeli oluşturularak kestirim yapılmıştır. Böylece alınan sinyalin arıza bildirimi mi olduğu tespit edilmiştir. Aynı akış, içerisinde yer alan bir işlem ile de restful web servis aracılığı ile şirket süreçlerinin yönetildiği kurumsal kaynak planlama programları bütünü olan SAP (systeme, anwendungen und produkte in der Datenverarbeitung) ERP (enterprise resource planning) sistemine aktarılır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kablosuz sensör ağlarında, paket iletim-alım deneylerinde temel olarak, logaritmik mesafeye karşı yol kaybı, alınan sinyal seviyesi profili ve elde edilen SNR verileri performans ölçütleri olarak değerlendirilir. Gerçek dünya deneylerinde, saha yerleşimi ve ağ optimizasyonu, ağın kapsama alanını ve performansını tahmin etmek için doğru yol kaybı (PL) modellemesi gerekmektedir. Verici ve alıcı arasındaki bağlantı link budget yanı sıra farklı yayılma koşullarının karşılaştırılması bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Yine de bu çalışmada, hem teorik hem de ölçüm sonuçlarıyla yol kaybını analizi yapılmıştır. Kablosuz kanallarda, yol kaybı, verici ile alıcı arasındaki yol boyunca güç kaybını ifade etmektedir.

4.1. RSSI ve SNR Analizi

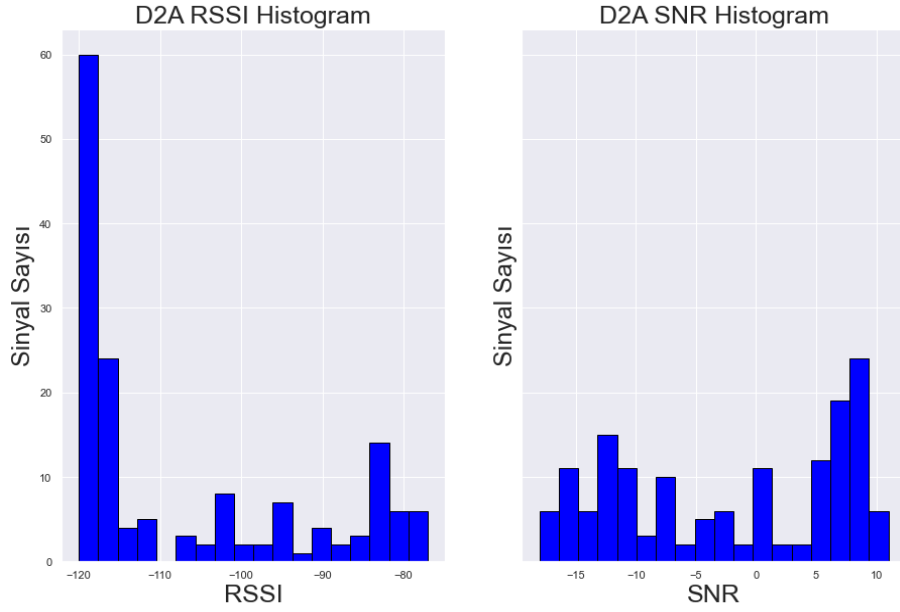
Çalışma kapsamında çeşitli saha testleri yapılarak söz konusu değerler incelenmiştir. Saha testleri ile beraber farklı konumlarda sinyal değerlerinin nasıl bir değişim göstereceği görselleştirilerek teori ile gerçek dünya arasındaki durum irdelenecektir. Bir diğer getirisi ise sistemin ne kadar kapsama alanı sağlayacağıdır. Söz konusu saha testleri esnasında sahaya 2 tane ağ geçidi yerleştirilmiştir. Çeşitli konumlardan ışık şiddeti verisini içeren sinyal gönderimi yapılarak kapsama alanı ve veri iletim oranları incelenmiştir. Bu iki ağ geçidine gelen RSSI ve SNR değerleri incelendiğinde, sinyallerin test yatağının konumuna, yüksekliğine ve etrafındaki bina gibi çevresel faktörlerden etkilendiği gözlemlenmiştir. Çeşitli noktalarda armatür ışığının değerleri alındığında hangi lüks değerinden itibaren arıza durumu olabileceği kestirimi yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 4.1’de 4 grafikte uzaklığa göre RSSI ve SNR değerlerinin dağılımı görülmektedir.



