LORAWAN AĞ PERFORMANSININ KENTSEL VE İÇ MEKAN UYGULAMALARINDA SAHA TESTLERİ VE BENZETİMLERLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Ömer YILDIZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LORAWAN AĞ PERFORMANSININ KENTSEL VE İÇ MEKAN UYGULAMALARINDA SAHA TESTLERİ VE BENZETİMLERLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Ömer YILDIZ
0000-0002-4702-0469

Prof. Dr. Sait Eser KARLIK
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

LORAWAN AĞ PERFORMANSININ KENTSEL VE İÇ MEKAN UYGULAMALARINDA SAHA TESTLERİ VE BENZETİMLERLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Ömer YILDIZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sait Eser KARLIK

Uzun menzilli geniş alan ağlarında (LoRaWAN), yayılım faktörü (SF), işaret-gürültü oranı (SNR) ve alınan işaret gücü indeksi (RSSI), ağ performansını doğrudan belirleyen temel parametrelerdir. Ancak saha ölçümlerindeki zorluklar ve test ekipmanlarının sınırlılığı, LoRaWAN performans analizlerinin çoğunlukla modelleme, benzetim veya küçük ölçekli saha uygulamalarıyla sınırlı kalmasına yol açmaktadır. Literatürde, özellikle SF, SNR ve RSSI parametrelerinin eş zamanlı iyileştirmesini içeren kapsamlı çalışmalar sınırlı olup, bu durum saha verileri ile benzetim sonuçlarının uyumuna ilişkin belirsizlik yaratmaktadır. Bu tezde, LoRaWAN performansı farklı kullanım senaryolarında kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bina içi (aynı kat, çok katlı yapılar, katlar arası senaryolar) ve bina içi+bina dışı karma ortamlarda gerçekleştirilen ölçümler temel alınarak RSSI, SNR, SF dağılımları ve mesaj iletim başarı oranları değerlendirilmiştir. Çok katlı yapılarda ortalama RSSI -108,16 dBm, ortalama SNR ise -5,87 dB olarak elde edilmiştir. SF dağılımlarına ilişkin analizler sonucunda, ağ geçidine (GW) yakın konumlanan sensörlerin %66,75 oranında SF7 değerini kullandığı, uzak mesafelerde konumlanan sensörlerin ise sırasıyla %42,75 ve %41,36 oranlarında SF12 değerine atandığı belirlenmiştir. Bu bulgu, sensörlerin konumları ile SF seçimleri arasındaki güçlü ilişkiyi ortaya koymakta; ağın kapsama alanı genişledikçe yüksek yayılım faktörlerinin tercih edildiğini ve bu durumun ağ kapasitesi ile veri iletim başarımını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Aynı kat uygulamalarında MATLAB eğri uydurma yöntemiyle yapılan analizlerde, SNR-RSSI ilişkisi R^2=0,9362 ve RMSE=0,2440 değerleriyle 9. dereceden polinomla en iyi uyumu göstermiştir. Bina içi ve dışı karma ortamda, 40 km²'lik bir test alanında 15 sensör ve 2 ağ geçidi ile kurulan ağdan elde edilen saha ölçümleri, CloudRF® benzetimleriyle karşılaştırılmıştır. LOS, Okumura-Hata ve COST231-Hata modelleri incelenmiş; açık alanlar için LOS, engelli dış ortamlar için Okumura-Hata, kapalı alanlar için ise COST231-Hata modelinin en uygun sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: LoRaWAN, RSSI, SNR, SF, CloudRF, Performans analizi

2025, xi + 103 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

COMPARATIVE ANALYSIS OF LORAWAN NETWORK PERFORMANCE WITH FIELD TESTS AND SIMULATIONS IN URBAN AND INDOOR APPLICATIONS

Ömer YILDIZ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sait Eser KARLIK

In Long Range Wide Area Networks (LoRaWAN®), spreading factor (SF), signal-to-noise ratio (SNR), and received signal strength indicator (RSSI) are fundamental parameters for network performance. Yet, challenges in field measurements and limited test equipment often restrict performance assessments to modeling, simulations, or small-scale deployments. The scarcity of studies addressing the simultaneous optimization of SF, SNR, and RSSI further raises uncertainty about the consistency between simulations and real-world outcomes. This thesis presents a comprehensive evaluation of LoRaWAN® performance under diverse scenarios. Measurements were carried out in indoor environments (same-floor and multi-floor) and hybrid indoor–outdoor settings. Based on these data, RSSI, SNR, SF distributions, and message delivery success rates were analyzed. In multi-floor buildings, the average RSSI was -108.16 dBm, and the average SNR was -5.87 dB. SF analysis showed that sensors near gateways predominantly used SF7 (66.75%), while distant sensors were assigned SF12 (42.75% and 41.36%). This highlights the correlation between sensor placement and SF selection, where higher spreading factors support extended coverage but affect capacity and transmission efficiency. In same-floor experiments, curve-fitting in MATLAB® revealed that the SNR–RSSI relationship achieved the highest fit (R^2=0.9362, RMSE=0.2440) with a 9^{th}-order polynomial. For hybrid environments, measurements across a 40 km² test area with 15 sensors and 2 gateways were compared against CloudRF® simulations. Among the tested propagation models, line of sight (LOS) proved most suitable for open areas, Okumura-Hata for obstructed outdoor sites, and COST231-Hata for indoor conditions.

Key words: LoRaWAN, RSSI, SNR, SF, CloudRF, Performance analysis

2025, xi + 103 pages.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince her konuda desteğini eksik etmeyen, tüm zor günlerimde yanımda olan ve akademik çalışmalarımda bugüne erişmemde emeği geçen saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Sait Eser KARLIK'a minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez dönemine başladığım günden itibaren, bu çalışmaya başlangıcından bitimine kadar yardımcı olan ve değerli katkılarıyla çalışmama yön veren tez izleme komitesi heyetinde yer alan çok kıymetli hocalarım Doç. Dr. Mustafa NAMDAR ve Doç. Dr. Arif BAŞGÜMÜŞ'e minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca çok değerli fikirleriyle doğru kararlar almamı sağlayan ve bana yol gösteren çok kıymetli hocam Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a ayriyeten minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel araştırmalar için tüm cihaz ve sistem teminlerinde desteklerinden ötürü Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri koordinasyon birimine, ilgili altyapıların ve verilerin kullanım izinlerini veren Bursa Büyükşehir Belediyesi'ne, benzetim çalışmalarının yapılması için kullanım izinlerini veren CloudRF® uzmanlarına teşekkürü borç bilirim.

Lisansüstü eğitim hayatım ve tüm hayatım boyunca hep yanımda olan sevgili eşim Nagehan USTABAŞ YILDIZ'a, çocuklarım Ela ve Neva'ya, merhume annem sevgili Suna YILDIZ, kıymetli babam Temel YILDIZ ve sevgili kardeşim Ayşe YILDIZ'a destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Ömer YILDIZ
24/12/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL TEMELLER 5
2.1. Kaynak Araştırması 5
2.2. Kuramsal Temeller 15
2.2.1. LoRa 21
2.2.2. Cıvıltı Yayılım Spektrumu (Chirp Spread Spectrum, CSS) 22
2.2.3. Yayılım Faktörü (SF) 25
2.2.4. LoRa Kanal Yapısı 27
2.2.5. İşaret Gürültü Oranı (SNR) 29
2.2.6. Alınan İşaret Gücü İndeksi (RSSI) 30
2.2.7. LOS Yayılım Modeli 31
2.2.8. Okumura-Hata Yayılım Modeli 32
2.2.9. Cost231-Hata Yayılım Modeli 33
2.2.10. LoRaWAN® 34
3. MATERYAL ve YÖNTEM 37
3.1. Bina İçi Ortam LoRaWAN® Ağları 37
3.1.1. Çok Katlı Binada LoRaWAN® Ağ Performans Analizleri 37
3.1.2. Bina İçi LoRaWAN® Ağında Veri Analizleri 41
3.2. Bina İçi ve Bina Dışı (Karma) Ortam LoRaWAN® Ağında Ölçümler ve Benzetimler ile Performans Analizi 46
3.2.1. Ağ Kurulumu, Düğüm Parametreleri ve Ölçümler 48
3.2.2. Radyo Arayüz Benzetimi 51
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 57
4.1. Bina İçi Ortam LoRaWAN® Ağları Performans Analiz Sonuçları 57
4.1.1. Çok Katlı Binada LoRaWAN® Ağ Performans Sonuçları 57
4.1.2. Bina İçi LoRaWAN® Ağında Veri Analizi, MATLAB® Eğri Uydurma Analizi ve Yapay Zeka Destekli Veri Üretimi ile Ağ Performans Analizi Sonuçları 67
4.2. Bina İçi ve Bina Dışı (Karma) Ortam LoRaWAN® Ağının Performans Analiz Sonuçları 77
4.2.1. LoRaWAN® Ağından Elde Edilen Ölçüm Sonuçları 77
4.2.2. Radyo Arayüz Benzetim Sonuçları ve Ölçüm Sonuçlarıyla Karşılaştırmalı Analizi 79
5. SONUÇ 91
KAYNAKLAR 95
ÖZGEÇMİŞ 103

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A_i	i. skaler gözlem içeren gerçek değer
a	Uç cihaz anten yüksekliğine göre düzeltme faktörü
a_i	Fourier regresyon modelindeki denklemin i. a katsayısı
b_i	Fourier regresyon modelindeki denklemin i. b katsayısı
c_e	Ortama göre sabit
c_i	Gauss regresyon modelindeki denklemin i. katsayısı
F_i	i. skaler gözlem içeren tahmini değer
G_r	Alıcı anten kazancı
G_t	Gönderici anten kazancı
f_{max}	Maksimum frekans
f_{min}	Minimum frekans
h_b	Ağ geçidi anten yüksekliği
h_m	Uç cihaz anten yüksekliği
L_b	İletim hattındaki toplam kayıp
M	Cıvıltı işaret sayısı
n	RMSE hesaplamasındaki skaler gözlem sayısı
p_i	Polinom denklemindeki i. katsayı
p	Regresyon katsayısı
P_r	Anten çıkış gücü
R_b	Bit oranı
R_s	Sembol oranı
S	Sembol değeri
SNR_{th}	İşaret-gürültü oranı eşik değeri
T_h	Frekans kayma zamanı
T_s	İşaretin periyodu
T_x	Uç cihazın maksimum iletim gücü
w_i	i. ağırlık katsayısı
$\hat{y}_i$	i. tahmin edilen değer
$\bar{y}$	Gözlenen değerlerin ortalaması

Kısaltmalar	Açıklama
2G	2. Nesil Hareketli Hücresel Haberleşme (2nd Generation Cellular Communication)
3GPP	3. Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project)
3G	3. Nesil Hareketli Hücresel Haberleşme (3rd Generation Cellular Communication)
4G	4. Nesil Hareketli Hücresel Haberleşme (4th Generation Cellular Communication)
5G	5. Nesil Hareketli Hücresel Haberleşme (5th Generation Cellular Communication)
6G	6. Nesil Hareketli Hücresel Haberleşme (6th Generation Cellular Communication)
AFTD	Adeunis Saha Test Cihazı (Adeunis Field Test Device)
ADR	Uyumlu Veri Hızı (Adaptive Data Rate)
Adj-R^2	Düzeltilmiş R-Kare (Adjusted R-Square)
AES-128	Geliştirilmiş Şifreleme Standartı-128 (Advanced Encryption Standart-128)
AlLoRa	Geliştirilmiş LoRa Katmanı (Advanced Layer LoRa)
BLE	Bluetooth Düşük Enerji (Bluetooth Low Enegy)
BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying)
CDF	Birikimli Dağılım Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function)
CHIRP	Sıkıştırılmış Yüksek Yoğunlukta Yayılan Darbe (Compressed High Intensity Radiated Pulse)
CSMA	Taşıyıcı Algılamalı Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access)
Cluster-ADR	Küme Uyumlu Veri Hızı (Cluster Adaptive Data Rate)
CNN	Evrişimli Sinir Ağı (Convolutional Neural Network)
CR	Kodlama Oranı (Coding Rate)
CRC	Döngüsel Artıklık Kontrolü (Cyclic Redundancy Checksum)
CSS	Cıvıltı Yayılım Spektrumu (Chirp Spread Spectrum)
DL	Aşağı Yön (Downlink)
DR	Veri Hızı (Data Rate)
ETSI	Avrupa Haberleşme Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standarts Institute)
FEC	İleri Hata Düzeltimi (Forward Error Correction)
FUOTA	Hava Arayüzü Üzerinden Bellenim Güncelleme (Firmware Update Over The Air)
GoF	Uyum İyiliği (Goodness of Fit)
GSM	Mobil Haberleşme için Küresel Sistem (Global System for Mobile Communication)
SWOT	Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler (Strength, Weakness, Opportunities, Threats)
GPS	Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Positioning System)
GW	Ağ Geçidi (Gateway)
H-AGL	Zemin Seviyesinde Yükseklik (Height Above Ground Level)
H-BW	Yatay Hüzme Genişliği (Horizontal Beamwidth)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

ISM	Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi (Industrial, Scientific and Medical)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
IIoT	Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (Industrial Internet of Things)
IP	İnternet Protokolü (Internet Protocol)
ITU	Uluslararası Haberleşme Birliği (International Telecommunication Union)
KNN	K-En Yakın Komşuluk (K-Nearest Neighbourhood)
LoRa	Uzun Mesafe (Long Range)
LoRaWAN	Uzun Mesafe Geniş Alan Ağı (Longe Range Wide Area Network)
LoS	Doğrudan Görüş Hattı (Line of Sight)
LPWAN	Düşük Güç Tüketimli Geniş Alan Ağı (Low Power Wide Area Network)
LTE	Uzun Dönem Dönüşüm (Long Term Evolution)
LTE-M	Uzun Dönem Dönüşüm-Makine (Long Term Evolution-Machine)
MAC	Ortam Erişim Kontrolü (Medium Access Control)
MAE	Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
M2M	Makineler Arası (Machine-to-Machine)
NB-IoT	Dar Bant Nesnelerin İnterneti (Narrow Band Internet of Things)
NF	Gürültü Figürü (Noise Figure)
NFC	Yakın Alan İletişim (Near Field Communication)
NLoS	Doğrudan Görüş Olmayan Hat (Non-Line of Sight)
PL	Yol Kaybı (Path Loss)
PDR	Paket Dağıtım Oranı (Packet Delivery Rate)
PHY	Fiziksel Katman (Physical Layer)
PRB	Fiziksel Kaynak Bloku (Physical Resource Block)
PRR	Paket Alım Oranı (Packet Receive Rate)
QPSK	Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
R^2	R-Kare (R-Square)
RFID	Radyo Frekansı ile Tanımlama (Radio Freuency Identification)
RSSI	Alınan İşaret Gücü İndeksi (Received Signal Strength Indicator)
RMSE	Kök Ortalama Karesel Hata (Root Mean Square Error)
SDR	Yazılım Tabanlı Radyo (Sofware Defined Radio)
SF	Yayılım Faktörü (Spreading Factor)
SNO	Sigfox Ağ Operatörü (Sigfox Network Operator)
SNR	İşaret-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)
SSE	Karesel Hataların Toplamı (Sum of Squared Errors)
SSR	Regresyonun Kareler Toplamı (Sum of Squares of Regression)
SST	Toplam Kareler Toplamı (Total Sum of Squares)
TDOA	Varış Zaman Farkı (Time Difference of Arrival)
ToA	Havada Kalma Süresi (Time on Air)
UC	Uç Cihaz (End Device)
UL	Yukarı Yön (Uplink)
V-BW	Dikey Hüzme Genişliği (Vertical Beam Width)
VSAT	Çok Küçük Açıklık Terminali (Very Small Aperture Terminal)
WSN	Kablosuz Sensör Ağı (Wireless Sensor Network)
YSA	Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	LPWAN'ın veri hızı ve mesafe ölçeğinde radyo haberleşmesindeki durumu	16
Şekil 2.2.	Yukarı yönlü cıvıltı (up-chirp) ve aşağı yönlü cıvıltı (down-chirp)	22
Şekil 2.3.	CSS modülasyonu örneği	23
Şekil 2.4.	Cıvıltı işaretinin frekans ekseninde kaydırılması	24
Şekil 2.5.	Cıvıltı işaretinin SF değeri ile değişimi	25
Şekil 2.6.	Soldan sağa işaretlerin sırasıyla SF-SF12 değerlerini aldığını gösteren frekans-zaman grafiği	25
Şekil 2.7.	DR ve SF arasındaki ilişki (CR=4/5)	28
Şekil 2.8.	LoRa çerçeve yapısı	29
Şekil 2.9.	LoRaWAN® ağ mimarisi	34
Şekil 3.1.	LoRaWAN® ağının şematik gösterimi	38
Şekil 3.2.	Binanın asansör şaftına yerleştirilmiş UC (su sayacı)	39
Şekil 3.3.	LoRaWAN® UC'nin kurulu olduğu örnek bir katın şematik gösterimi	40
Şekil 3.4.	Kurulan LoRaWAN ağ mimarisinin hiyerarşik gösterimi	41
Şekil 3.5.	Ağda kullanılan LoRaWAN® UC	42
Şekil 3.6.	Kullanılan LoRaWAN® GW	43
Şekil 3.7.	Ağda kullanılan LoRaWAN® UC'nin kurulumu	44
Şekil 3.8.	Test alanı sınırları (kırmızı çizgi) ve GW kurulum yerleri	47
Şekil 3.9.	Test alanı sınırları (kırmızı çizgi) ve GW kurulum yerleri	48
Şekil 3.10.	LoRaWAN® ağının hiyerarşik modeli	52
Şekil 4.1.	LoRaWAN® UC'lerinden elde edilen RSSI değerlerinin dağılım grafiği	64
Şekil 4.2.	AFTD ölçümlerinden elde edilen RSSI değerlerinin dağılım grafiği	64
Şekil 4.3.	LoRaWAN® UC'lerinden elde edilen SNR değerlerinin dağılım grafiği	66
Şekil 4.4.	AFTD ölçümlerinden elde edilen SNR değerlerinin dağılım grafiği	66
Şekil 4.5.	SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (polinom regresyon modeli)	69
Şekil 4.6.	SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Fourier regresyon modeli)	71
Şekil 4.7.	SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Gauss regresyon modeli)	73
Şekil 4.8.	Elde edilen RSSI grafikleri a) 80 ölçümden b) 200 adet çoğaltılmış veriden c) 500 adet çoğaltılmış veriden ve d) 1000 adet çoğaltılmış veriden	75
Şekil 4.9.	Elde edilen SNR grafikleri a) 80 ölçümden b) 200 adet çoğaltılmış veriden c) 500 adet çoğaltılmış veriden ve d) 1000 adet çoğaltılmış veriden	76
Şekil 4.10.	Ağdan elde edilen ortalama, maksimum ve minimum RSSI değerleri	83
Şekil 4.11.	UC'ler için ağ ölçümlerinden elde edilen ortalama, maksimum ve minimum SNR değerleri	83
Şekil 4.12.	GW1 üzerinden elde edilen UC'lere ait benzetilen/ölçümlerden bulunan ortalama RSSI değerleri	86