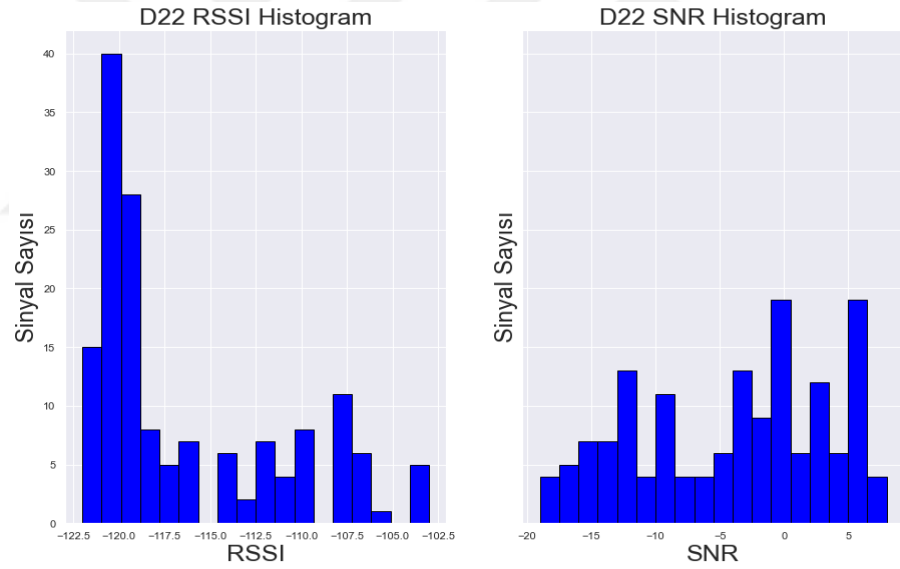
Şekil 4.1 RSSI ve SNR Analizi

Bu dağılımdaki veriler her iki ağ geçidine de ulaşmış verilerdir. İlk 3 km'deki ölçümlerde sinyal değerlerinin kaliteli olduğu Şekil 4.1 üzerinde görülmektedir. Uzaklık arttıkça RSSI değerlerinin olumsuz yönde etkilenmiştir, Mesafe arttıkça RSSI değerleri olumsuz etkilenmesine rağmen LoRaWAN sinyal zayıflasa da sinyalleri algılamaktadır. Mesafe arttıkça RSSI değerleri azalır analizi, SNR için de geçerlidir. SNR üzerinden de sinyal zayıflamasına rağmen LoRaWAN sinyalleri algılamaktadır. D22'nin bulunduğu konum için araç trafiğinin çok yoğun olduğu bir bölge tercih edilmiştir. Yükseklik olarak da D2A'dan çok daha alçakta yer almaktadır. Bu durumun etkisini, D2A sinyal gücü -80 dbm'lere kadar ulaşırken, D22'ye ulaşan sinyallerde ise -102 dbm'e kadar sinyal gücü görülmektedir.

SNR değerleri de incelendiğinde D2A'nın D22'ye oranla daha gürültü açısından daha temiz sinyaller algılamıştır. SNR değerleri, test noktasında bulunan ağaç ve bina gibi çevresel kalabalıktan etkilendiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2 D2A Histogram



Şekil 4.3 D22 Histogram

Şekil 4.2 ile D2A ağ geçidine gelen sinyallerin histogram grafiği verilmiştir. SNR ve RSSI değerlerinin dağılımı görülmektedir. Şekil 4.3'te de D22 ağ geçidine gelen RSSI ve SNR değerlerinin histogram grafiği verilmiştir. Bu grafiklerden, kaç tane sinyalin hangi RSSI ve SNR değerlerine sahip olduğu dağılımı gözlemlenebilir.

4.2. Test Noktalarının Uzaklıkları Ve İletim Oranları

Çizelge 4.1’de sahada gerçekleştirilen testlerin ağ geçitlerine olan uzaklığı ve başarılı paket iletim oranları verilmiştir. Şehir içi ve şehir dışı olmak üzere çeşitli birbirinden farklı 16 test noktası seçilerek yapılan bu sinyal gönderimleri sistemin verimliliği açısından önemlidir. Ayrıca LoRa teknolojisi, gerçek dünya IoT senaryosunda deneyimlenerek elde edilen bulgular diğer çalışmalara zemin olması açısından da önemlidir.

Çizelge 4.1 Test noktaları uzaklıkları ve test noktası bazında başarılı iletim oranları

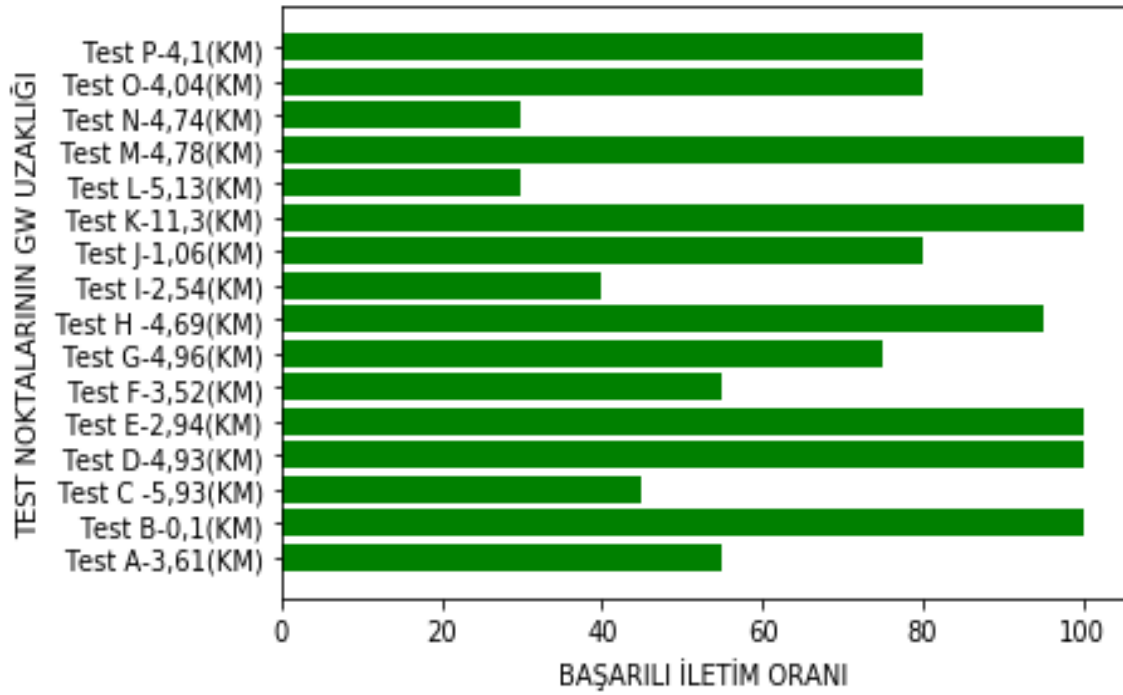
Test Noktası	GW D2A Uzaklığı(KM)	GW D22 Uzaklığı(KM)	Başarılı İletim Oranı (%)
Test A	3,61	5,63	55
Test B	0,1	2,03	100
Test C	5,93	4,5	45
Test D	4,93	3,31	100
Test E	2,94	1,24	100
Test F	3,52	5,4	55
Test G	4,96	6,74	75
Test H	4,69	6,28	95
Test I	2,54	4,13	40
Test J	1,06	2,54	80
Test K	11,3	11,4	100
Test L	5,13	6,66	30
Test M	4,78	6,49	100
Test N	4,74	6,17	30
Test O	4,04	5,59	80
Test P	4,1	5,47	80
Test Noktası Sayısı	16		

TestM noktasının D2A’ya olan uzaklık yaklaşık 4,78 km iken(Bkz. Çizelge 4.1) D22’ye olan uzaklığı 6,49 km’dir. Sinyal gücü ve sinyal gürültüsü kıyaslandığında D2A’ya gelen sinyallerdeki SNR değerlerinin, D22’ye gelenlere kıyasla daha iyi olduğu ortaya

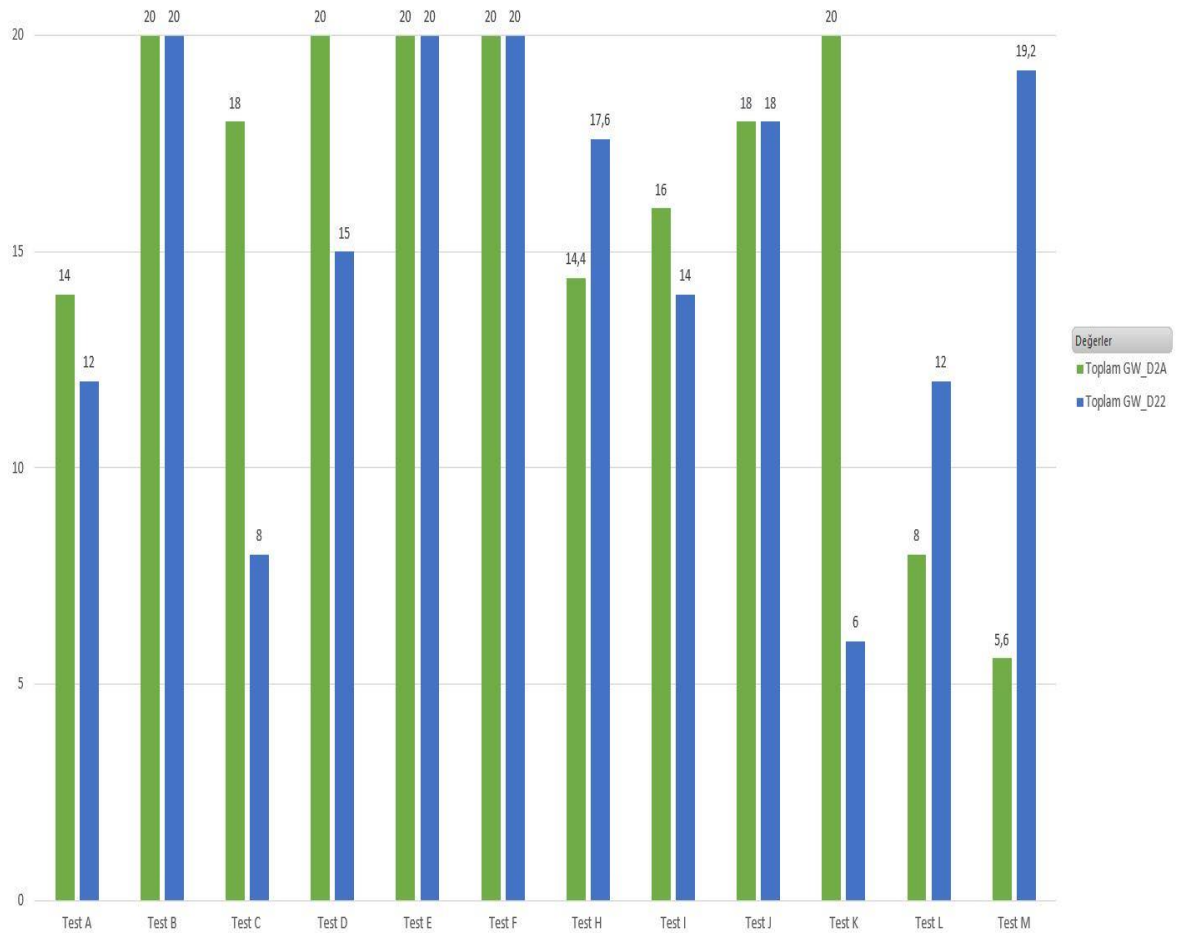
çıkılmaktadır. Bunun sebebinin ise D22'nin göndericiye olan uzaklığı, ağ geçidin yerden yüksekliği ve bulunduğu ortamın nesne yoğunluğundan kaynaklı olduğu analiz edilmiştir. TESTK test noktası ise yükseklik olarak her iki ağ geçidinden de yüksek bir konuma sahip, dağlık bir alan olmakla beraber, her iki ağ geçidinin de görüş mesafesinde bulunmaktadır. TESTK, D2A'ya 11.3 km, D22'ye 11.4 km uzaklıktadır, bu noktadan 20 sinyal gönderimi yapılmış ve %100 veri iletim oranı elde edilmiştir.