Şekil 4.13. GW2 üzerinden elde edilen UC'lere ait benzetilen/ölçümlerden bulunan ortalama RSSI değerleri 88

ÇİZELGELER DİZİNİ

			Sayfa
Çizelge	2.1.	LoRaWAN® için yapılmış bir SWOT analizi	5
Çizelge	2.2.	LoRaWAN® uygulamalarının değerlendirildiği ana başlıklar	7
Çizelge	2.3.	Doktora tez konusu ile ilgili yapılan literatür taramasının özeti	13-14
Çizelge	2.4.	LPWAN teknolojilerinden Sigfox, LoRa ve NB-IoT genel karşılaştırması	19
Çizelge	2.5.	125 kHz bantgenişlikli LoRa kanalında SF, SNR, RSSI ve bit hızı çizelgesi	26
Çizelge	3.1.	GW için radyo sinyali iletim özellikleri	40
Çizelge	3.2.	LoRaWAN® UC teknik özellikleri	42
Çizelge	3.3.	LoRaWAN® GW teknik özellikleri	43
Çizelge	3.4.	MATLAB® eğri uydurma aracının uyum iyiliği parametreleri	46
Çizelge	3.5.	Ağ ölçümlerinde kullanılan cihazlar ve parametreleri	49
Çizelge	3.6.	RSSI ve SNR alt sınır değerleri	50
Çizelge	3.7.	GW'lerin ve UC'lerin konum özellikleri ve kurulum yükseklikleri	50-51
Çizelge	3.8.	CloudRF benzetim aracında GW ve UC'ler için parametre tanımlamarı	53-54
Çizelge	4.1.	UC'ler tarafından gönderilen yukarı yön mesaj sayıları	57
Çizelge	4.2.	Bloklarda ve ağın genelinde hesaplanan ortalama RSSI değerleri	57
Çizelge	4.3.	Bloklarda ve ağın genelinde hesaplanan ortalama SNR değerleri	58
Çizelge	4.4.	Her bir SF değerinin A bloktaki kullanım sayısı	58
Çizelge	4.5.	Her bir SF değerinin B bloktaki kullanım sayısı	59
Çizelge	4.6.	Her bir SF değerinin C bloktaki kullanım sayısı	59
Çizelge	4.7.	Her blokta en çok kullanılan SF değeri ve tüm SF değerlerinin içindeki kullanım yüzdesi	60
Çizelge	4.8.	Mesaj gönderim başarı oranı	60
Çizelge	4.9.	Ortalama RSSI değerinden daha yüksek RSSI değerine sahip olan UC sayısı	61
Çizelge	4.10.	Ortalama SNR değerinden daha yüksek SNR değerine sahip olan UC sayısı	61
Çizelge	4.11.	UC'lerden ve AFTD ölçümlerinden elde edilen karşılaştırmalı RSSI sonuçları	62
Çizelge	4.12.	UC'lerden ve AFTD ölçümlerinden elde edilen karşılaştırmalı SNR sonuçları	65
Çizelge	4.13.	Kurulan LoRaWAN® ağından elde edilen veri seti hakkındaki bilgiler	67

Çizelge	4.14.	Veri setindeki RSSI ve SNR değer dağılımından elde edilen istatistiki veriler	68
Çizelge	4.15.	SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Polinom regresyon modeli için)	69
Çizelge	4.16.	Polinom regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları	70
Çizelge	4.17.	SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Fourier regresyon modeli için)	71
Çizelge	4.18.	Fourier regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları	72
Çizelge	4.19.	SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Gauss regresyon modeli için)	73
Çizelge	4.20.	Gauss regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları	74
Çizelge	4.21.	LoRaWAN® ağ sistemine ait RSSI ve SNR ölçümlerinin ortalama, maksimum ve minimum değerleri	77-78
Çizelge	4.22.	LoRaWAN® ağına ait RSSI ve SNR ölçümlerinin istatistiksel değerlendirme sonuçları	78
Çizelge	4.23.	LoRaWAN® ağı üzerinden elde edilen ağ performansına yönelik istatistiksel değerlendirme sonuçları	79
Çizelge	4.24.	Her iki GW için CloudRF® benzetim aracıyla elde edilen 15 UC'ye ait RSSI değerleri	80
Çizelge	4.25.	CloudRF® benzetim aracı kullanılarak GW1 güzergâh analizi için elde edilen RSSI değerlerine ilişkin istatistiksel analiz sonuçları	81
Çizelge	4.26.	CloudRF® benzetim aracı kullanılarak GW2 güzergâh analizi için elde edilen RSSI değerlerine ilişkin istatistiksel analiz sonuçları	81
Çizelge	4.27.	GW1 benzetim sonuçlarının ağ ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması ve her bir UC için ölçüm sonucuna en yakın benzetim sonucunu veren yayılım modelinin belirlenmesi	85
Çizelge	4.28.	GW2 benzetim sonuçlarının ağ ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması ve her bir UC için ölçüm sonucuna en yakın benzetim sonucunu veren yayılım modelinin belirlenmesi	87
Çizelge	4.29.	Benzetimlerde kullanılabilecek en uygun yayılım modeli ile UC'lerin konum özellikleri arasındaki ilişki	89
Çizelge	5.1.	Polinom, Fourier ve Gauss regresyon modellerinden elde edilen karşılaştırmalı uyum iyiliği sonuçları	92

1. GİRİŞ

Günümüzde şehirler hızla büyümektedir. Birleşmiş Milletler'in 2024 yılına ait raporuna göre, 2000 yılında dünya nüfusunun %46,7'si kentlerde yaşarken, bu oranın 2030 yılında %60,4'e ulaşması beklenmektedir. Türkiye özelinde ise, 2000 yılında şehir nüfusunun toplam nüfus içindeki oranı %64,7 iken, bu oranın 2030 yılında %80,2'ye yükselmesi öngörülmektedir (United Nations Habitat-UN Habitat, 2024). Şehirlerde artan nüfus; mevcut altyapı, doğal kaynaklar, ulaşım, eğitim ve sağlık gibi hizmetlerin daha verimli kullanılmasını zorunlu kılmakta ve bu bağlamda "akıllı şehir" kavramını gündeme getirmektedir.

Literatürde birden fazla akıllı şehir tanımı bulunmakta olup, Albino vd. (2015)'te 23 farklı akıllı şehir tanımı tespit edilmiş ve değerlendirilmiştir. Genel anlamda akıllı şehir, şehir yaşamının kalitesini artırmayı, operasyon ve hizmetlerin verimliliğini geliştirmeyi ve sürdürülebilir ekonomik büyümeyi sağlamayı amaçlayan; bilgi, dijital ve telekomünikasyon teknolojilerini kullanarak geleneksel ağ ve hizmetleri daha esnek ve verimli hale getiren; bu sayede şehirde yaşayanların yararına sürdürülebilir faaliyetlerin gerçekleştirildiği bir yaşam alanı olarak tanımlanabilir (Ependi vd., 2022).

Bu bağlamda, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) ve büyük veri, akıllı şehir hizmet altyapısının temel etkinleştirici teknolojileri olarak ön plana çıkmaktadır. Akıllı şehir hizmetlerinin tasarımında karşılaşılan en temel sorunlardan biri, şehirlerin herhangi bir noktasında uygun bir ağ altyapısıyla internet veya benzeri bağlantıların sağlanabilmesidir (Sadhukhan, 2018). IoT sistemleri, şehir yönetimi ve vatandaşlar için katma değer sağlayan hizmetleri desteklemeyi hedefleyen akıllı şehir vizyonunun önemli bir parçasıdır (Zanella vd., 2014). Bu sistemler, uzaktan veri alışverişi ile kaynak yönetimi, takibi, verimlilik analizi ve iyileştirme yapılmasını mümkün kılar. IoT kapsamında özellikle düşük bantgenişliği ihtiyacı olan cihazlar için yeni ağ yapıları geliştirilmektedir (Ibrahim, 2019).

Düşük güçlü geniş alan ağları (Low Power Wide Area Networks, LPWANs), bu gereksinimi karşılayan ve çok düşük enerji tüketimiyle geniş coğrafi alanlarda kablosuz

sensör ağları (Wireless Sensor Networks, WSNs) kurulmasına olanak sağlayan bir ağ teknolojisidir (Raza vd., 2017; Patel, 2018; Qin vd., 2019). LPWAN sistemleri, uluslararası standart belirleyici kuruluşlar tarafından tanımlanmış çeşitli türlere sahiptir. Bu teknolojiler arasında, Uzun Dönem Dönüşüm-Makine (Long Term Evolution-Machine, LTE-M), Dar Bant Nesnelerin İnterneti (Narrow Band Internet of Things, NB-IoT), Uzak Mesafe Geniş Alan Ağı (Long Range Wide Area Network, LoRaWAN), Bluetooth Düşük Enerji (Bluetooth Low Energy, BLE), Zigbee, SigFox ve DASH7 yer almaktadır (Amin, 2018).

Söz konusu teknolojiler; kullanılan frekans aralıkları, iletim bantgenişlikleri, veri hacmi, yukarı (Uplink, UL) ve aşağı (Downlink, DL) yönlü iletim karakteristikleri, çoklu erişim yapıları, şifreleme mekanizmaları, alıcı-verici hassasiyetleri, uyku modundaki enerji tüketimi, iletim gücü ve pil ömrü gibi teknik özellikler açısından farklılık göstermektedir. Örneğin, LoRaWAN, gelişmiş şifreleme standardı olan Geliştirilmiş Şifreleme Standartı-128'i (Advanced Encryption Standart-128, AES-128) kullanırken; NB-IoT, 3. Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) standardına dayalı olarak 128–256 bit arası şifreleme yöntemlerini tercih etmektedir. SigFox, 865–924 MHz frekans aralığını kullanmakta; LoRaWAN, 433/868/780/915 MHz ISM bantlarını; NB-IoT ise 4. Nesil Hareketli Hücresel Haberleşme (4th Generation Cellular Communication, 4G) teknolojisine ayrılan lisanslı frekansları kullanmaktadır (Buurman vd., 2020; Rahman, 2020; Lopez Chalacan, 2020).

LPWAN sistemlerinin öne çıkan avantajları; enerji verimliliği, uzun menzil iletişim kabiliyeti, ölçeklenebilirlik, düşük maliyet, frekans girişimlerine karşı dayanıklılık, kolay entegrasyon ve yüksek uyumluluk olarak sıralanabilir (Qadir vd., 2018; Masoudi vd., 2021; Dunnala, 2018). LoRa (Long Range), LPWAN teknolojileri arasında radyo arayüzüne dayalı haberleşme tekniği olarak düşük güç tüketimiyle uzun mesafelerde kablosuz iletişimi mümkün kılmaktadır. LoRaWAN ise LoRa fiziksel katmanında çalışan ve çoğunlukla tercih edilen bir üst protokoldür. LoRa üzerinde farklı protokoller geliştirilebilmekle birlikte, LoRaWAN; su sayaçları, araç park sensörleri, akıllı atık toplama sistemleri ve havalimanı envanter yönetimi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tardy vd., 2017).

SigFox (Sigfox, 2025), NBIoT (Migabo vd., 2020), DASH7 (DASH7, 2025) ve Ingenu (Ingenu, 2025) gibi alternatif teknolojiler bulunsa da, LoRa Alliance®'a göre, LoRaWAN günümüzde bireysel ve profesyonel uygulamalarda 170 farklı operatörde kullanılmaktadır (LoRa Alliance® Achieves, 2025). Ayrıca, 2021 yılı itibarıyla Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU) tarafından resmi olarak standartlaştırılmıştır. (International Telecommunication Union, 2021).

Bu doktora tezinde, LPWAN alt uygulamalarından biri olan LoRaWAN teknolojisinin ayrıntılı analizleri, bina içi ve karma (bina içi + bina dışı) ortamlarda kurulu ağ performansları açısından, ölçümler ve benzetimlerle gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üç temel aşaması bulunmaktadır. İlk aşamada, çok katlı bir yapıda iç mekânda kurulan bir LoRaWAN ağı üzerinden performans analizleri yapılmış; ağ davranış modelleri değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. İkinci aşamada, az katlı bir yapıda yine iç mekân LoRaWAN ağı kapsamında performans analizleri gerçekleştirilmiş; yayılım faktörü (Spreading Factor, SF), işaret-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR), alınan işaret gücü indeksi (Received Signal Strength Indicator, RSSI) ve paket kaybı parametreleri arasındaki ilişkiler MATLAB® eğri uydurma modelleri aracılığıyla incelenmiştir. Üçüncü ve son aşamada ise iki alt analiz gerçekleştirilmiştir: İlk olarak, Bursa şehir merkezindeki mevcut bir LoRaWAN ağından elde edilen ölçümler üzerinde performans değerlendirmesi yapılmış; ikinci olarak ise, CloudRF® yazılımı ile kablosuz haberleşmede kullanılan yayılım modelleri analiz edilerek, üç farklı yayılım modeli ile mevcut şebeke yapısı üzerinde gerçekleştirilen benzetimlerin sonuçları, ağdan elde edilen ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Doktora tezinin literatüre katkısı, SF, SNR ve RSSI parametreleri arasındaki çok değişkenli ilişkinin sahaya dayalı ölçümlerle modellenmiş olmasıdır. Özellikle farklı akustik ve yapısal özelliklere sahip iç mekân koşullarında yapılan uygulamalı ölçümler sayesinde, LoRaWAN sistemlerinin çevresel değişkenlere duyarlılığına dair yeni bulgular ortaya konmuştur. Böylece, doktora tezi, yalnızca kuramsal analizlerle sınırlı

kalmayıp, gerçek dünya koşullarında test edilen verilere dayanan özgün bir yaklaşıma sahiptir.

Elde edilen bulgular, düşük güçlü uzun menzilli haberleşme ağlarının tasarımı yapılırken, SF, SNR ve paket kaybı parametrelerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda, bina içi ve karma (bina içi + bina dışı) ortamlarda kurulu ağ performanslarının karşılaştırmalı analizini öneren yöntem ve değerlendirme yaklaşımı, literatürdeki uygulama eksikliğini gidermeye yönelik bir çözüm sunmakta ve LoRaWAN tabanlı ağların daha verimli, ölçeklenebilir ve güvenilir şekilde kurgulanmasına katkı sağlamaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ve KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kaynak Araştırması

LoRaWAN® teknolojisi, özellikle 2015 yılından itibaren akademik araştırmaların dikkatini çekmeye başlamıştır (Margelis vd, 2015; Schroder vd, 2016). Haxhibeqiri vd. (2018)'de gerçekleştirilen Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler (Strength, Weakness, Opportunities and Threats, SWOT) analizinde, LoRaWAN® teknolojisi değerlendirilmiş ve sonuçlar Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. LoRaWAN® için yapılmış bir SWOT analizi **(**Haxhibeqiri vd., 2018)

SWOT İçeriği	Açıklamalar
Güçlü	• Geniş kapsama alanı • Düşük güç tüketimi • Düşük sistem karmaşıklığı • Uygun maliyetli cihazlar • Özel ağ kurulumu • İzleme uygulamalarına uygunluk
Zayıf	• Güvenlik açıkları • Ağ yoğunluğunda zayıf uyarlamalı veri hızı (Adaptive Data Rate, ADR) performansı • Aşağı yönlü iletişimde düşük ölçeklenebilirlik
Fırsat	• Aşağı yönlü iletişimin iyileştirilmesi • Trafik eşlemesiyle düşük güç tüketimi • Zamanlamayla güç tüketiminin azaltılması • Taşıyıcı Algılamalı Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access) ile görev döngüsü sınırlamalarının aşılması
Tehdit	• Yukarı yönlü iletişimde ölçeklenebilirlik sorunu • Frekans girişimi riski • İki yönlü iletişime uygun olmayan mimari

Çizelge 2.1 incelendiğinde, LoRaWAN® teknolojisi, çeşitli avantajları sayesinde özellikle düşük güçlü, geniş alan kapsamalı ağ çözümlerinde öne çıkmaktadır. Bu teknolojinin güçlü yönleri arasında; geniş kapsama alanı, düşük güç tüketimi, düşük

sistem karmaşıklığı, uygun maliyetli cihazlar, özel ağ kurulumu imkânı ve izleme uygulamalarına uygunluk gibi unsurlar yer almaktadır. Bu özellikler, özellikle IoT tabanlı izleme ve veri toplama sistemlerinde LoRaWAN®'ı tercih edilebilir kılmaktadır. Bununla birlikte, LoRaWAN® teknolojisinin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Başlıca zayıf yönleri; güvenlik açıkları, ağ yoğunluğu arttıkça ADR mekanizmasının zayıf performans göstermesi ve aşağı yönlü iletişimde görev çevrimi sınırlamaları nedeniyle düşük ölçeklenebilirlik olarak öne çıkmaktadır. Bu sorunların giderilmesine yönelik olarak, literatürde aşağı yönlü iletişimin yapısal olarak iyileştirilmesi**,** trafik senkronizasyonu ile düşük güç tüketiminin sağlanması**,** trafik zamanlamasının optimize edilerek enerji verimliliğinin artırılması ve görev çevrimi sınırlamalarını aşmak amacıyla taşıyıcı algılamalı çoklu erişim (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) yaklaşımlarının kullanılması gibi teknik iyileştirmeler sunulmaktadır. **(**Haxhibeqiri vd., 2018**)**. LoRaWAN® teknolojisi, bazı teknik sınırlamaları nedeniyle belirli kullanım senaryolarında performans kayıplarıyla karşı karşıya kalabilmektedir. Özellikle ağ yoğunluğunun arttığı durumlarda, yukarı yönlü iletişimde ölçeklenebilirlik sorunları yaşanması, sistem verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir **(**Haxhibeqiri vd., 2018**)**. Ayrıca, diğer kablosuz iletişim teknolojilerinden kaynaklanabilecek frekans girişimi riski, sinyal kalitesinde bozulmalara ve veri iletiminde gecikmelere neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, LoRaWAN® mimarisi, doğası gereği iki yönlü iletişim için yeterince uygun olmayan bir yapı sergilemekte, bu da özellikle çift yönlü veri akışı gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Haxhibeqiri vd., 2018). Mevcut LoRaWAN® uygulamaları ve araştırmaları, Çizelge 2.2 ile verilen kapsama, kapasite, maliyet, düşük güç ve geliştirilmiş özellikler başlıklarında değerlendirilmektedir. (Chaudhari vd., 2020). LoRaWAN® teknolojisi; yaşam, tarımsal alanda uzaktan izleme, kablosuz algılayıcı ağları, trafik izleme, konum belirleme ve akıllı şehir uygulamaları gibi çok sayıda alanda kullanılmaktadır (Haxhibeqiri vd., 2018). Güç tüketimi bağlamında, uç cihazların (UC) enerji kullanımını tahmin etmeye olanak tanıyan bir enerji tüketim modeli sunan çalışmalar mevcuttur (Bouguera vd., 2018). Benzer şekilde, UC'lerin çektiği akımı, ömür beklentisini ve veri iletimine ilişkin enerji maliyetlerini analiz eden analitik modeller geliştirilmiş; bu sayede LoRaWAN®' ın enerji tüketim performansı detaylı şekilde incelenmiştir (Casals vd., 2017). LoRaWAN®'ın kapasite sınırlarını ele alan bir diğer çalışmada, TS-LoRa adı verilen bir yöntem

önerilmiştir. Bu yöntem, cihazların kendi aralarında koordinasyon sağlayarak belirli bir zaman çerçevesi içinde iletişim kuracakları zaman dilimlerini özerk biçimde belirlemelerine olanak tanımaktadır (Zorbas vd., 2020).

Çizelge 2.2. LoRaWAN® uygulamalarının değerlendirildiği ana başlıklar (Chaudhari vd., 2020)

Başlık	Açıklama
Kapsama	• İç-Dış Ortam • Şehir-Kırsal Bölge • Yer altı/Su altı/ Duvar içi
Kapasite	• Tek - Çok Yönlü • Tek - İki Yönlü • Ölçeklenebilirlik/ Veri Hızı/ Güvenilirlik
Maliyet	• Cihaz • Ağ • Ölçeklenebilirlik
Güç Tüketimi	• Enerji Verimliliği • Pil Ömrü • Gecikme
Özelleştirilmiş Nitelikler	• Uygulama Özelindeki Gereklilikler • Çeşitli Kurulum Senaryoları • Diğer

Öte yandan, 4G/5G (4./5.Nesil Hareketli Hücresel Haberleşme, 4th/5th Generation Cellular Communication) sistemleri ile LoRaWAN® teknolojisinin birlikte çalışabilirliğini inceleyen bir çalışmada, her iki sistemin bütünleştirilmesini mümkün kılan bir çözüm önerilmiştir. Bu bütünleştirmenin, mobil ağ operatörlerinin mevcut altyapılarını LoRaWAN® ile birlikte sorunsuz biçimde kullanabilmelerini sağlayacağı öngörülmektedir (Navarro vd., 2018). Doktora çalışmasının kapsamı doğrultusunda, LoRaWAN® sistemlerinde SF, SNR ve RSSI gibi performans parametreleri kritik öneme sahiptir. LoRaWAN® ağ performansı, ağın iç mekânda mı yoksa dış mekânda mı

konumlandığına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Özellikle açık ve kapalı alanların bir arada bulunduğu fabrika ortamlarında yapılan uygulamada, bir adet ağ geçidi (Gateway, GW) ve çok sayıda UC ile gerçekleştirilen ölçümlerde, SF7 kullanıldığında yaklaşık 34.000 m²'lik bir alanın, SF12 ile ise yaklaşık 250.000 m²'lik bir fabrikanın LoRaWAN® ağı tarafından kapsanabildiği gözlemlenmiştir (Haxhibeqiri vd., 2017). LoRaWAN® paket iletimindeki başarı oranlarının analizi, çoğunlukla benzetim tabanlı çalışmalar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu doğrultuda yapılan bir senaryoda, tek bir GW ile açık tarım alanlarında yerleştirilmiş 1000 adet UC'nin, saatte bir mesaj gönderme sıklığıyla çalıştığı durumda, iletim başarı oranlarının yüksek seviyede gerçekleştiği tespit edilmiştir (Miles vd., 2020). Pérez vd. (2022)'de, LoRaWAN® teknolojisi diğer LPWAN çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, LoRaWAN®'ın %80 oranında paket dağıtım başarısı ve yaklaşık -110 dBm RSSI değeriyle, bir diğer LPWAN teknolojisi olan Sigfox'a kıyasla daha iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur. Öte yandan, SNR parametresi, kablosuz haberleşme performansını etkileyen en kritik değişkenlerden biri olması nedeniyle, LoRaWAN® ağ performans analizlerinde dikkate alınan temel bir metrik olarak öne çıkmaktadır. Arratia vd. (2024)'te, doğal alanların izlenmesini mümkün kılan LoRa tabanlı, modüler, düşük güçlü ve uzun menzilli bir iletişim protokolü olan Geliştirilmiş LoRa Katmanı (Advanced Layer LoRa, AlLoRa) önerilmektedir. Söz konusu protokol, 135 km²'lik bir alanı kapsayan bölgede test edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, AlLoRa'nın veri iletim süresi, güç tüketimi ve iletişim menzili açısından başarılı bir performans sergilediği belirlenmiştir. El Fehri vd. (2023)'te, zaman, kanal ve SF'nin deterministik olarak tahsis edilmesini sağlayan zaman çizelgesi tabanlı yeni bir şema önerilmiştir. Bu yapı, yukarı yönlü iletişimi iyileştirmeyi hedeflemektedir. Yapılan analizlerde, önerilen yöntemin LoRaWAN® ağ performansı üzerinde anlamlı etkiler yarattığı belirlenmiştir. Özellikle, yukarı yönlü bağlantı gecikmesinde %89, enerji tüketiminde ise %78 oranında azalma sağlandığı tespit edilmiştir. LoRaWAN® ağlarında SF'nin cihazlara atanması, ağ performansı üzerinde doğrudan etkili olup, özellikle paket çarpışmaları ve veri kayıplarının azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, Gorrela ve Choudhury (2025)'te, etkili bir kümeleme uyumlu veri hızı (Cluster Adaptive Data Rate, Cluster-ADR) mekanizması önerilmiştir. Söz konusu mekanizma, tahmini yol kaybına (path loss, PL) dayalı olarak UC'leri kümelendirmekte

ve sinyal ortogonalliğinden yararlanarak, yoğun LoRa tabanlı endüstriyel nesnelerin interneti (Industrial IoT, IIoT) ağlarında, çarpışmaları ve paket kayıplarını azaltmak amacıyla, SF tahsisi gerçekleştirmektedir. Çalışmada ayrıca, ölçülen yol kaybına göre cihazların kümelendiği, her kümeye farklı kanalların atandığı ve her cihaz için en uygun SF değerinin belirlendiği bir kümeleme yöntemi sunulmuştur. Centelles vd. (2024)'te, LoRa ağlarında esnek bir örgü ağ topolojisi oluşturmayı hedefleyen bir yönlendirme protokolü geliştirilmiştir. Önerilen sistem, heterojen ağ yapılarında farklı SF'lerin daha etkin kullanılmasını sağlayan ve iletim süresi ile veri iletim hızı arasındaki dengeyi gözeten yeni bir metrik olan havada kalma süresi (Time on Air, ToA) temelinde yapılandırılmıştır. Geliştirilen SF tabanlı yönlendirme protokolü, FLoRa benzetim çerçevesi ve OMNeT++ ağ benzetim aracı kullanılarak test edilmiş; yaygın yönlendirme stratejileriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, ağ performansının en üst düzeye çıkarılabilmesi için, çoklu SF kullanımının tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Özellikle rastgele ağ topolojilerinde, düğüm ve bağlantı heterojenliğinden faydalanılarak, düşük ve orta düzey trafik yüklerinde en iyi gecikme performansı, önerilen çoklu SF ve ToA metriklerine dayalı yönlendirme protokolü ile elde edilmiştir.

LoRaWAN® ağında RSSI tabanlı teknikler kullanılarak mesafe tahmini yapan bir konumlandırma sistemi geliştirilen farklı bir çalışmada ise, dinamik bir yol kaybı modeli uygulanmış; kentsel alanlardaki sinyal iletimine etki eden çeşitli ve değişken çevresel koşullar dikkate alınmıştır (Vo vd., 2024). Önerilen yöntem, konum tahmini doğruluğunu artırmak amacıyla, iç ve dış ortamlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ortalama hata değeri iç ortamlarda 1 m'nin, dış ortamlarda ise 7 m'nin altına düşürülmüştür. Ayrıca, birikimli dağılım fonksiyonu (Cumulative Distribution Function, CDF) analizine göre, iç ortamlardaki konum tahmin hatalarının %90'ı 1,08 m'den; dış ortamlardakilerin ise yine %90'ı 7,55 m'den daha küçük değerlerde gerçekleşmiştir. Bhat vd. (2023)'te, LoRaWAN® ağlarındaki RSSI ve SNR gibi kanal performans göstergeleri ile çevresel hava koşulları arasındaki ilişkiyi modellemeye yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, deneysel LoRaWAN® çok değişkenli zaman serisi verileri üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Geliştirilen modelin, kanal performansı ve çevresel koşulları yüksek doğrulukla tahmin edebildiği ve

bu süreçte elde edilen ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE) değerinin yaklaşık 0,45 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen modelin, farklı çevresel koşullarda iletişim parametrelerinin gerçek zamanlı olarak optimize edilmesini desteklediğini ve dolayısıyla LoRaWAN® ağ performansını artırmada etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Tian vd. (2023)'te, LoRaWAN® ağlarının kapsama alanını genişletmek amacıyla geliştirilen LoRaHop protokolü tanıtılmıştır. Bu protokol, UC'lerin GW'ye doğru paketleri çok atlamalı (multihop) şekilde iletip alabilmesini mümkün kılmakta ve böylece LoRaWAN® ağlarına çok atlamalı iletişim desteği kazandırmaktadır. LoRaHop, eşzamanlı iletimler sayesinde, ağ üzerinde güvenilir ve verimli veri toplama veya dağıtımı sağlamakta; aynı zamanda ağ oluşum sürecini sadeleştirmektedir. Çalışma bulgularına göre, LoRaHop protokolü, ağın kapsama alanını etkili biçimde genişletmekte; iletişim güvenilirliğini %98,33'e kadar artırmakta ve enerji tüketimini %48,02 oranında azaltmaktadır. Ayrıca, düşük SF kullanılarak oluşturulan çok atlamalı LoRaWAN® yapılarının, yüksek SF kullanılan tek atlamalı yapılara kıyasla daha yüksek enerji verimliliği ve daha iyi ölçeklenebilirlik sunduğu gösterilmiştir.

LoRaWAN® teknolojisinin kapsama etkinliğinin çeşitli çevresel değişkenler üzerinden analiz edildiği deneysel bir çalışmada, incelenen değişkenler arasında, bina yüksekliği, yükselti, GW konumu, verici-alıcı mesafesi, RSSI ve SNR yer almakta olup, bu parametrelerin kapsama alanı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Andrianingsih vd.,2024). Çok sayıda yapısal engelin bulunduğu test ortamında, bu değişkenler arasındaki korelasyonu belirlemek amacıyla özel bir matematiksel model geliştirilmiştir. Taşınabilir ölçüm cihazlarıyla elde edilen veriler, -127 dB ile 60 dB arasında RSSI değerleri ve ortalama 7 dB SNR ile kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda geliştirilen model, kapsama alanı tahmininde %99,3 doğruluk ile yüksek güvenilirlik sergilemiştir.

Antwerp veri setinin kullanıldığı bir çalışmada, LoRaWAN® performansı ve dış ortam konum belirleme üzerine odaklanılmıştır (Bagherian vd., 2025). Çalışma kapsamında, K-en yakın komşuluk (K-Nearest Neighbourhood, KNN) ve yapay sinir ağları (Artificial Neural Network, ANN) gibi makine öğrenmesi yöntemlerinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın geleneksel konum belirleme

yöntemlerine göre %60, veri setindeki mevcut makine öğrenmesi tabanlı yöntemlere göre ise %20 oranında iyileşme sağladığını göstermektedir. Rodriguez (2024)'te, üç farklı ölçekte LoRaWAN® ağı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Birinci ölçekte, bir konut binasında kurulan ve bir GW ile 100 UC'den oluşan küçük ölçekli bir LoRaWAN® ağı ele alınmıştır. İkinci ölçekte, şehir ölçeğinde LoRaWAN® uygulamaları hedeflenmiş; bu kapsamda Cenevre, Ithaca ve Brooklyn (New York) bölgelerine ait iletim veri kümeleri kullanılarak, özgün kapsama tahmin modelleri geliştirilmiştir. Model performanslarına ilişkin değerlendirmeler sonucunda, paket alım oranının (Packet Receive Rate – PRR) tahminine dayalı yaklaşımların, mevcut RSSI tabanlı yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir. Üçüncü ölçekte ise, eyalet ve ilçe düzeyinde LoRaWAN® ağlarının yaygınlaştırılması incelenmiştir. Bu aşamada, geliştirilen PRR modellerinin farklı coğrafi bölgelerdeki genellenebilirliği test edilmiş; lojistik regresyon, XGBoost ve evrişimli sinir ağı (Convolutional Neural Network, CNN) gibi makine öğrenmesi algoritmalarının, örnek dışı veri kümeleri üzerindeki tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Aksoy vd. (2024)'te, iç ortamda kurulan bir LoRaWAN® ağının performansı, 18 katlı bir binada çatıya yerleştirilen bir GW aracılığıyla yapılan kapsamlı ölçümlerle analiz edilmiştir. Çalışma, UC'lerden ve Adeunis Saha Test Cihazı (Adeunis Field Test Device, AFTD) kullanılarak elde edilen RSSI, SNR ve SF değerlerinin karşılaştırmalı analizine odaklanmaktadır. UC'ler, binanın 1., 6., 12. ve 18. katlarına rastgele yerleştirilmiş; günlük performans verileri ağ sunucusu üzerinden toplanmıştır. Her bir kat için, AFTD kullanılarak 100 örnek ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, 18. kat hariç olmak üzere, UC'lerden elde edilen maksimum ve ortalama RSSI değerleri, AFTD verilerinden daha yüksek çıkmıştır. SNR açısından, yalnızca 1. ve 18. katlardaki maksimum değerler hariç tutulduğunda, AFTD ile ölçülen tüm SNR değerleri, UC'lerden elde edilenlerden daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, SF ölçümleri, GW'ye olan mesafe arttıkça daha yüksek yayılım faktörlerinin tercih edildiğini, yani sistemin teorik beklentilere paralel bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Marais (2018)'de, 18 UC ve 1 GW'den oluşan test ortamında, her UC'ye uzaktan yapılandırma komutları gönderilmiş ve her bir cihaz 1000 paket iletimini tamamlayana kadar deneyler sürdürülmüştür. Bu çalışmada, performans metriği olarak paket teslim oranı (Packet Delivery Rate, PDR) kullanılmış ve gönderilen paket sayısına göre alınan paket sayısı oranı hesaplanmıştır. LoRaWAN® ile NB-IoT teknolojilerinin

karşılaştırıldığı bir diğer çalışmada, sinyal yayılım performansı farklı çevresel koşullarda değerlendirilmiştir (Stankovic, 2020). RSSI ölçümleri üzerinden yapılan analizler sonucunda, her iki teknolojinin de kırsal alanlarda daha istikrarlı performans sergilediği, ancak hiçbir ortamda %100 kapsama sağlanamadığı ortaya konmuştur. Ağ performansına odaklanan Mendes (2022)'de, ağ geçitlerinin konumlandırılması, cihazların enerji tüketimi ve buna bağlı olarak cihaz ömrü analiz edilmiştir. Yoğun bitki örtüsüne sahip bir saha ortamında, sinyal kalitesini düşüren başlıca faktörün fiziksel engeller olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, ADR algoritmalarının UC'lerde enerji verimliliğini artırdığı, ancak ağın toplam enerji tüketimini de yükselttiği görülmüştür. FLoRa modülü benzetimi kullanılarak, 25 cihazdan oluşan bir ağda, Oulu kayıp modeli uygulanmış, ağ geçitlerinin ideal konumlarının önceden belirlenmesinin ağ ömrünü artırabileceği sonucuna varılmıştır. Kaur vd. (2024)'te, kapalı alan uygulamaları için, 433 MHz frekansında SX1278 LoRa modülü bütünleştirilen ilk örnek bir cihazla kapsamlı ölçümler yapılmıştır. Performans, SNR, RSSI ve PRR gibi göstergeler üzerinden, doğrudan görüş hattı (Line of Sight, LoS) ve doğrudan görüş hattı olmayan (Non-LoS, NLoS) senaryolarda analiz edilmiştir. Özellikle SF'nin 9 ve kodlama oranının (Coding Rate, CR) 4/5 olduğu durumda, −89,12 dBm RSSI ve 9,91 dB SNR değerleri elde edilmiştir. Ayrıca çalışma, %100 paket teslim oranı ve maksimum veri aktarımı sağlayan parametre yapılandırmalarını da tanımlamıştır. Mahjoub vd. (2024)'te, farklı verici-alıcı yüksekliklerinde, 868 MHz frekans bandı ve 125 kHz bantgenişliğinde çalışan antenler ile RSSI ve SNR ölçümleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, çevresel koşullar, GW yüksekliği ve SF'nin RSSI üzerindeki etkileri analiz edilmiş; ardından SF'nin PDR üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Son aşamada, sinyal yol kaybı karakterizasyonuna odaklanılarak, ağaç yoğunluğu ve gövde çapına dayalı optimize edilmiş bir sinyal zayıflama modeli önerilmiştir. Üç farklı bölgede test edilen bu modelin kök ortalama kare hatası (Root Mean Square Error, RMSE) değerinin 4 olduğu raporlanmıştır.