4.3. Sinyal İletim Analizi

Şekil 4.4'te test noktası bazında başarılı iletim oranı grafiği verilmiştir. Yükseklik ve çevresel faktörlerin etkili olduğu gözlemlenen veri iletim oranlarını, çoğunlukla yüksek başarı oranına sahiptir.



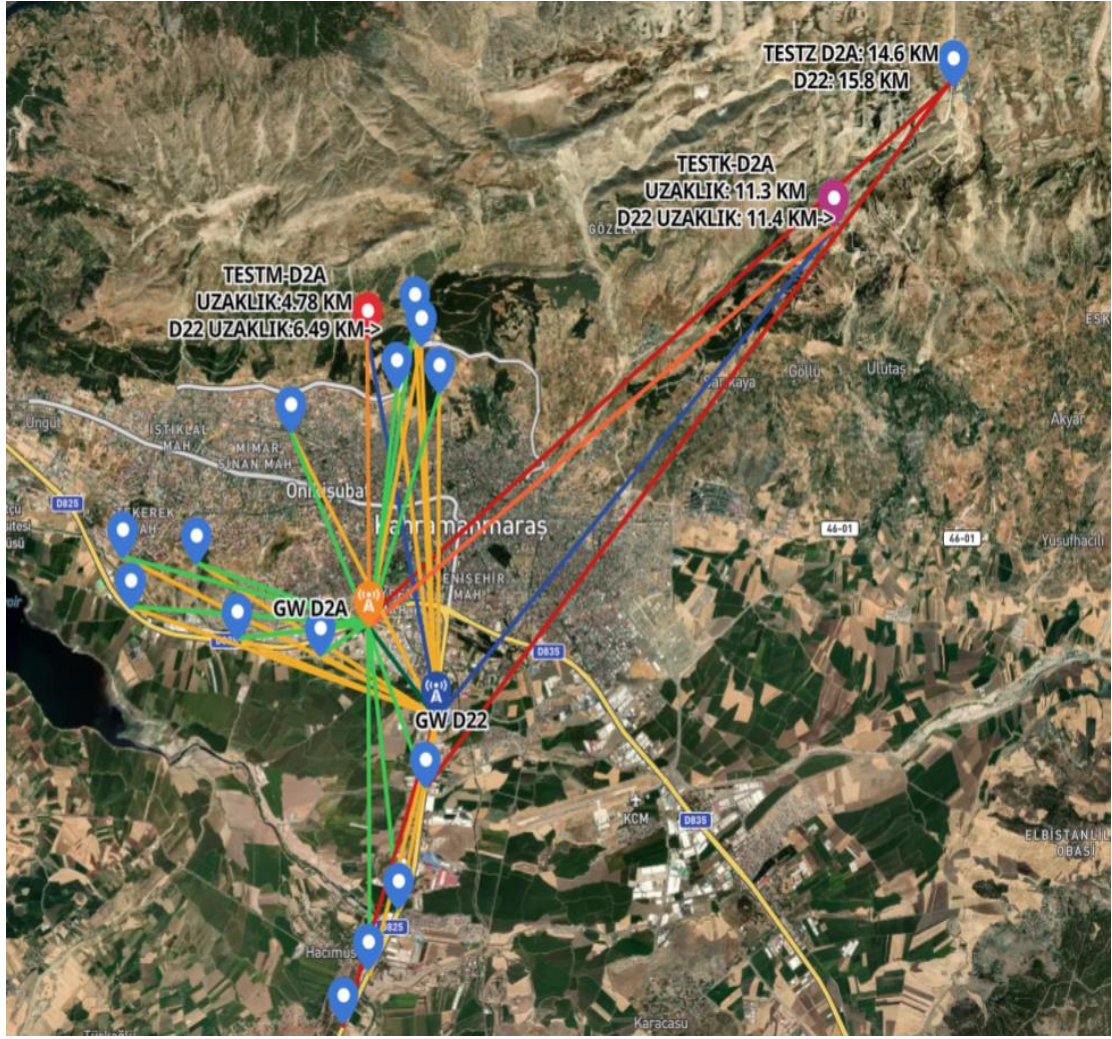
Şekil 4.4 Başarılı iletim Oranı



Şekil 4.5 GW Bazlı Sinyal Dağılımı

Şekil 4.5'te ise D22 ve D2A bazlı sinyal iletim oranları verilmiştir.