Konum belirleme alanındaki çalışmalardan birinde, Islam vd. (2024), geleneksel 3 GW kullanımı yerine, farklı bir yaklaşım benimseyerek, tek mobil LoRa GW kullanan bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde, RSSI verileriyle hedef düğüm ile geçit arasındaki mesafe tahmin edilmekte; bu işlem için parçacık filtreleme ve makine öğrenimi tabanlı bir işlem hattı uygulanmaktadır. Önerilen yöntemde, aktif arama senaryolarında hedefe

ulaşmak için genellikle 2–3 atlama gerektiği; pasif izleme doğruluğunun ise GW ile hedef arasındaki 20–170 m mesafeye bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.3. Doktora tez konusu ile ilgili yapılan literatür taramasının özeti

Referans	**Ortam**	**Performans Parametresi**	**Yöntem**
Haxhibeqiri vd., 2018	İç ortam	RSSI, SNR	Python ile Benzetim
Haxhibeqiri vd., 2017	İç-Dış Ortam	RSSI, SNR, Paket Kaybı	Python ile Benzetim
Miles vd., 2020.	Dış ortam	Paket İletim Başarı Oranı	Network Simulator-3, MATLAB Eğri Uydurma
Pérez vd., 2022	Dış ortam	RSSI, Paket İletim Başarı Oranı	Deneysel
Arratia vd.,2024	Dış ortam	RSSI, SF ve Güç Tüketimi	Deneysel, Çalışmaya özel yazılım
El Fehri vd., 2023	Tanımlanmamış	SF	Çalışmaya özel yazılım
Gorrela ve Choudhury, 2025	İç Ortam	SF, Paket İletim Başarı Oranı, Gecikme, Ağ Verimi	Network Simulator-3
Centelles vd., 2024	Dış Ortam	SF, ToA	OMNET++, FLoRaSim
Vo vd., 2024	İç-Dış Ortam	RSSI	Deneysel
Bhat vd., 2023	Dış Ortam	RSSI, SNR	Teorik
Tian vd., 2023	Dış Ortam	Paket İletim Başarı Oranı, SF	Deneysel

Çizelge 2.3. Doktora tez konusu ile ilgili yapılan literatür taramasının özeti (devam)

Andrianingsih vd. 2024	Dış Ortam	RSSI, SNR	Deneysel
Bagherian vd., 2025	Dış Ortam	RSSI	Deneysel
Rogriguez, 2024	Dış Ortam	Paket İletim Başarı Oranı, RSSI	Deneysel
Aksoy vd., 2024	İç Ortam	RSSI, SNR	Deneysel
Marais, 2018	İç-Dış Ortam	Paket İletim Başarı Oranı	Deneysel
Stankovic, 2020	Dış Ortam	RSSI	Deneysel
Mendes, 2022	Dış ortam	Güç Tüketimi	Deneysel
Kaur vd., 2024	İç Ortam	Paket İletim Başarı Oranı, RSSI, SNR	Deneysel
Mahjoub vd., 2024	Dış Ortam	Paket İletim Başarı Oranı, RSSI, SF, SNR	Deneysel
Islam vd. 2024	Dış Ortam	RSSI	Deneysel

Doktora tez konusu ile ilgili yapılan kapsamlı literatür taramasının özeti Çizelge 2.3'te verilmiştir. Literatür taraması kapsamında elde edilen bulgular ışığında, bilindiği kadarıyla ilk kez bu tezde, LoRaWAN® ağlarının iç ortam ve karma (iç+dış) ortam koşulları altında performans analizine yönelik kapsamlı bir çalışma sunulmaktadır. Mevcut literatüre göre, ilk defa, bu farklı ortam senaryoları bir arada ele alınarak; SF, SNR ve RSSI gibi temel performans göstergeleri arasındaki ilişkiler, deneysel ölçümler ve benzetim çalışmaları yoluyla ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Bu parametrelerin sistem performansı üzerindeki birleşik etkileri analiz edilmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca, farklı propagasyon modellerinin LoRaWAN® sinyal yayılımı üzerindeki etkileri, benzetim ortamında analiz edilerek çalışma kapsamına dâhil edilmiştir. Bütün bu bileşenler bir

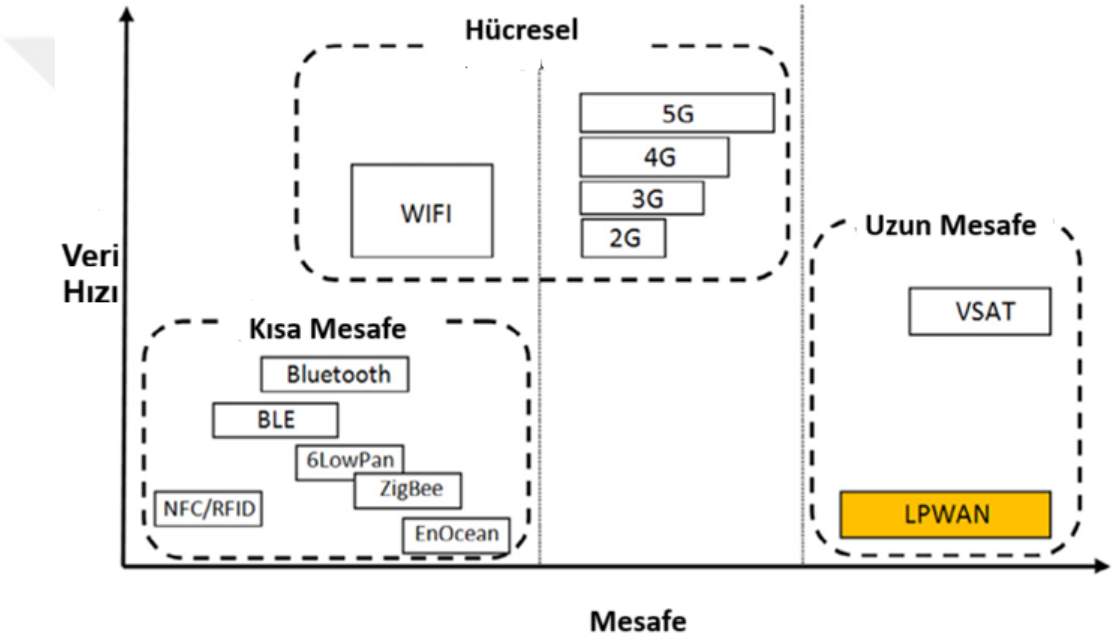
arada ele alındığında, bu doktora çalışması, literatürde LoRaWAN® performans analizine dair ilk bütüncül yaklaşımı sunması bakımından özgün bir katkıya sahiptir.

2.2. Kuramsal Temeller

Bu bölümde, tez konusu ile ilgili kuramsal temeller, LPWAN, LoRa, cıvıltı yayılım spektrumu (Chirp Spread Spectrum, CSS) modülasyonu, SF, SNR, RSSI değişkenleri ve LoRaWAN® standartı çerçevesinde açıklanmıştır. IoT, internete erişimi olan cihazlar arasındaki bağlantı ve veri transferini ifade eden bir terim olarak günümüzde çokça kullanılmaktadır. IoT, bilgisayar ve internetin ardından bilgi endüstrisindeki üçüncü büyük değişim olarak kabul edilmektedir. Mobil iletişim ve internetten farklı olarak, IoT insanları nesnelere veya nesneleri birbirine bağlar. ABD araştırma enstitüsü Forrester tarafından yapılan bir tahmine göre IoT'nin, endüstriyel değeri internetten 30 kat daha büyük olan bir hacim oluşturacağı öngörülmektedir (Zhang, 2011). Günümüzde, IoT teknolojilerinin artan hızdaki yükselişi ile uygulamada, güvenlik, ekipman takibi, tarım, akıllı ölçüm, akıllı şehir ve akıllı ev çözümleri bulunmaktadır (Mekki vd., 2019). Gelecek öngörülerine göre 2020 yılında kişi başına düşen internet erişimli cihaz sayısı 6,58 iken; 2030 yılında, bu sayının yaklaşık 5 katına çıkarak 31,7 olması beklenmektedir (Al-Sarawi vd., 2020). Bu artışın getirisi olarak, UC, ağ elemanları ve bütünleşik yazılım, sunucu çözümlerinden oluşan IoT ekosisteminin gelişmesi ve etki alanını genişletmesi beklenmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı, tez kapsamında ele alınan ve IoT ekosisteminin önemli bir bileşeni olan LPWAN uygulamalarının gittikçe önem kazanacağı öngörülmektedir.

LPWAN, kullandığı düşük güç, işaretin ulaştığı menzilin uzunluğu ve düşük maliyet gerekçeleri ile endüstriyel ve endüstriyel olmayan alanlarda her geçen gün artan oranda kullanılmaktadır (Mekki vd., 2019). LPWAN teknolojileri, kırsal bölgelerde 10-40 km'ye ve kentsel bölgelerde 1-5 km'ye kadar iletişim kurabilmektedir (Centenaro vd., 2016). Aynı zamanda, 10 yıldan fazla pil ömrü ile yüksek enerji verimliliği ve saha operasyon avantajı sağlayabilmektedir (Patel ve Won, 2017) . Ayrıca, radyo yonga setinin 2 €, yıllık operasyon maliyetinin de 1 € dolaylarında olması nedeniyle, görece ucuz bir teknolojidir (Raza vd., 2017). Özetle, LPWAN teknolojileri, IoT uygulamaları açısından uygun olup, Şekil 2.1 ile gösterildiği üzere, küçük veri bloklarını göndermek için idealdir. Veri iletim

hızı, hücresel haberleşme teknolojilerinde, diğerlerine göre daha yüksektir. Hem mesafe hem de veri iletim hızı ihtiyaçlarını karşılamakla birlikte, menzil azaldıkça, Bluetooth, Zigbee vb. teknolojilerde veri iletim hızı da düşmektedir. LPWAN, uzun menzilli haberleşmede kullanılmakla birlikte, veri iletim hızı, hücresel haberleşmeden düşüktür. Uzun mesafe haberleşmede, en yüksek veri iletim hızı, çok küçük açıklık terminalinde (Very Small Aperture Terminal, VSAT) olmakla birlikte; LPWAN, bu alanda, düşük veri hızı ve uzun mesafe özellikleriyle öne çıkmaktadır (Mekki vd., 2019).



Şekil 2.1. LPWAN'ın veri hızı ve mesafe ölçeğinde radyo haberleşmesindeki durumu

En kısa mesafeli kablosuz erişim teknolojileri 0-10 m arasında kapsamaya sahiptir ve başlıcaları radyo frekansı ile tanımlama (Radio Frequency Identification, RFID) ve yakın alan iletişim (Near Field Communication, NFC) olarak ifade edilebilir. Bir sonraki kapsama aralığı 10-100 m'dir. Bu aralıkta, güncel hayatta da sıklıkla karşılaşılan Bluetooth, Zigbee gibi teknolojilerin yanısıra, Enocean, Wavenis ve 6LowPAN gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılan teknolojiler de bulunmaktadır. Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) ağırlıklı olarak belirlediği standartların kullanıldığı 0-100 m aralığında

IEEE802.11 standardı ailesi bulunmaktadır. Maksimum kapsama mesafesinin 10 km olduğu alanda ise Wi-SUN, ZigBee, NAN ve Wireless M-Bus teknoloji ailesi bulunmaktadır. Kapsama mesafesinin 100 km'ye ulaştığı son aralıkta ise günümüzde sıkça kullanılan üçüncü, dördüncü ve beşinci nesil (3rd Generation, 3G; 4th Generation, 4G; 5th Generation, 5G) hareketli hücresel haberleşme teknolojileri; LPWAN standartlarından Sigfox, Ingenu, Telensa, LoRa, LoRaWAN®, NB-IoT, DASH7, IEEE 802.15.4k/g gibi teknolojiler bulunmaktadır. LPWAN bu açıdan değerlendirildiğinde, VSAT ile birlikte uzun kapsama mesafeli teknolojiler arasında yer alır. Veri iletim hızlarının düşük olmasına rağmen, düşük güç tüketen karakteristik özelliği ile de farklı bir konumda yer almakta ve akıllı evler, akıllı şehirler, endüstriyel uygulamalar, sağlık, eğitim, çevre, tarım vb. gibi geniş bir uygulama alanına hitap etmektedir. Kısa mesafe kablosuz teknolojilerden ZigBee, Bluetooth vb. çok kullanılmakla birlikte, uzun mesafe iletim maksatlı tasarlanmamışlardır. 2G, 3G, 4G ve 5G hücresel haberleşme yöntemleri geniş kapsama alanı ve yüksek veri iletim hızı sunmakta; ancak son kullanıcı cihazında yüksek güç tüketimi gerçekleştirmektedirler. Nesnelerin interneti uygulamalarının, maliyet etkinliği, düşük güç tüketimi, düşük veri hızı ve uzun mesafe gibi karşılaması gereken özel koşulları bulunmaktadır. Bu ihtiyaçlar nedeniyle yeni bir kablosuz haberleşme teknolojisine gerek duyulmuştur (Chaudhari ve Zennaro, 2020). LPWAN, uzun menzilli kablosuz haberleşme ve nesnelerin interneti kavramlarının kesiştiği noktada yer almaktadır. Karakteristik özelliği olan düşük güç tüketimi ile diğer nesnelerin interneti çözümlerinden ayrılan LPWAN uygulamaları, klasik kablosuz haberleşme yöntemlerinin aksine, uzun mesafelerde düşük bantgenişlikli haberleşmeye odaklanmıştır (Chaudhari ve Zennaro, 2020). IoT ve makineler arası (Machine-to-Machine, M2M) haberleşme için bir çözüm olan LPWAN, geleneksel hareketli hücresel haberleşme sistemlerinden daha düşük maliyetle milyarlarca UC için bağlantı sağlayabilir (Chaudhari ve Zennaro, 2020).

LPWAN teknolojileri arasında Sigfox, NB-IoT ve LoRaWAN® öne çıkan standartlardır (Mekki vd., 2019; Stanco vd., 2024). Sigfox, 2010 yılında patenti alınmış bir LPWAN teknolojisidir. Düşük güç tüketimli geniş alan ağlarında bir hücresel ağ tasarlayan bu sistemde, Sigfox ağ operatörleri (Sigfox Network Operator, SNO), yazılım tabanlı radyo (Software Defined Radio, SDR) taşıyan baz istasyonu kurulumu yaparlar ve bunları

internet protokolü (Internet Protocol, IP) tabanlı ağları kullanarak arka uç sunuculara bağlarlar (Stanco vd., 2024; Fourtet ve Ponsard, 2020).

Bir diğer LPWAN teknolojisi olan NB-IoT, Haziran 2016'da 3GPP'nin 13. sürümünde belirtilen bir dar bant IoT teknolojisidir. NB-IoT, lisanslı frekans bantları altında, mobil haberleşme için küresel sistem (Global System for Mobile Communication, GSM) ve LTE ile birlikte var olabilir (Mekki vd., 2019). Bir GSM operatörü, 200 kHz olan bir GSM taşıyıcısını NB-IoT ile değiştirebilir. Bir LTE operatörü, NB-IoT'ye 180 kHz'lik fiziksel kaynak bloklarından (physical resource block, PRB) birini tahsis ederek, bir LTE taşıyıcısının içinde NB-IoT'yi konuşlandırabilir (Wang vd., 2017). Sigfox'un aksine, NB-IoT, lisanslı frekans kullanmaktadır ve 3GPP oluşumunun hücresel haberleşme teknolojileri içinde IoT kapsamlı bir çözümü olarak karşımıza çıkmaktadır. LoRaWAN®, günümüzde kullanılan LPWAN teknolojilerinin en yaygın olanlarından biridir (Milarokostas vd., 2022). LoRaWAN®, uzun mesafelerde veri iletimi için yayılmış spektrum teknolojisini kullanan bir LPWAN teknolojisi olup, aynı zamanda açık bir ağdır. Bu da, tek bir sağlayıcının kontrolünde olmadığı ve birden fazla şirket veya kuruluş tarafından kullanılabileceği anlamına gelir (Jouhari vd., 2023).