Ağ geçidi görüş mesafesinde olan test noktaları yüksek veri iletim oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Test noktası ağ geçidine yakın olsa bile ağaç, bina, dağ gibi çevresel faktörlerden etkilenecek uzak noktalara nazaran düşük veri iletim oranlarında kalabildiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.6 TestM TestK TestZ ve Diğer Test Yatakları

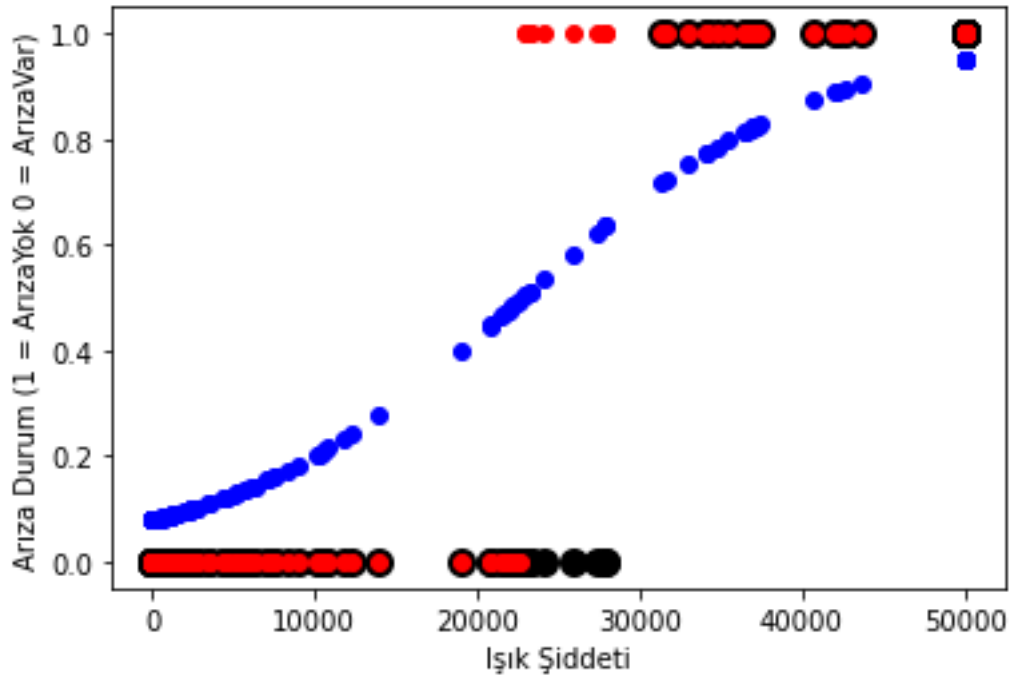


Şekil 4.7 Test Z Noktası

Literatür çalışmaları incelendiğinde, çalışmanın en detaylı deneysel çalışmalardan biri olduğu görülmektedir. Şekil 4.6’da görüldüğü üzere şehir merkezini çevreleyen, şehrin farklı noktalarından, coğrafi ve yükseklik olarak farklı yerlerinden test yatakları seçilerek testler yapılmıştır. TestM, TestK, TestZ test noktalarına bakıldığında, M ve K yatakları başarılı sinyal iletim oranına sahipken, Şekil 4.7’de görüldüğü üzere Test Z yatağı dağlık olan olduğu için sinyal iletimi kesilmiş sinyal alınamamıştır. Saha testlerinin çokluğu, kapsama alanının büyüklüğü de göz önüne alındığında literatüre bu anlamda ciddi bir deney ortamı sunarak katkı sağlamıştır.

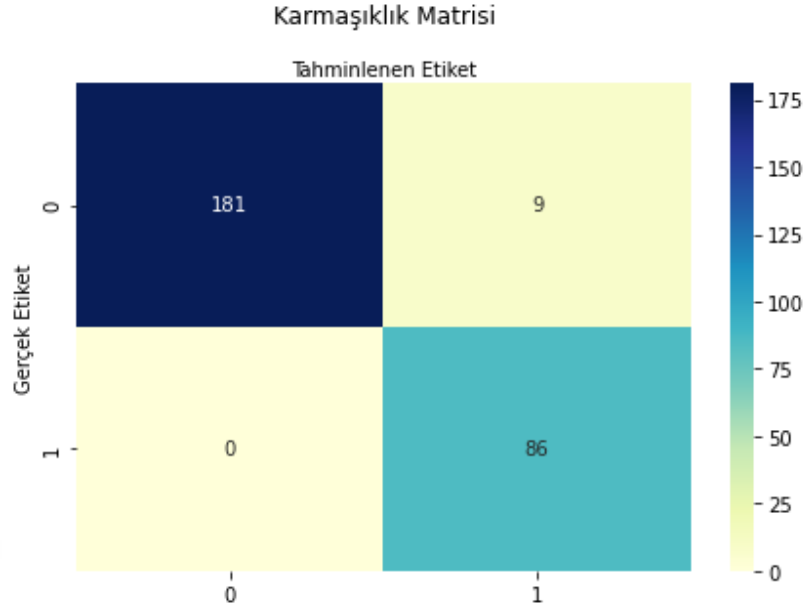
4.4. Arıza Tespiti Kestirim Modeli

Elde edilen ışık şiddeti verileri üzerinden lojistik regresyon arıza kestirimi görselleştirilerek Şekil 4.8’de sunulmuştur. Şekil 4.8’de siyah noktalar gerçek sınıfları, kırmızılar tahminlenen sınıfları, maviler ise olasılık dağılım eğrisini gösterir.



Şekil 4.8 Lojistik Regresyon Kestirim Modeli

Modelin eğitilmesi için armatür aydınlatmasının yanarken, sönükken, az ışık verirken ışık şiddeti değerlerinden bir veri seti hazırlanarak modelin eğitilmesi sağlanmıştır. Yapılan kestirim için model f1 skoru 0.98, accuracy skoru 0.96 olarak elde edilmiştir ve regresyonun iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Aydınlatmanın tam söndüğü veya az ışık verdiği durumlarını saptamaktadır. Şekil 4.9 karmaşıklık matrisini göstermektedir.

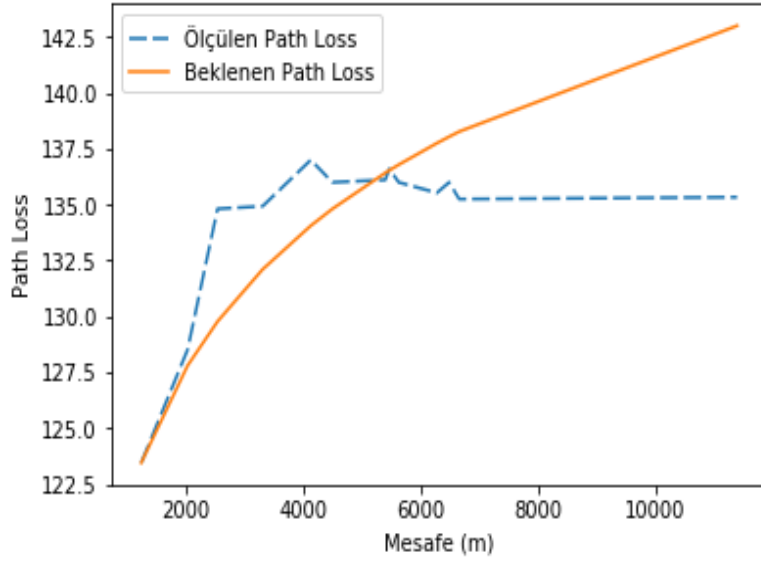


Şekil 4.9 Lojistik Regresyon Karmaşıklık Matrisi

Şekil 4.9 ‘da görüldüğü üzere karmaşıklık matrisi de modelin performansı adına olumlu sonuç vermiştir. Python’un flask ve pickle kütüphaneleri kullanılarak tahminleme modeli web servis haline getirilerek ayrıca bir web arayüzünden de kullanabilme özelliği sağlanmıştır. Model tahmini 1’e yakın bir değer ise arıza olmadığı anlamına gelmektedir. 0.5 ve 0 arası ışığın olduğu fakat armatürün tam kapasite ışık vererek çalışmadığı anlamına gelmektedir. 0’a yakın değerler ise arıza durumunun söz konusu olduğu anlamına gelmektedir. Örnek olarak 1000 gibi çok düşük bir lux değeri geldiğinde model, arıza olarak kestirim yaparak arızanın olduğunu tespit etmektedir.

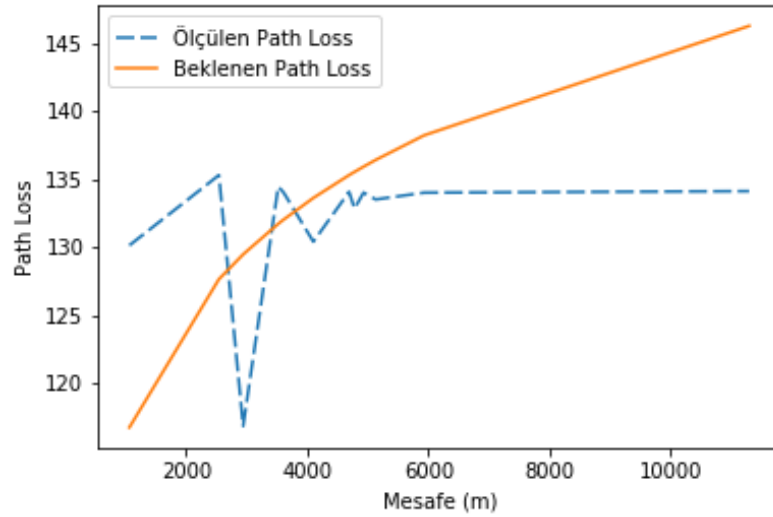
4.5. Yol Kaybı (Path Loss) Hesaplanması

Eşitlik 3.5’te belirtilen log distance path formülü, yol kaybı hesaplamasında kullanılmıştır. D22 ağ geçidine gelen LoRa sinyale değerleri üzerinden Path Loss hesaplanırken ölçülen değer ve exponent 2,03 hesaplanmış beklenen path loss grafiği Şekil 4.10’ da verilmiştir. Formül için seçilen referans noktası exponent değişkenine doğrudan etki etmektedir.