Çizelge 2.4'te LPWAN teknolojilerinden Sigfox, NB-IoT ve LoRaWAN®; modülasyon, frekans, bantgenişliği, maksimum veri iletim hızı, kapsama, maksimum yük büyüklüğü, standartlaşma vb. gibi teknik özellikler bakımından karşılaştırılmıştır (Mekki vd., 2019). Çizelge 2.4'e göre, LPWAN teknolojileri arasında yer alan Sigfox, LoRaWAN® ve NB-IoT; farklı modülasyon teknikleri, frekans kullanımları, veri hızları ve ağ mimarileriyle öne çıkmaktadır. Modülasyon tipine göre, Sigfox, düşük veri hızlarına uygun olan ikili faz kaydırmalı anahtarlama (Binary Phase Shift Keying, BPSK) modülasyon tekniğini kullanmaktadır. LoRaWAN®, CSS modülasyonuyla çalışmakta olup bu yöntem, sinyalin yayılım dayanıklılığını artırmaktadır. NB-IoT ise daha yüksek veri hızlarını desteklemek üzere dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) modülasyonu ile çalışır. Kullanılan frekanslara bakıldığında, Sigfox ve LoRaWAN®, lisanssız ISM bantlarında faaliyet göstermektedir. Avrupa'da 868 MHz, Kuzey Amerika'da 915 MHz ve Asya'da 433 MHz frekansları kullanılmaktadır.

Çizelge 2.4. LPWAN teknolojilerinden Sigfox, LoRa ve NB-IoT genel karşılaştırması (Mekki vd., 2019)

	Sigfox	**LoRaWAN®**	**NB-IoT**
Modülasyon	BPSK	CSS	QPSK
Frekans	Lisanssız ISM Bandı (868 MHz- Avrupa 915 MHz- Kuzey Amerika 433 MHz – Asya)	Lisanssız ISM Bandı (868 MHz- Avrupa 915 MHz- Kuzey Amerika 433 MHz – Asya)	Lisanslı 3G veya LTE frekansları
Bantgenişliği	100 Hz	250 kHz-125 kHz	200 kHz
Maksimum Veri Hızı	100 bps	50 kbps	200 kbps
Çift yönlülük	Limitli/ Yarı çift yönlü	Evet/ Yarı çift yönlü	Evet/ Yarı çift yönlü
Günlük maksimum mesaj	140 (UL) 30 (DL)	Limitsiz	Limitsiz
Maksimum yük uzunluğu	12 Bayt (UL) 8 Bayt (DL)	243 Bayt	1600 Bayt
Kapsama	10 km (şehir içi) 40 km (kırsal)	5 km (şehir içi) 20 km (kırsal)	1 km (şehir içi) 10 km (kırsal)
Frekans Girişimi Dayanıklılığı	Çok yüksek	Çok yüksek	Düşük
Kimlik denetleme & kriptolama	Desteklenmiyor	Evet (AES 128)	Evet (LTE kriptolama)
Adaptif veri hızı	Hayır	Evet	Hayır
Devretme	UC'ler tek bir baz istasyonuna dahil olmaz	UC'ler tek bir baz istasyonuna dahil olmaz	UC'ler tek bir baz istasyonuna dahil olmaz
Konum tespiti	Evet (RSSI)	Evet (TDOA)	Hayır (özelleştirme altında)
Özel ağa izin verme	Hayır	Evet	Hayır
Standartlaşma	Sigfox, ETSI ile standartlaşma konusunda işbirliği içinde	LoRa Birliği, ETSI ve ITU	3GPP

Buna karşın NB-IoT; yalnızca lisanslı 3G ve LTE spektrumları üzerinde çalışmakta olup mobil operatör altyapısına bütünleşmiş bir çözüm sunmaktadır. Teknolojilerin band genişlikleri düşük olup, Sigfox, yalnızca 100 Hz gibi son derece dar bir bantgenişliğiyle çalışarak enerji tasarrufu sağlar. LoRaWAN®, 125 kHz ile 250 kHz arasında değişen bantgenişliklerine sahiptir. NB-IoT ise 200 kHz'lik sabit bir bantgenişliği kullanır.

Maksimum veri iletim hızlarında, Sigfox 100 bps ile sınırlıdır. LoRaWAN®, 50 kbps'ye kadar veri hızı sunarken, NB-IoT teknolojisi bu alanda en yüksek kapasiteye sahip olup 200 kbps'ye kadar veri iletimine izin vermektedir. Sigfox sınırlı, yani yarı çift yönlü (half-duplex) iletişimi desteklerken; LoRaWAN® ve NB-IoT ise her ne kadar tam çift yönlü (full-duplex) olmasa da etkin bir yarı çift yönlü iletişim yeteneğine sahiptir. Günlük olarak Sigfox, 140 yukarı yön (uplink, UL) ve 30 aşağı yön (downlink, DL) mesaj iletimine izin vermektedir. LoRaWAN® ve NB-IoT ise günlük mesaj sayısı açısından herhangi bir sınırlama getirmemekte; uygulamaya ve operatör politikasına bağlı olarak esnek mesajlaşma olanağı sunmaktadır. Sigfox, 12 bayt UL ve 8 bayt DL olacak şekilde oldukça sınırlı bir veri yükü iletimine olanak sağlar. LoRaWAN®, bir mesajında maksimum 243 bayt büyüklüğüne kadar veri taşıyabilirken; NB-IoT bu alanda en geniş kapasiteye sahip olup 1600 bayt büyüklüğündeki veri yükünü desteklemektedir. Sigfox, şehir içi kapsama bakımından 10 km, kırsal bölgelerde 40 km'ye kadar erişim sunar. LoRaWAN® teknolojisi şehir içinde ortalama 5 km, kırsalda ise 20 km civarında kapsama sağlar. NB-IoT ise daha kısa menzilli bir yapıya sahip olup şehir içi uygulamalarda 1 km, kırsal alanda ise 10 km'ye kadar sinyal iletimi sağlayabilmektedir. İşaretin dayanıklılığı açısından önemli olan frekans girişimi dayanıklılığı konusunda, Sigfox ve LoRaWAN®, özellikle spektrum yayılım teknikleri sayesinde, yüksek dayanıklılığa sahiptirler. Buna karşın NB-IoT, lisanslı spektrum kullanmasına rağmen, bu açıdan daha düşük dayanıklılığa sahiptir. Sigfox, yerel düzeyde kimlik denetleme veya veri şifreleme mekanizmaları sunmamaktadır.

LoRaWAN®, 128-bit AES şifreleme standardını kullanarak güvenli veri iletimi sağlar. NB-IoT ise, LTE altyapısıyla bütünleştiği için, LTE tabanlı şifreleme ve kimlik doğrulama protokollerini destekler. Karşılaştırılan üç teknoloji içinden yalnızca LoRaWAN® teknolojisi, ADR desteği ile ağ yükünü ve enerji tüketimini optimize etmektedir. Sigfox ve NB-IoT'de bu özellik desteklenmemektedir. Dolaşım (roaming) kapsamında, üç teknoloji de cihazların belirli bir baz istasyonuna kalıcı olarak bağlı olmadığı, dolayısıyla geleneksel hücresel roaming mantığı dışında çalışan sistemlerdir. Bu bağlamda, UC'ler birden fazla baz istasyonuyla veya GW ile haberleşebilmektedir. Kullanım oranı arttıkça, ortaya çıkan bir ihtiyaç durumundaki konum tespitinde, Sigfox RSSI değerlerinden yararlanmaktayken; LoRaWAN®, daha gelişmiş bir yöntem olan

varış zaman farkı (Time Difference of Arrival, TDOA) ile konum belirleme sağlar. NB-IoT ise yerleşik bir konum tespiti sunmamakta olup bu özellik özelleştirme gerektirmektedir. LoRaWAN®, kullanıcıların kendi özel ağ altyapılarını kurmalarına olanak tanır. Buna karşın, Sigfox ve NB-IoT teknolojileri, servisi yalnızca operatör üzerinden sunar ve özel ağ kurulumuna izin vermez. Sigfox, ETSI ile belirli iş birlikleri yürüterek standartlaşma sürecine katılmaktadır. LoRaWAN®, LoRa Alliance liderliğinde Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) ve ITU gibi küresel kuruluşlarla koordineli olarak standartlarını belirlemektedir. NB-IoT ise 3GPP tarafından geliştirilen ve hücresel iletişim standartları ile tam uyumlu bir teknolojidir.

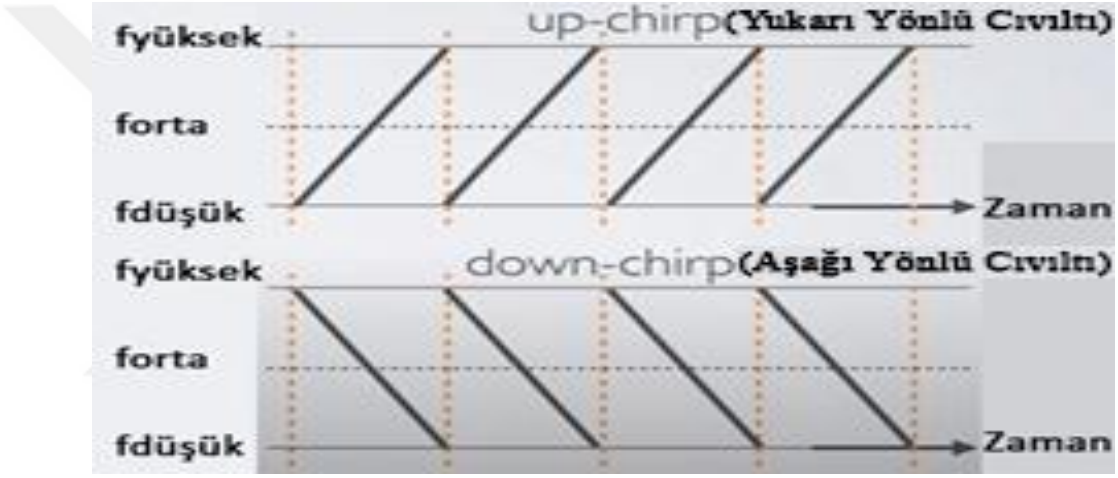
2.2.1. LoRa

LoRa, LoRaWAN® teknolojisindeki radyo ara yüzünün haberleşme tekniği olup çok uzak noktalar arasında, kablosuz haberleşmeyi, düşük güç tüketimleriyle gerçekleştirmektedir. LoRa, günümüzde tarım, enerji, su yönetimi ve ulaşım gibi alanlarda aktif olarak kullanımdadır (Pham vd., 2020). LoRaWAN® ise, LoRa kablosuz ara yüzünde çalışan bir üst protokoldür. LoRa üzerinde birçok başka protokol yazımı mümkün olmakla birlikte, en çok kullanılan LoRaWAN® protokolünün, su sayaçları, araç parklama algılayıcıları, akıllı çöp toplama, havalimanı envanter yönetimi gibi uygulamalarda, ülkemizde ve dünyada çeşitli örnekleri mevcuttur (Dunnala, 2018; Tardy vd., 2017).

Literatürde, LoRa uygulamaları ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur (Khutsoane vd., 2017; Amin, 2020; Khanderay ve Kemkar, 2021; Turčinović vd., 2020; Yunus, vd., 2019; Saban vd., 2021). LoRa, CSS temelli kablosuz haberleşme sistemidir. LoRa modülasyonu, cıvıltı işaretlerini frekans ekseninde kaydırarak haberleşme sağlamaktadır.

2.2.2. Cıvıltı Yayılım Spektrumu (Chirp Spread Spectrum, CSS)

CSS temelli iletişimde, cıvıltı olarak da adlandırılan, sıkıştırılmış yüksek yoğunlukta yayılan darbeler (Compressed High-Intensity Radiated Pulse, CHIRP) ile veri iletir. CSS, yüksek güvenilirlik, frekans girişimine karşı güçlü direnç ve düşük güç tüketimi ile uzun menzilli iletişim performansı sağlamaktadır. CSS, işaretin frekanslar arası girişime, Doppler etkisine ve çoklu yol etkilerine dayanıklı olmasını sağlar (Petäjäjärvi vd. 2017). Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, CSS, yukarı yönlü cıvıltı (up-chirp) ve aşağı yönlü cıvıltı (down-chirp) olmak üzere iki temel işaretten oluşmaktadır (LoRa, 2025).



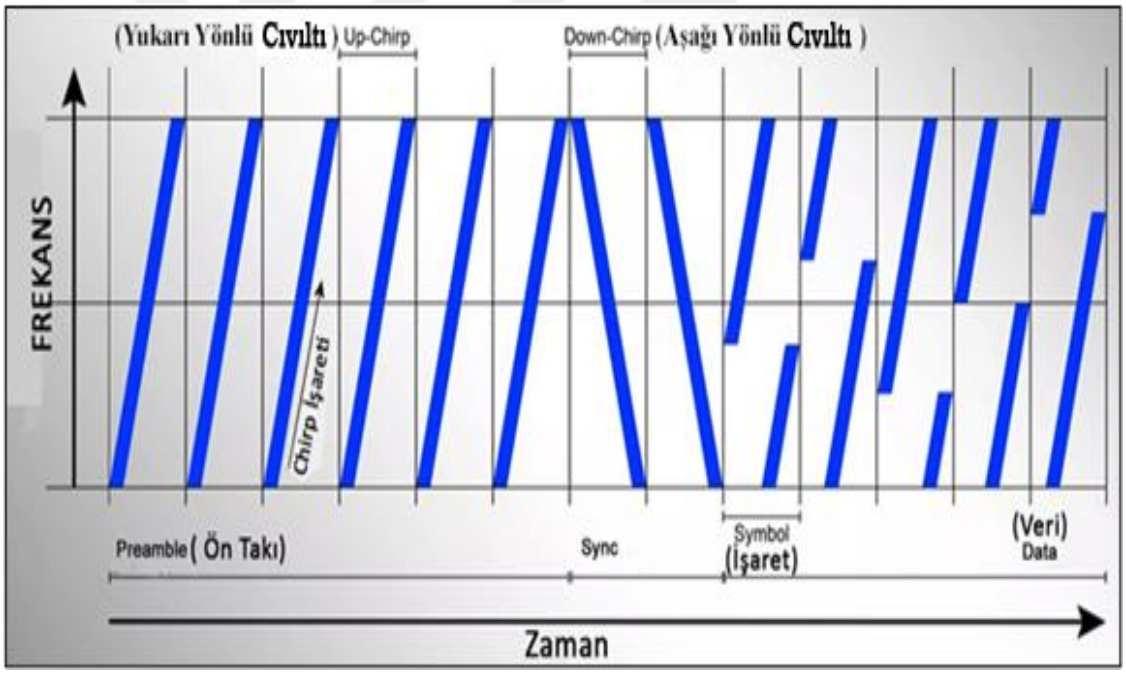
Şekil 2.2. Yukarı yönlü cıvıltı (up-chirp) ve aşağı yönlü cıvıltı (down-chirp)

Bir CSS işaretinin 4 temel parametresi vardır;

- SF
- Minimum frekans (f_{min})
- Maksimum frekans (f_{max})
- Giriş bitleri

CSS modülasyonu ilk olarak 1962 yılında bir radar sisteminde kullanılmıştır (Bor, 2020). Şekil 2.3'te bir CSS modülasyon örneği görülmektedir. CSS modülasyonu ön takı (preamble) olarak adlandırılan ve art arda gelen yukarı yönlü cıvıltı işaretlerinden oluşan bölüm ile başlamaktadır. Ardından 2 adet aşağı yönlü cıvıltı işaretinin gelmesiyle birlikte;

alıcı devresi, bu andan itibaren kendisine ulaşan işaretlerin gönderilen modüle edilmiş işaret olduğunu anlayacak ve bu işaretleri demodüle edecektir. Bir cıvıltı işaretinin frekans ekseninde kaydırılmasıyla modüle edilmiş işaret oluşmaktadır (Aksoy vd., 2024) Şekil 2.4'te, bir cıvıltı işaretinin istenilen değer doğrultusunda zaman ve frekans ekseninde kaydırılması görülmektedir. Şekil 2.4'te, BW (Bandwidth) bantgenişliğini, SF yayılım faktörünü, S kullanıcı tarafından gönderilmek istenen işaretin değerini göstermektedir. SF8 değerinde bir iletişim sağlandığı için, 8 bitlik veri gönderilecektir. Değeri 91 olan bu veri "01011011" şeklindeki 8 bitlik ikili formatta gönderilecektir (Pasolini, 2022). Şekil 2.4'e göre, cıvıltı işareti bantgenişliği; SF, S sembol değeri ve T_h frekans kayma zamanı bilgilerini içerir. LoRa modülasyonunda, bantgenişliği 125 kHz-250 kHz aralığında, SF 7-12 aralığında ve S değeri 0-(M-1) aralığında değişir. LoRa modülasyonunda M farklı cıvıltı işareti kullanılmaktadır.



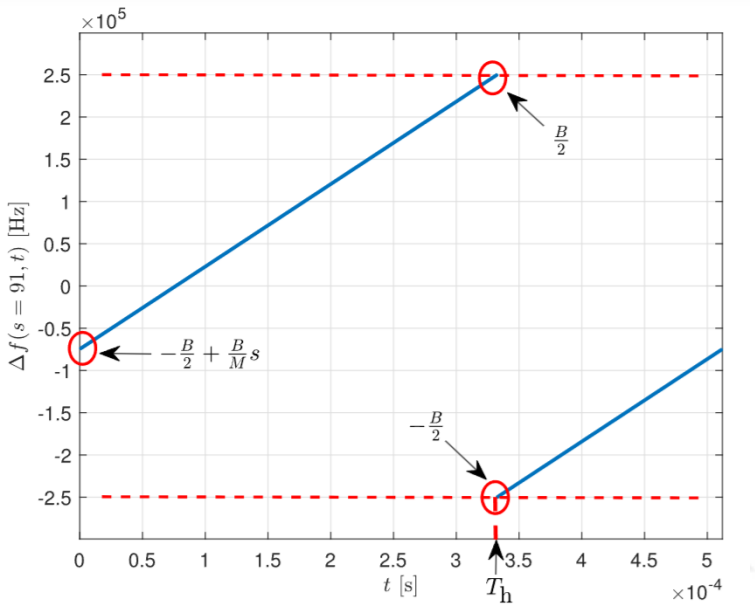
Şekil 2.3. CSS modülasyonu örneği

Şekil 2.4'te, bantgenişliğinin 500 kHz, SF'nin 8 ve S'nin 91 olduğu durum ifade edilmiştir. Buna göre, işaretin periyodu (T_s), Denklem (2.1) ile hesaplanır ve $5{,}12 \times 10^{-4}$ s olarak bulunur (Pasolini, 2022).

$$T_s = \frac{2^{SF}}{B} = \frac{2^{SF}}{f_{max} - f_{min}} = 5{,}12x10^{-4}s \quad (2.1)$$

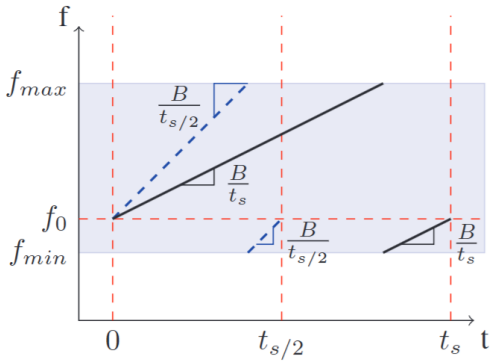
T_h değeri ise Denklem (2.2) ile $3{,}34x10^{-4}\ s$ olarak hesaplanır.

$$T_h = T_s - \frac{T_s}{M}.S = 3{,}34x10^{-4}s \quad (2.2)$$



Şekil 2.4. Cıvıltı işaretinin frekans ekseninde kaydırılması

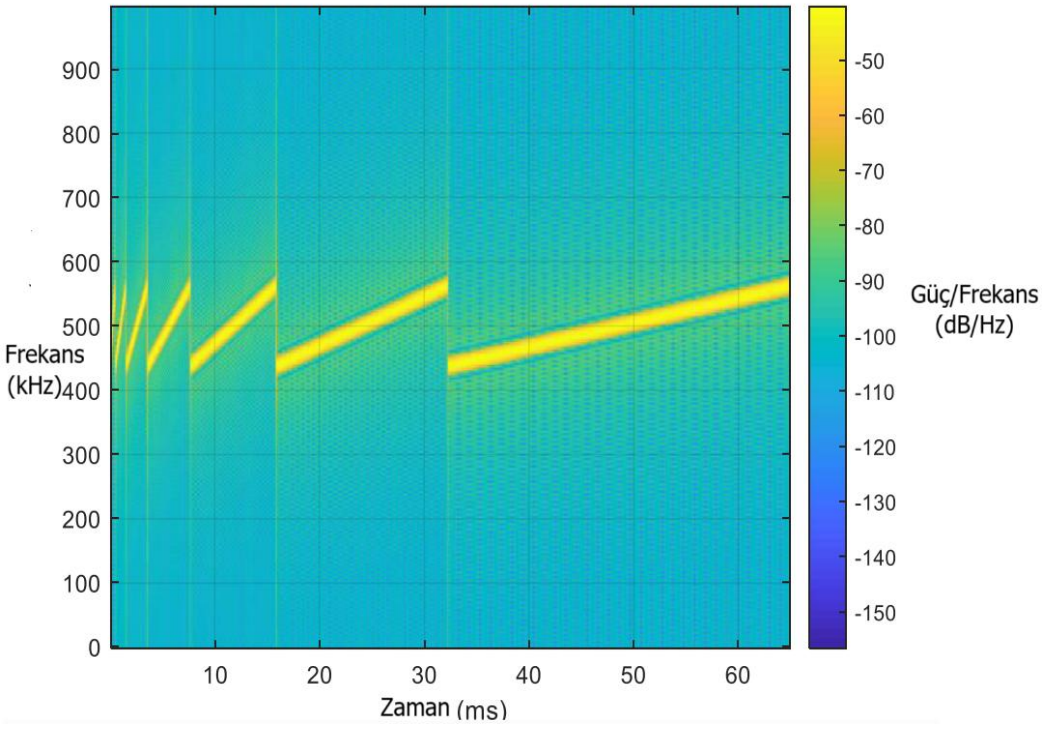
Şekil 2.5'te, bir cıvıltı işaretinin SF değeri ile değişimi gösterilmiştir. SF değerinin artması, cıvıltı işaretinin zaman ekseninde uzunluğunun artmasına neden olmaktadır. Kesikli çizgiler ile gösterilen işaret için SF7 değeri, düz çizgi ile gösterilen işaret için ise SF12 değeri kullanılmıştır. SF, SNR değerleri ve veri kayıp oranları, LoRa haberleşme ağının verimlilik değerlendirmelerinde kullanılmaktadır (Reynders ve Pollin, 2016).



Şekil 2.5. Cıvıltı işaretinin SF değeri ile değişimi

2.2.3. Yayılım Faktörü (SF)

LoRa ağları, SF7 değeri ile SF12 değeri arasında çalışmaktadır. SF, veri iletiminin hızını kontrol eder. Kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan bantgenişliği arttırılarak, kanal kapasitesi arttırılabilir.



Şekil 2.6. Soldan sağa işaretlerin sırasıyla SF7-SF12 değerlerini aldığını gösteren frekans-zaman grafiği

Şekil 2.6'da verilen grafik, aynı bantgenişliğine sahip 6 adet işaretin, SF değerlerinin değişimi ile uğradığı farklılığı göstermektedir. SF değerini arttırmak, işaretin düşük frekans değerinden yüksek frekans değerine ulaşma süresini arttırmaktadır. Bu sayede, aynı mesaj, SF7 değerinde daha kısa sürede iletilirken; SF12 değerinde daha uzun sürede iletilmektedir (Yalçın, 2023). Dolayısıyla LoRa haberleşmesinde işaretin bit hızı, SF ile belirlenir.

Çizelge 2.5'te, SF değerlerine bağlı olarak LoRa haberleşme sistemlerindeki parametrelerin değişimleri gösterilmektedir. SF değerlerinin artması, bir cıvıltı (chirp) işaretini oluşturan chip sayısının artmasına neden olmaktadır. Bu sayede, bir işaretin zaman eksenindeki uzunluğu artacaktır. SF değerlerinin artması, gürültü yoğunluğunun fazla olduğu ortamlarda daha sağlıklı iletişim kurulmasını sağlamaktadır. SF değerleri arttırıldığında, işaretin hızı düşeceği için gönderilen işaret havada daha uzun süre kalacaktır. Daha yüksek SF değeri kullanmak bit hızını azaltacaktır. Her bir SF değeri azalışı, bit hızının yaklaşık 2 katına çıkması demektir (RF Wireless World, 2025).

Çizelge 2.5. 125 kHz bantgenişlikli LoRa kanalında SF, SNR, RSSI ve bit hızı çizelgesi

SF	**Chirp/İşaret (adet)**	**SNR altsınırı (dB)**	**RSSI altsınırı (dBm)**	**Havada kalma süresi (ms) (10 baytlık veri için)**	**Veri Hızı (bps)**
7	128	-7,5	-123	56	5.469
8	256	-10	-126	103	3.125
9	512	-12,5	-129	205	1.758
10	1.024	-15	-132	371	977
11	2.048	-17,5	-133	741	537
12	4.096	-20	-141	1.483	293

2.2.4. LoRa Kanal Yapısı

LoRa kablosuz haberleşme sistemlerinde, mesaj çerçevesi, LoRa işaretinin tanımlanmasında işe yarayan ön cıvıltı işareti ile başlar. LoRa işaretleşme, SF, CR (Coding Rate, CR) ve BW değişkenlerini kullanır. SF, Denklem (2.3) ile hesaplanır.

$$SF = \log_2\left(\frac{R_c}{R_s}\right) \tag{2.3}$$

Denklem (2.3)'te, R_c ve R_s sırasıyla chirp (cıvıltı) hızı ve sembol hızıdır (Kim vd, 2020). SF, sembol başına düşen çip değerini ifade eder ve 7 ile 12 arasında değerler almaktadır. CSS modülasyonu, ortagonal SF değerleri kullanarak farklı iletim veri hızlarını (Data Rate, DR) destekler. Bu sayede, sistemin kurulduğu alana bağlı olarak, sabit bantgenişliği değerinde, iletim mesafesini artırmak veya güç tüketimini optimize etmek için, sistem DR'leri değiştirir (Wu vd., 2021). Sembol hızı (R_s), bit hızı (R_b), SF, ileri hata düzeltimi (Forward Error Correction, FEC) ve BW arasındaki ilişki Denklem (2.4) ve Denklem (2.5) ile verilmiştir.

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \tag{2.4}$$

$$R_{b=}\ BW * R_s * FEC \tag{2.5}$$

Burada FEC, LoRa modeminde frekans girişimi kaynaklı sembol hatalarını önleyici bir hata düzeltme algoritmasıdır. Chirp (cıvıltı) hızı (R_c), Denklem (2.6) ile hesaplanmaktadır.

$$R_c = BW * R_s = \frac{BW^2}{2^{SF}} \tag{2.6}$$

Eğer LoRa kanalındaki BW sabit değerde ise, R_c değeri, SF'ye göre değişir. Her SF için, cıvıltı işaretinin ortagonalliği, interferansı (frekans girişimini) engeller (Bor vd., 2016); eğer iki veya daha fazla verici aynı kanalı kullanırsa, sanal olarak farklı SF değerleri

kullanarak iletim sağlar, böylelikle paketler arasında girişim yaşanmaz (Datasheet Semtech, 2025).

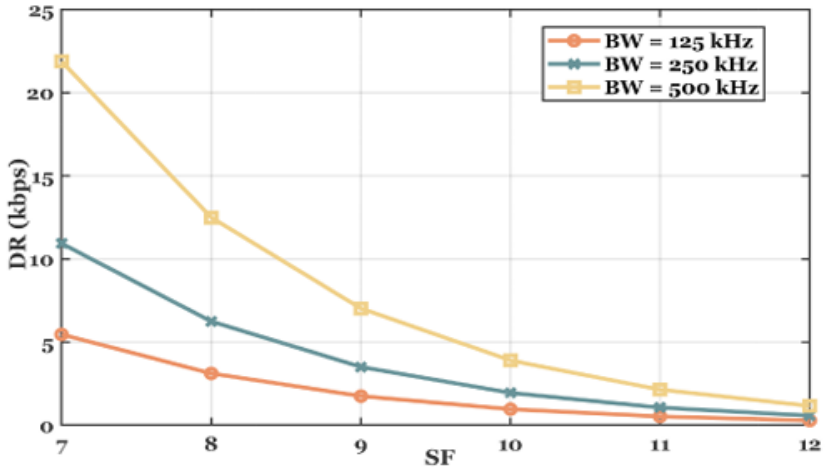
LoRa haberleşmesindeki alıcı hassasiyeti Denklem (2.7) ile hesaplanmaktadır.

$$S = -174 + 10\log(BW) + NF + SNR_{th} \tag{2.7}$$

Denklem (2.7)'de, NF, ilgili donanıma bağlı olarak değişkenlik gösteren gürültü eşiğidir. BW düştükçe, SF artar; dolayısıyla Çizelge 2.5'ten de görülebildiği gibi, alıcı hassasiyeti düşer ve haberleşme mesafesini artırır.

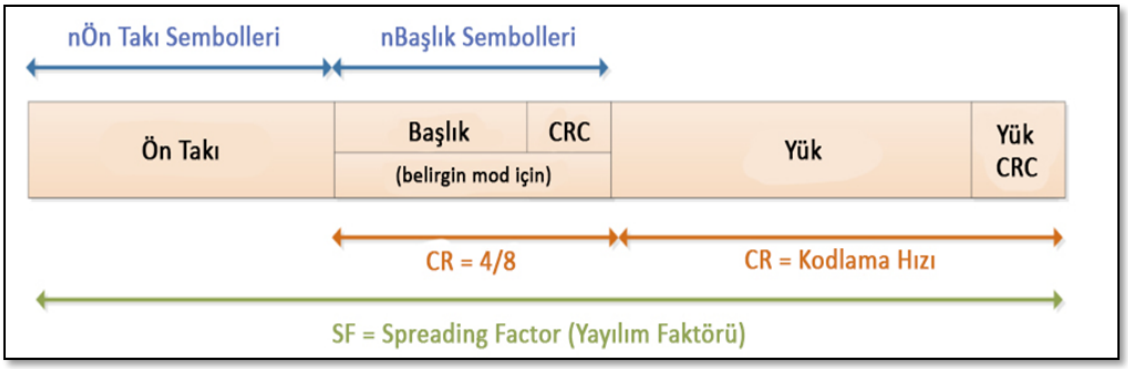
FEC, hata düzeltme bitlerinin (yedek bitler), iletilen verinin içine eklenmesini gerektirir. Her ne kadar FEC veri çıkışını azaltsa da, alıcı hassasiyetini artırır. LoRa, SF'nin 7 ile 12 aralığında değişmesi ile, üzerinde altı adete kadar eşzamanlı iletime izin verebilir. LoRa sinyalleri, kodlama oranını (Coding Rate, CR) uyarlayarak işaret girişimlerine karşı korunur. SF'ye benzer şekilde, daha büyük bir CR değeri, uzun bir paket ve yüksek enerji tüketimi kullanılarak iletilebilir. CR, 4/5, 4/6, 4/7, 4/8 değerlerini alabilir. LoRa'daki DR değeri; CR, SF ve BW kullanılarak Denklem (2.8) ile hesaplanır (Kim vd, 2020).

$$DR = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * CR \tag{2.8}$$



Şekil 2.7. DR ve SF arasındaki ilişki (CR=4/5)

Şekil 2.7, CR değeri sabit iken DR ve SF değerlerini farklı BW değerleri için göstermektedir. Şekil 2.7'ye göre, yüksek BW değeri yüksek DR değerini beraberinde getirirken; yüksek SF değeri, işaretin daha uzun menzile gidecek olması nedeniyle, daha düşük DR ortaya çıkarmaktadır. Şekil 2.8 ise LoRa çerçeve yapısındaki bileşenleri göstermektedir. Öntakı, isteğe bağlı başlık, yük ve döngüsel artıklık kontrolü (Cyclic Redundancy Checksum, CRC) alanı, fiziksel katman (Physical Layer, PHY) paket yapısının bir parçasıdır. Öntakı, alıcıyı verici ile senkronize etmek için gereklidir; toplamda 10 ile 65.536 sembol içerebilir. Öntakının ilk dört sembolü sabittir. Geri kalan semboller ise en az 6 ve en fazla 65532 sembol olacak şekilde programlanabilir. Yük uzunluğu, yük CR'si ve başlık CRC'si, isteğe bağlı başlığa dâhil edilir. Başlığın varlığı, başlık moduna (açık veya örtük) göre belirlenir. Örtük modda, yalnızca yük uzunluğu, CR ve CRC ayarları önceden bilindiğinde veya sabitlendiğinde devre dışı bırakılır. Sonuç olarak, paketin havada kalma süresi azalır. Açık modda, bayt cinsinden yük uzunluğu, yük FEC kodlama oranı ve başlık CRC'sinin tümü başlığa dahil edilir. FEC, başlığı CR'nin 4/8 değeri ile sürekli kullanılarak korur. Yük, LoRaWAN® standartı devreye girdiğinde, ortam erişim kontrol (Medium Access Control, MAC) katmanı bilgilerini de içermektedir (Edward vd., 2020).



Şekil 2.8. LoRa çerçeve yapısı

2.2.5. İşaret Gürültü Oranı (SNR)

İşaret-Gürültü Oranı, tüm haberleşme sistemlerinde alıcı tarafından algılanan sinyalin, aynı ortamda bulunan gürültüye oranla ne kadar güçlü olduğunu gösteren kritik bir

performans göstergesidir. İşaret gücünün gürültü gücüne oranı olarak tanımlanır ve Denklem (2.9) ile hesaplanır. Denklem (2.9)'da, $P_{işaret}$ işaretin gücünü, $P_{gürültü}$ ise iletim hattındaki gürültünün toplam gücünü temsil etmekte olup SNR'nin birimi dB'dir. SNR'nin 0 dB'den büyük değer alması, alınan işaret gücünün ortamdaki gürültü gücünden yüksek olduğunu gösterir (Kim vd, 2020). Ancak, LoRa uygulamalarında, Çizelge 2.5'ten görülebileceği gibi, SNR negatif değer de alsa, işaret, alıcı tarafında anlamlı şekilde işlenebilmektedir. Yüksek SNR değeri, işaretin gürültüye kıyasla daha güçlü olduğu anlamına gelirken, düşük veya negatif SNR değerleri, sinyalin bozulma riski altında olduğunu göstermektedir. LoRa teknolojisinin güçlü CSS modülasyonu sayesinde, SNR değeri negatif olsa dahi, güvenilir veri iletimi mümkün olabilmektedir (Aksoy vd., 2024; da Rocha Santos vd., 2024). LoRa sistemleri, tipik olarak -7,5 dB ile -20 dB alt sınır değerleri arasında değişen SNR eşik değerlerinde çalışabilmektedir. Bu eşik değerleri, SF değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. SF değeri arttıkça, LoRa modülasyonu daha düşük SNR seviyelerinde çalışabilir hale gelir. Örneğin, SF12 için gereken minimum SNR değeri yaklaşık -20 dB iken, SF7 için bu eşik yaklaşık -7,5 dB'dir (RF Wireless World, 2025). LoRa tabanlı sistem benzetimlerinde veya gerçek ortam uygulamalarında, SNR'ın negatif değer alabildiği birçok farklı çalışmadan da görülebilmektedir (Wang vd.,2024; Souli vd., 2024; Bansal 2024; Cotrim vd., 2024; Ting ve Chan, 2024; Mahjoub, 2024).