Şekil 4.10 D22 Path Loss

Şekil 4.11’de D2A path loss verilmiştir. D2A için exponent 2,87 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 D2A Path Loss

D2A sinyal değerleri incelendiğinde, path loss -136 dbm üstünde olduğu zaman veri iletiminin de düştüğü görülmektedir. Lora spesifikasyonuna göre -120 dbm RSSI’nın altında

iletim olmamaktadır, sistemimizin LoRa bağlantısının link budget'ı 16 dbm dir, dolayısıyla -136 dbm bizim maksimum path loss'umuzdur. Beklenen path loss 136 nın üstünde görülen noktalarda, gerçekleşen path loss ların -136 dbm üstüne çıkmadığı görülmüştür. Teori ile saha ölçümleri bu noktada uyum göstermiştir. -136 dbm değerlerinin altında veri iletimi olmamaktadır.

Yapılan saha deneyleri sonucunda elde edilen bulgularla, RSSI değerlerinin veri iletim oranı ile bir ilişkisi olmadığı görülmüştür. Mesafe artıp RSSI değerleri zayıflarken de iyi veri iletim oranları elde edilmiştir. Path loss değerleri ile RSSI değerleri arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu gerçek dünya senaryosunda doğrulanmıştır. RSSI değerleri, path loss'tan farklı bir faktörden etkilenmediği görülmüştür.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Saha deneyleri sonucunda, aydınlatma arıza tespiti LoRa teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. RSSI değerlerinin veri aktarım hızı ile ilişkili olmadığı görülmüştür. Mesafe arttıkça RSSI ve SNR değerleri olumsuz yönde etkilenmiştir. Mesafe arttıkça ve RSSI değerleri zayıfladıkça iyi veri aktarım oranları da elde edilmiştir. Yol kaybı değerleri ile RSSI değerleri arasındaki doğrusal ilişki gerçek dünya senaryosunda doğrulanmıştır. RSSI değerlerinin yol kaybı dışında bir faktörden etkilenmediği görülmüştür. Ağ geçidi ve uç cihazın birbirlerinin bakış açısında bulunduğu konumlarda yüksek sinyal iletim oranlarına ulaşılmıştır.

Yapılan çalışma ile sokak aydınlatmasının arıza durumlarının izlenebilirliği LoRaWAN ağı ile ortaya koyulmuştur. Ağ geçidi konumlandırmasının, sadece RSSI değerlerine göre değil, veri iletim oranlarının değerlerinin de hesaba katılarak yapılmasının daha doğru olacağı sonucuna varılmıştır. Ağ geçitlerinin her türlü iklim koşullarına dayanıklı olması gerektiği tespit edilmiştir.

Sinyal değerlerini ve kapsama alanını optimum seviyeye çıkarmak için ağ geçitlerinin sayısı artırılarak farklı konumlandırma algoritmaları tasarlanabilir. LoRaWAN ağı sayesinde farklı LoRa tabanlı uç cihazlar ile çeşitli veriler (sıcaklık, nem) toplanabilir farklı sorunlara çözüm olabilecek analiz, sınıflandırma, kestirim algoritmaları geliştirilebilir. Coğrafi bilgi sistemleri yazılımları ile entegre edilerek sahadaki aydınlatmaların harita üzerinden konumları belirlenerek arıza durumunda renklendirme ile takip edilebilir.

Hazırlanan uç cihazda farklı LoRa modülasyon çipleri ve mikrodenetleyeciler kullanılarak batarya tüketiminin ömrü uzatılabilir ve sinyalizasyon yapısı geliştirilerek çevresel faktörlerden en az seviyede etkilenmesi sağlanabilir. Sahada bulunan aydınlatmalar, şebeke envanterinde kayıtlı olduğu için coğrafi bilgi sistemleri üzerinden entegrasyon sağlanarak arıza takibi ve konum tespiti de yapılabilir.

KAYNAKLAR

- 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>
- Afzal, M. K., Rehmani, M. H., Pescapé, A., Kim, S. W., & Ejaz, W. (2017). IEEE Access Special Section Editorial: The New Era of Smart Cities: Sensors, Communication Technologies, and Applications. *IEEE Access*, 5, 27836–27840. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783079>
- Aoudia, F. A., Gautier, M., Magno, M., Gentil, M. Le, Berder, O., & Benini, L. (2018). Long-short range communication network leveraging LoRaTM and wake-up receiver. *Microprocessors and Microsystems*, 56(November 2017), 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.12.004>
- Bor, M., Vidler, J., & Roedig, U. (2017). LoRa for the Internet of Things. *Computer*, 50(6), 16–18. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.158>
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>
- De Carvalho Silva, J., Rodrigues, J. J. P. C., Alberti, A. M., Solic, P., & Aquino, A. L. L. (2017). LoRaWAN - A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science, SpliTech 2017, 1–6.
- Di, D., & Dell, I. (2016). Enabling relay-based communication in LoRa networks for the Internet of Things : design , implementation and experimental evaluation.
- El Chall, R., Lahoud, S., & El Helou, M. (2019). LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2366–2378. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2906838>
- Ertürk, M. A., Aydın, M. A., Büyükakkaşlar, M. T., & Evirgen, H. (2019). A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies. *Future Internet*, 11(10), 216. <https://doi.org/10.3390/fi11100216>
- Four-Faith. (2020). F8L10GW-L Outdoor LoRa Gateway User Manual.
- Georgiou, O., & Raza, U. (2017). Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale? *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(2), 162–165. <https://doi.org/10.1109/LWC.2016.2647247>
- Gotthard, P. (2021). lorawan-server | Compact server for private LoRaWAN networks. Retrieved May 23, 2021, from <https://gotthardp.github.io/lorawan-server/>

GY-30 Bh1750 Intensity Digital Light Sensor Module. (n.d.).