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_{işaret}}{P_{gürültü}} \tag{2.9}$$

2.2.6. Alınan İşaret Gücü İndeksi (RSSI)

Kablosuz iletişimde RSSI, kablosuz bağlantının kalitesini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Daha yüksek bir RSSI değeri daha güçlü bir sinyali; daha düşük bir değer ise daha zayıf bir sinyali ifade eder. RSSI değeri, genellikle dBm cinsinden ifade edilmekte; ölçüm cihazlarının donanımına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmekte ve Denklem (2.10) ile hesaplanmaktadır (Mahjoub vd., 2024).

$$P_r = P_t + G_r + G_t - L_b \tag{2.10}$$

Denklem (2.10)'da, P_r, RSSI değerini; P_t, anten çıkış gücünü; G_r, alıcı anten kazancını; G_t, gönderici anten kazancını ve L_b, iletim hattındaki toplam kayıpları göstermektedir. L_b içinde hem serbest uzay kaybı hem de diğer kayıplar bulunmakta ve iletim hattının karakteristiğine göre değişiklik gösterebilmektedir. RSSI değeri aşağıdaki etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir:

- Ortamda bulunan fiziksel engeller (binalar, duvarlar)
- Çoklu yol (multipath) etkisi
- Frekans bandı ve kullanılan modülasyon
- Anten tipi ve yönü
- Hava koşulları ve nem oranı

Özellikle iç mekân uygulamalarında, gölgeleme ve yönsüz yansıma etkileri, RSSI değerinde ani düşüşlere neden olabilmektedir. Bu durum, konum belirleme veya ağ kapsama planlamasında hatalara sebep olabilir (Mahjoub vd., 2024). LoRa teknolojisinde RSSI; ağ tasarımı, SF/SNR dengesi, bağlantı kalitesi ve güç optimizasyonu açısından dolaylı ama önemli bir girdi olarak değerlendirilmektedir. Özellikle RSSI eşik değerlerine dayalı adaptif algoritmalar geliştirilmesi, hem veri güvenilirliğini artırmakta hem de cihaz pil ömrünü optimize etmektedir (Aksoy vd., 2024).

2.2.7. LOS Yayılım Modeli

LOS yayılım modeli, kablosuz iletişim sistemlerinde verici ve alıcı arasında herhangi bir fiziksel engel bulunmadığı durumlarda, işaretin ideal koşullarda nasıl yayıldığını tanımlayan temel bir modeldir. Bu model, elektromanyetik dalgaların doğrusal bir yol izlediği ve sönümlenmenin yalnızca mesafeye bağlı olduğu varsayımına dayanır. LOS yayılım modelinde, yol kaybının (Path Loss, PL) hesaplanmasında Denklem (2.11) kullanılır (El Khaled vd., 2020).

$$PL(dB) = 32{,}45 + 20\,log_{10}\,d + 20\,log_{10}\,f_c \tag{2.11}$$

Denklem (2.11)'de,

- PL: Serbest alan yol kaybı (dB)
- d: Verici ile alıcı arasındaki mesafe (km)
- f_c: Taşıyıcı frekans (MHz)
- 32,45: Sabit katsayı (frekans ve mesafe birimleri, sırasıyla, MHz ve km iken) (dB)

olarak belirlenmiştir.

2.2.8. Okumura-Hata Yayılım Modeli

Okumura temel yayılım modeli, Tokyo şehrinde gerçekleştirilen ölçümlere dayanmaktadır (Harinda vd., 2019). Bu modele dayanan Okumura-Hata modeli, çeşitli parametrelerle zenginleştirilmiş bir yol kaybı (PL) denklemi sunar. Özellikle 150 MHz ile 1500 MHz arasındaki frekans aralığı ve 1 km ile 20 km arasındaki mesafe aralığı, bu modelin geçerlilik sınırlarını oluşturmaktadır. Bu modele göre, PL, Denklem (2.12)'de gösterildiği şekilde hesaplanabilir (Harinda vd., 2019).

$$PL\ (dB) = 69{,}55 + 26{,}16\,(log_{10}\,f_c) - 13{,}82\,(log_{10}\,h_b) - a(h_m) + [(44{,}9 - 6{,}55(log_{10}\,h_b))(log_{10}\,d\,)] \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)'deki a parametresi, Denklem (2.13) ile hesaplanır (Harinda vd., 2019).

$$a\ (dB) = [1{,}1(log_{10}\,f_c) - 0{,}7]h_m - [1{,}56(\log_{10}\,f_c) - 0{,}8] \quad (2.13)$$

Denklem (2.12) ve Denklem (2.13)'te,

- *PL:* Yol kaybı (dB)
- f_c: Taşıyıcı frekans (MHz)
- h_b*:* GW anten yüksekliği (m)
- h_m*:* UC anten yüksekliği (m)
- *d:* Verici ile alıcı arası mesafe (km)
- *a:* Mobil anten yüksekliğine göre düzeltme faktörü (şehir tipine göre değişir)

olarak belirlenmiştir. Okumura-Hata modeli, özellikle kentsel ortamlar için oldukça güvenilir tahminler sunan ampirik bir yayılım modelidir. LoRaWAN® gibi düşük güçlü sistemlerin performans analizi ve saha planlaması için hâlen yaygın olarak kullanılmaktadır (Harinda vd., 2019;Ingabire vd., 2020; Bhavanam ve Ragam, 2025).

2.2.9. Cost231-Hata Yayılım Modeli

COST 231-Hata modeli, Hata modeli ile birleştirilerek geliştirilmiş bir başka yayılım modelidir (Milanovic vd., 2007). Bu modelde, frekans aralığı 150 MHz ile 2000 MHz arasında olup, mesafe aralığı ise en fazla 20 km'ye kadar uzanmaktadır. Anten yüksekliği 30 m ile 200 m arasında değişmekte olup, UC yüksekliği ise 1 m ile 10 m aralığındadır. Bu modelde, PL ifadesi Denklem (2.14) ile verilmektedir (Harinda vd., 2019).

$$PL\ (dB) = 46{,}3 + 33{,}9(log_{10}\, f_c) - 13{,}82(log_{10}\, h_b) - a(h_b) + [(44{,}9 - 6{,}55(log_{10}\, h_b))(log_{10}\, d\,)] + \ c_e \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)'te,

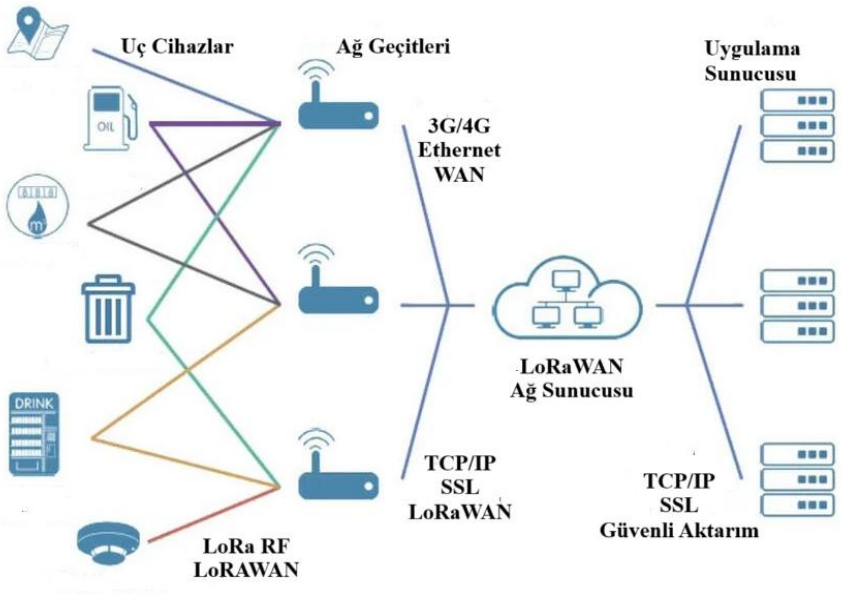
- PL: Yol kaybı (dB)
- f_c: Taşıyıcı frekans (MHz)
- h_b: Baz istasyonu anten yüksekliği (m)
- h_m: Mobil alıcı anten yüksekliği (m)
- d: Verici-alıcı arası mesafe (km)
- a: Mobil alıcı anten düzeltme katsayısı
- c_e: Ortama göre sabit (3 dB büyük şehirlerde; 0 dB kırsal/küçük şehirlerde)

olarak belirlenmiştir. Büyük şehirler için a parametresi; Denklem (2.15) kullanılarak hesaplanabilir (Harinda vd., 2019).

$$a\ (dB) = 3{,}2[log_{10}(11{,}75h_b)]^2 - \ 4{,}97 \quad (2.15)$$

2.2.10. LoRaWAN®

LoRaWAN®, ITU tarafından ITU-T Y.4480 koduyla 2021 yılında uluslararası bir haberleşme standardı olarak tanımlanmıştır (ITU, 2021). Şekil 2.9'da gösterilen mimariye sahip LoRaWAN® haberleşme ağında, farklı işlevlere sahip UC'ler, yukarı yönlü iletimde, mesaj paketlerini LoRa kablosuz arayüzü aracılığıyla GW'ye iletmektedir (LoRa Teknik Yazı, 2025). GW, bu mesaj paketlerini, kablolu veya kablosuz iletim yöntemleri kullanarak, LoRaWAN® ağ sunucusuna ve uygulama sunucusuna aktarır (LoRa Alliance® Applications, 2025). LoRaWAN® ağ sunucuları, kendilerine ulaşan mesaj paketlerini, türlerine göre (katılım, sorgu, uygulama) işler ve gerektiğinde aşağı yönlü bir yanıt oluşturarak sisteme iletir. LoRaWAN® ağındaki UC'ler, donanım takibi, su sayacı takibi, hayvan takibi, sağlık verisi takibi vb. uygulamalar için kullanılabilmektedir (Alipio ve Bures, 2024). LoRaWAN® ağında, A, B ve C sınıfı olmak üzere, üç tür UC bulunmaktadır (Alipio ve Bures, 2024).



Şekil 2.9. LoRaWAN® ağ mimarisi

LoRaWAN® haberleşme protokolünde, LoRa fiziksel katmanının kullanılmasından dolayı, performans ölçüm parametrelerinden SF, SNR ve RSSI oldukça önemlidir. LoRaWAN® ağ sunucusu, UC mesajlarındaki SF, SNR ve RSSI parametrelerini de kayıt

altına alır. Bunun yanı sıra, pil/enerji verimliliği; IoT cihazlar için önemli olup LoRaWAN® cihazların, pille çalışırken, genellikle uzun süre çalışması beklenir. Pil ömrü; ağın enerji tüketimini en aza indirme ve cihazın çalışma ömrünü en üst düzeye çıkarma konusundaki verimliliğini değerlendirmek için önemli bir metriktir. ToA; bir LoRaWAN® iletiminde, verinin kablosuz ortamdaki gönderim süresini ifade etmekte olup pil ömrünü ve ağ kapasitesini etkiler. Gecikme; bir paketin cihazdan GW'ye veya GW'den cihaza gitmesi için geçen süreyi ifade eder. Düşük gecikme, gerçek zamanlı veya zaman açısından kritik uygulamalar için gereklidir. Doğruluk; LoRaWAN® ağı içindeki bir UC'nin coğrafi konumunu belirlemedeki hassasiyet açısından kritik bir faktördür (Alipio ve Bures, 2024). LoRaWAN® ağ yapılarının kullanım avantajları özetle şöyledir (LoRa Alliance® Applications, 2025):

Uzun Mesafe (Menzil): Tek bir LoRa GW ile kırsal alanda 15 km'ye kadar mesafede haberleşme sağlanabilmektedir. Yoğun yerleşimin bulunduğu kentsel ortamlarda, yerleşim sıklığı, penetrasyon oranı ve UC'lerin iç mekânda ne kadar derine yerleştirildiğine bağlı olarak işaretin menzili değişkenlik göstermektedir.

Uzun Pil Ömrü: Veri paketlerinin çok küçük olması ve günde yalnızca birkaç kez (talebe göre değişebilir) iletilmesi göz önüne alındığında; bir veri paketini iletmek için gereken enerji miktarı oldukça azdır. Ayrıca, UC'ler uykudayken, güç tüketimi mW mertebesinde ölçülmekte ve bu sayede bir cihazın pilinin uzun yıllar dayanması sağlanmaktadır.

Yüksek Kapasite: Bir LoRaWAN® ağı milyonlarca mesajı destekleyebilmektedir. Ancak, herhangi bir dağıtımda desteklenen mesajların sayısı, kurulu ağ geçitlerinin sayısına, veri büyüklüğüne ve UC'nin gönderim sıklığına bağlıdır.

Düşük Maliyet: LoRaWAN® teknolojisi göz önüne alındığında; çok sayıda UC'ye hizmet etmek için yalnızca bir yıldız ağında yapılandırılmış birkaç GW gerekir. Bu, sermaye ve işletme giderlerinin nispeten düşük tutulabileceği anlamına gelmektedir.

Coğrafi Konum: Küresel konum belirleme sistemi (Global Positioning System, GPS) kullanmayan konum izleme uygulamaları hizmetini, düşük güç tüketimi ile

sunabilmektedir. Herhangi bir LoRa cihazını pasif olarak bulmak için, ağ, üç nokta yöntemini kullanır.

FUOTA: LoRaWAN® bağlantılı cihazlar için havadan yazılım güncelleme (Firmware Update Over The Air, FUOTA) özelliği, birden fazla bağlı cihazın yazılım güncellemesini uzaktan sağlayarak bakım yükünü azaltır.

Güvenlik: Uçtan uca AES128 şifrelemesi kullanır. Karşılıklı kimlik doğrulaması sayesinde bütünlük koruması ve gizliliğe sahiptir.

ADR: LoRaWAN®, ağ yoğunluğuna, cihaz konumuna ve kanal kalitesine bağlı olarak, ADR mekanizmasıyla veri hızını ve yayılma faktörünü otomatik olarak ayarlayabilir. Bu sayede hem enerji tüketimi optimize edilir hem de ağ kapasitesi dengelenir (Pham vd., 2020). ADR sayesinde uzak cihazlara daha düşük veri hızı ve yüksek SF atanırken; yakın cihazlar için daha hızlı ve düşük SF tercih edilebilir. Böylece, ağda eşzamanlı veri iletimi ve uygulama güvenilirliği artırılmış olur (Aksoy vd., 2024).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Doktora tezinde, bina içi, bina içi+bina dışı (karma) ortamlarda kurulu LoRaWAN ağlarında, SF, SNR, RSSI parametrelerini ve paket kayıplarını dikkate alan performans analizleri ile istatistiksel analizler yapılmış; performans parametreleri arasındaki ilişkisel analiz; MATLAB® ve CloudRF® benzetim araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

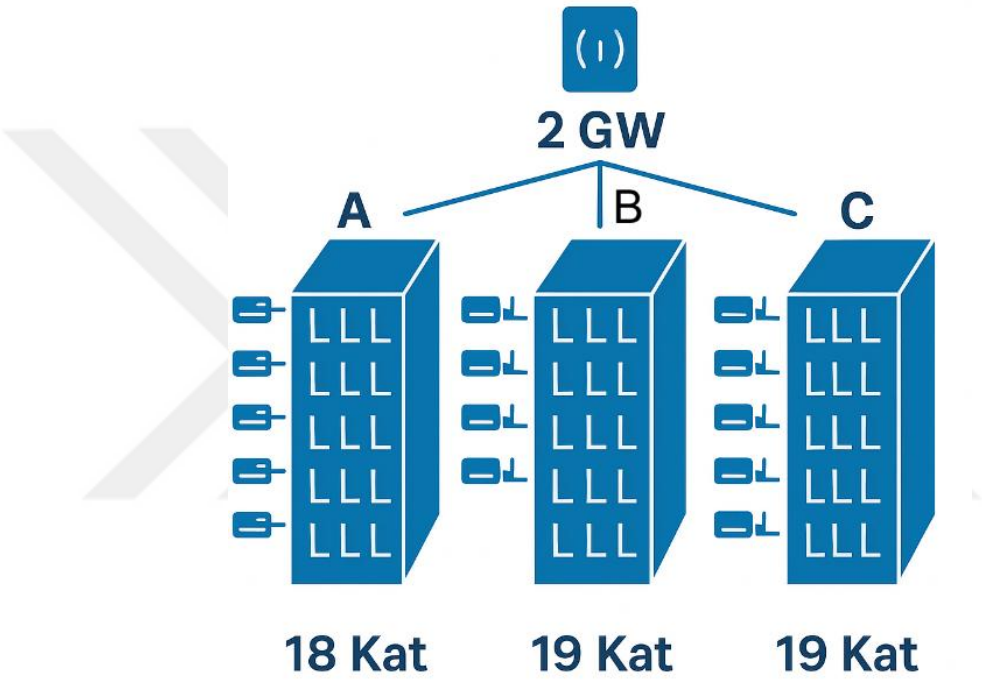
Tez çalışmasının ilk bölümünde, çok katlı bir binada iç ortamda kurulu LoRaWAN® ağının performansı analiz edilmiştir. İkinci bölümde, bir binadaki iç ortam LoRaWAN® ağından elde edilen ölçüm verileri üzerinde MATLAB® aracılığıyla eğri uydurma yöntemleri kullanılarak; SF, SNR ve RSSI arasındaki üçlü ilişki bağıntılarına ulaşılmıştır. Tezin son aşamasında, Bursa şehir merkezinde, bina içi+bina dışı (karma) ortamlarda kurulu LoRaWAN® ağından elde edilen ölçüm sonuçları, CloudRF® benzetim aracından elde edilen benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

3.1. Bina İçi Ortam LoRaWAN® Ağları

3.1.1. Çok Katlı Binada LoRaWAN® Ağ Performans Analizleri

Bu çalışma iki aşamadan oluşup, ilk aşamasında, 18-19 katlı bina bloklarına konuşlandırılan LoRaWAN® ağında gerçekleştirilen ölçümlerin karşılaştırmalı analizine ve yorumlanmasına odaklanılmıştır. Ağdaki UC'ler, LoRaWAN® özellikli su sayaçları olup; üç ayrı apartman bloğuna (A Blok, B Blok ve C Blok), aynı blok üzerine (B Blok) montajlanan iki GW ile birlikte kurulmuştur. Araştırma alanına toplamda 232 adet LoRaWAN® özellikli su sayacı yerleştirilmiştir. Her kattan rastgele bir su sayacı seçilmiş ve 56 sayaçtan meydana gelen bir örnek kümesi oluşturulmuştur. Ağ konfigürasyonu nedeniyle, her UC, LoRaWAN® A Sınıfı cihaz özelliklerine sahiptir ve saatlik olarak GW'ye mesaj gönderecek şekilde programlanmıştır. LoRa GW'ler, B Blok'un çatısına kurulmuştur. Şekil 3.1'de, LoRaWAN® ağının şematik gösterimi verilmiştir. İlgili LoRaWAN® ağı, 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 olmak üzere tüm olası SF değerlerini kullanabilecek şekilde, ADR özelliği aktif olarak tasarlanmıştır (Yıldız ve Karlık, 2021).