Hashem, I. A. T., Chang, V., Anuar, N. B., Adewole, K., Yaqoob, I., Gani, A., ... Chiroma, H. (2016). The role of big data in smart city. *International Journal of Information Management*, 36(5), 748–758. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.002>

Henriksson, R. (2016). Indoor positioning in LoRaWAN networks/Evaluation of RSS positioning in LoRaWAN networks using commercially available hardware. Chalmers University of Technology.

Lavric, A., & Popa, V. (2017). LoRaTM Wide-Area Networks from an Internet of Things perspective. *Proceedings of the 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2017*, 2017-Janua, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ECAI.2017.8166397>

Lee, H. C., & Ke, K. H. (2018). Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(9), 2177–2187. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2814082>

Linka, H., Rademacher, M., Aliu, O. G., & Jonas, K. (2018). Path Loss Models for Low-Power Wide-Area Networks : Experimental Results Path Loss Models for Low-Power Wide-Area Networks : Experimental Results using LoRa. (May).

Liu, S., Dong, B., & Sun, Y. (2013). Energy management system architecture based on Internet of Things. *Chinese Control Conference, CCC*, 11(3), 8066–8069.

Loriot, M., Aljer, A., & Shahrour, I. Analysis of the use of LoRaWan technology in a Large-Scale Smart City Demonstrator. , (2017).

Mehmood, Y., Görg, C., Muehleisen, M., & Timm-Giel, A. (2015). Mobile M2M communication architectures, upcoming challenges, applications, and future directions. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1), 1–37. <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0479-y>

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>

Microchip. (2015). RN2483 LoRa ® Technology Module Command Reference User's Guide.

Mikhaylov, K., Petäjärvi, J., & Hänninen, T. (2016). Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. *European Wireless Conference 2016, EW 2016*, (August), 119–124.

Muthanna, M. S. A., Muthanna, M. M. A., Khakimov, A., & Muthanna, A. (2018). Development of intelligent street lighting services model based on LoRa technology. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*, 2018-Janua, 90–93.

<https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317037>

- N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. Eirich (IBM), T. Kramp (IBM), O. H. (Actility). (2015). LoRaWAN TM Specification.
- Nor, R. F. A. M., Zaman, F. H. K., & Mubdi, S. (2017). Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN. 2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2017 - Proceedings, (August), 132–137. <https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2017.8070582>
- Noreen, U., Bounceur, A., & Clavier, L. (2017). A study of LoRa low power and wide area network technology. Proceedings - 3rd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing, ATSIP 2017. <https://doi.org/10.1109/ATSIP.2017.8075570>
- Our story | Sigfox. (n.d.). Retrieved May 18, 2021, from <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story>
- Peng, C. Y. J., Lee, K. L., & Ingersoll, G. M. (2002). An introduction to logistic regression analysis and reporting. *Journal of Educational Research*, 96(1), 3–14. <https://doi.org/10.1080/00220670209598786>
- Petäjäjärvi, J., Mikhaylov, K., Pettissalo, M., Janhunen, J., & Iinatti, J. (2017). Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(3). <https://doi.org/10.1177/1550147717699412>
- Plets, D., Podevijn, N., Trogh, J., Martens, L., & Joseph, W. (2018). Experimental Performance Evaluation of Outdoor TDoA and RSS Positioning in a Public LoRa Network. IPIN 2018 - 9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, (September), 24–27. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2018.8533761>
- Pop, A. I., Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks? *ArXiv*.
- Reda, H. T., Daely, P. T., Kharel, J., & Shin, S. Y. (2018). On the Application of IoT: Meteorological Information Display System Based on LoRa Wireless Communication. *IETE Technical Review*, 35(3), 256–265. <https://doi.org/10.1080/02564602.2017.1279988>
- Rosmiati, M., Fachru Rizal, M., Susanti, F., & Fahreza Alfisyahrin, G. (2019). Air pollution monitoring system using LoRa modul as transceiver system. *TELKOMNIKA*, 17(2), 586–592. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v17i2.11760>
- Sanchez-Iborra, R., Sanchez-Gomez, J., Ballesta-Viñas, J., Cano, M. D., & Skarmeta, A. F. (2018). Performance evaluation of lora considering scenario conditions. *Sensors (Switzerland)*, 18(3). <https://doi.org/10.3390/s18030772>
- Semtech. (2015). LoRa Modulation Basics AN1200.22. APP NOTE, pp. 1–26. Retrieved from <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>

- Semtech Corporation. (2015). A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN TM What is it? Retrieved from https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
- Yaqoob, I., Hashem, I. A. T., Mehmood, Y., Gani, A., Mokhtar, S., & Guizani, S. (2017). Enabling communication technologies for smart cities. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), 112–120. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600232CM>
- Yu, F., Zhu, Z., & Fan, Z. (2017). Study on the feasibility of LoRaWAN for smart city applications. *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 2017-Octob, 334–340. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115748>
- Zhao, W., Lin, S., Han, J., Xu, R., & Hou, L. (2018). Design and Implementation of Smart Irrigation System Based on LoRa. *2017 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2017 - Proceedings*, 2018-Janua, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269115>