Her apartman bloğu için, RSSI, SNR, SF değerleri ve periyodik mesaj sayısı analiz edilmiştir. SNR ve RSSI analizlerinde, ortalama SNR ve RSSI değerlerine odaklanılmış; tüm bloklar için, bu ortalama değerlerden daha iyi RSSI ve SNR değerlerine sahip olan UC sayıları belirlenmiştir. Üç blok için, ortalama SNR ve RSSI değerleri, 70 günlük bir süre boyunca hesaplanmıştır. Ayrıca, her blok için önceden tanımlanmış SF numaralarıyla, SF kullanım süreleri eşleştirilmiştir. Her bir UC tarafından gönderilen mesaj sayısı hesaplanmış ve bir mesaj başarı oranı tablosu oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. LoRaWAN® ağının şematik gösterimi

Çalışmanın ikinci aşamasında, mevcut ağ yapısı korunarak, Şekil 3.1'de A Blok olarak belirtilen yapıda 1., 6., 12. ve 18. katlardaki bulunan UC'lerden rastgele seçim yapılarak, ilgili UC'lerin ağda kayıtlı değerleri incelenmiş; ayrıca Şekil 3.1 ile şematik gösterimi verilen binada kurulu ağda, A Blok'ta, 1., 6., 12., 18. katlarda AFTD ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her katta AFTD ile gerçekleştirilen ölçüm sayısı 10'dur. UC'ler, Şekil 3.2'de görüldüğü üzere, binanın asansör bloğu şaftına yerleştirilmiş olup, B Blok çatısındaki GW'lere orantılı mesafelerde konumlandırılmıştır. Binanın yapısal özellikleri, (beton kalınlığı, çelik ve ahşap yoğunlukları, vb.) tüm katlarda benzerdir. Yukarıda

belirtilen katlarda konumlandırılmış UC'lerden elde edilen performans parametrelerine ait bir günlük ölçüm sonuçları, (RSSI ve SNR değerleri), aynı katlardan AFTD ile elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

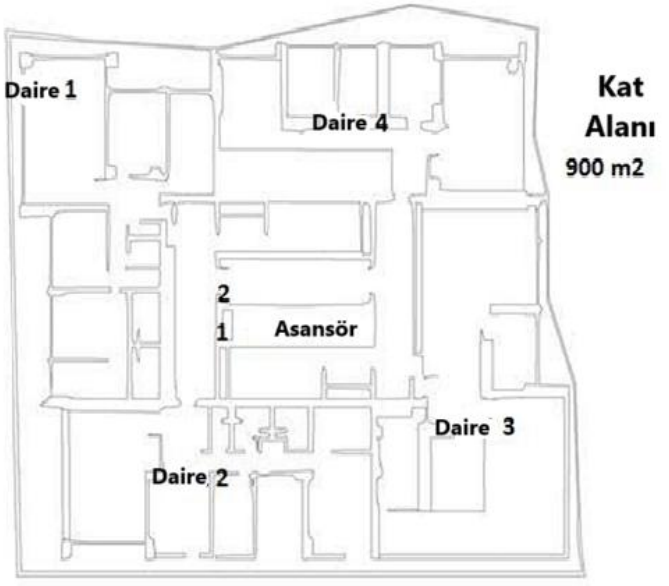


Şekil 3.2. Binanın asansör şaftına yerleştirilmiş UC (su sayacı)

LoRaWAN® UC'nin kurulu olduğu ve AFTD ile ölçümlerin yapıldığı örnek bir katın şematik gösterimi Şekil 3.3 ile verilmiştir. Asansör şaftındaki 1 numaralı nokta, LoRaWAN® UC'nin, yani su sayacının konumunu; 2 numaralı nokta ise AFTD ile ölçümlerin yapıldığı konumu temsil etmektedir. 18., 12., 6. ve 1. katlardaki UC'ler ile çatıdaki GW arasındaki mesafeler sırasıyla 7,07 m; 23,5 m; 41,3 m ve 56,2 m'dir.

Her kat toplamda 900 m² kapalı alana sahiptir ve 4 daire içermektedir. Tüm katların planları aynıdır. Dairelerin dolu olması nedeniyle, ölçümler UC'lere en yakın, dairelerin dışında kalan ve maksimum 1 m mesafedeki noktalarda yapılmıştır. Bu tercih, konut dokunulmazlığı ilkesine uyma amacını taşımaktadır. Ölçüm alanının bulunduğu kattaki yapı malzemeleri beton, ahşap kapılar ve asansör şaftından oluşmaktadır. Çalışmanın bu safhasında, 1., 6., 12. ve 18. katlarda bulunan UC'lerin performans verileri analiz edilmiş; analizlerde RSSI ve SNR parametrelerine odaklanmıştır. LoRa-CSS modülasyonu ile iletilen veri paketleri, su sayaçlarına ait tüketim verilerini içermektedir ve güvenlik

nedenlerinden dolayı paket detaylarına erişilememektedir. Ölçümler, öncelikle GW'ye en yakın kat olan 18. katta, ardından sırasıyla, 12., 6. ve 1. katlarda gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, her katta UC'den GW'ye başarıyla iletilen UL veri paketleri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.3. LoRaWAN® UC'nin kurulu olduğu örnek bir katın şematik gösterimi

Araştırma süresince kullanılan GW, Çizelge 3.1 ile gösterilen radyo sinyal iletim özellikleriyle, LoRaWAN® standartlarını karşılamaktadır. Ölçüm verileri, AFTD'nin masaüstü yazılım uygulaması aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve dijital ortamda işlenerek ilgili çizelge ve grafikler oluşturulmuştur. AFTD ile gerçekleştirilen saha testleri, UC ölçümlerinde kullanılan aynı yöntemle, 4 farklı katta, yani 18. kat, 12. kat, 6. kat ve 1. kat, gerçekleştirilmiştir.

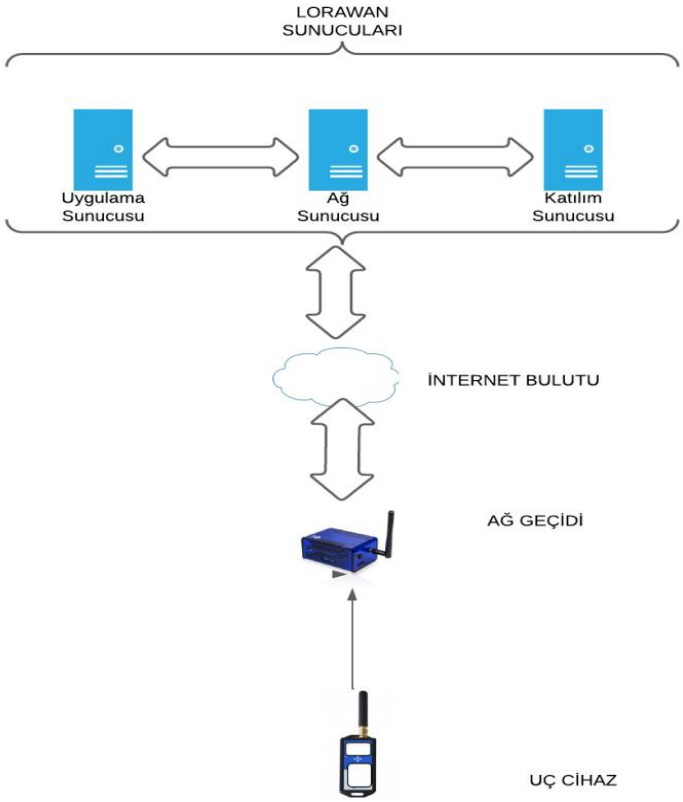
Çizelge 3.1. GW için radyo sinyali iletim parametre değerleri ve kullanılan anten tipi

Parametre	**Değer/Tip**
Anten Kazancı	4.5 dBi
Anten Tipi	Çok Yönlü (omni)
İletim gücü	14 dBm
Frekans bandı	868 MHz

Test ortamında UC'ler ve GW arasında, radyo sinyali iletimi için NLoS koşullar mevcuttur. Ağ performansı gözlemlenmiş, RSSI ve SNR parametrelerine göre değerlendirmeler yapılmıştır.

3.1.2. Bina İçi LoRaWAN® Ağında Veri Analizleri

Şekil 3.4'te gösterildiği üzere, bina içi ortamda, bir adet GW ve bir adet UC kullanılarak kurulan LoRaWAN® ağı üzerinde, SF, RSSI, SNR performans parametreleri ile paket kaybı değerleri incelenmiştir. Testlerin gerçekleştirilmesi amacıyla kurulan sistem bileşeni, Şekil 3.5'te sunulan LoRaWAN® UC'den oluşmaktadır. LoRaWAN® UC ile GW, aynı binanın aynı katında konumlandırılmıştır. UC, belirli periyodik aralıklarla, LoRa kablosuz arayüzü aracılığıyla, GW'ye yukarı yönde mesaj paketleri göndermektedir. GW ise, kablosuz internet bağlantısı üzerinden bulutta çalışan ağ sunucularına erişmekte ve bu sayede uçtan uca ağ yapısı tamamlanmaktadır.



Şekil 3.4. Kurulan LoRaWAN® ağ mimarisinin hiyerarşik gösterimi

UC, GW ve diğer sistem parametreleri, bulut tabanlı sunucu sistemlerinde tanımlanmıştır. Kurulumun ardından, sistem tarafından üretilen ve ağ sunucusu tarafından kayıt altına alınan SF, SNR, RSSI ölçüm değerleri ile paket iletim sayıları belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan veri seti, söz konusu LoRaWAN® ağı üzerinden elde edilen sistem kayıtlarına dayanmaktadır.



Şekil 3.5. Ağda kullanılan LoRaWAN® UC

Ağda kullanılan UC'ye ait teknik özellikler, Çizelge 3.2 ile sunulmuştur (Datasheet Skymot1, 2021; Datasheet Microchip, 2021). GW, RAK Wireless markasına ait, Şekil 3.6'da gösterilen cihaz olup; teknik özellikleri Çizelge 3.3'te ayrıntılı şekilde verilmiştir (Datasheet RAK Wireless, 2025). Ağ sunucusu olarak Thingsboard altyapısı kullanılmıştır (Thingsboard, 2025).

Çizelge 3.2. LoRaWAN® UC teknik özellikleri

Özellik	**Açıklama**
LoRaWAN® versiyonu	LoRaWAN® 1.0.2 – Sınıf A
LoRaWAN® çıkış gücü	14 dBm (maksimum)
LoRaWAN® alıcı hassasiyeti	-146 dBm (minimum)
Pil ömrü	3 yıl
Çalışma sıcaklıkları	-40° C / - 80° C
Boyutlar	35 x 85 x 33 mm
Frekans	EU868 MHz

Çizelge 3.3. LoRaWAN GW teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
LoRaWAN® versiyonu	LoRaWAN® 1.0.2 – Sınıf A
LoRaWAN® çıkış gücü	27 dBm (maksimum)
LoRaWAN® alıcı hassasiyeti	-142 dBm (minimum)
Besleme değerleri	DC 5V / 2.5 A
Çalışma sıcaklıkları	-10° C - 65° C
Boyutlar	66 x 96 x 47 mm
Frekans	EU868 MHz

LoRaWAN® UC'nin kurulumuna ait fotoğraf Şekil 3.7'de sunulmuştur. Bina içinde kurulan LoRaWAN® ağı üzerinden 67 gün boyunca elde edilen veriler kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.6. Kullanılan LoRaWAN® GW

Kaydedilen veriler analiz edilerek, aralarındaki ilişkiler, MATLAB® Eğri Uydurma Aracı (Curve Fitting Tool) kullanılarak incelenmiştir. Bu araç, birden fazla değişken arasındaki ilişkileri formüle etmeye olanak tanıyan güçlü bir analiz aracıdır. Veri analizi

ve işleme, aday modellerin karşılaştırılması, aykırı değerlerin tespiti ve çıkarılması gibi işlemleri destekler.



Şekil 3.7. Ağda kullanılan LoRaWAN® UC'nin kurulumu

Sağlanan doğrusal ve doğrusal olmayan model kitaplığı aracılığıyla, regresyon analizi yapılabilir ya da özel denklemler tanımlanabilir. Ayrıca, parametrik olmayan modelleme teknikleri olan spline, interpolasyon ve yumuşatma yöntemlerini de desteklemektedir. Uyum oluşturulduktan sonra, çizim, interpolasyon ve ekstrapolasyon gibi işlemler ile güven aralıklarının tahmini gibi son işlem adımları gerçekleştirilebilir (Matlab Help Center Curve, 2025). Bu çalışma kapsamında, UC'ye ait veriler, MATLAB® Eğri Uydurma Aracı kullanılarak analiz edilmiştir. Çizelge 3.4'te, söz konusu araçta yer alan uyum iyiliği (Goodness of Fit, GoF) parametreleri ve bunlara ilişkin açıklamalar sunulmuştur (Matlab Help Center Goodness, 2025). RMSE, n adet skaler gözlem içeren gerçek değer dizisi A ile, buna karşılık gelen tahmin dizisi F arasındaki farkı ölçmek amacıyla kullanılır ve Denklem (3.1) ile ifade edilmektedir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |A_i - F_i|^2} \tag{3.1}$$

RMSE için en ideal değer 0'dır. Elde edilen sonuç bu değere ne kadar yakınsa, veri seti ile eğri arasındaki uyum o ölçüde yüksek kabul edilir (Matlab Help Center Goodness, 2025).

R^2 ve Adj-R^2: R^2 ve Düzeltilmiş R^2 (Adj-R^2) değerleri, model uyumunun istatistiksel geçerliliğini değerlendirmede kullanılır ve modelin, verilerin varyasyonunu ne ölçüde açıkladığını gösterir. Başka bir ifadeyle, R^2, gözlemlenen değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki korelasyon katsayısının karesidir. Aynı zamanda çoklu korelasyon katsayısının karesi veya belirleme katsayısı olarak da adlandırılır. R^2, regresyonun kareler toplamının (Sum of Squares of Regression, SSR), toplam kareler toplamına (Total Sum of Squares, SST veya TSS) oranı şeklinde tanımlanır ve Denklem (3.2) ile ifade edilmektedir (Matlab Help Center Evaluating goodness of fit, 2025).

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \tag{3.2}$$

SSR, Denklem (3.3) ile hesaplanır:

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} w_i \ (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \tag{3.3}$$

Denklem (3.3)'te, w_i, i. ağırlık katsayısı; $\hat{y}_i$, i. tahmin edilen değer ve $\bar{y}$ gözlenen değerlerin ortalamasıdır. SST, Denklem (3.4) ile hesaplanmaktadır (Matlab Help Center RMSE, 2025).

$$SST = \sum_{i=1}^{n} w_i \ (y_i - \bar{y})^2 \tag{3.4}$$

Denklem (3.4)'te, y_i, i. gözlenen değerdir (RMSE, 2025).

SSE, Denklem (3.5) ile ifade edilmektedir.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} w_i \ (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{3.5}$$

SSE değerinin 0'a yakın olması (dolayısıyla R^2'nin 1 değerine yaklaşması), hatanın az ve uyum iyiliğinin yüksek olduğu anlamını taşır. Adj-R^2, Denklem (3.6) ile hesaplanır (Matlab Help Center RMSE, 2025).

$$R^2{}_{adj} = 1\text{-}\left(\frac{n-1}{n-p}\right)\frac{SSE}{SST} \tag{3.6}$$

Denklem (3.6)'da, *n* gözlem sayısı ve *p* regresyon katsayısı değeridir. Örneğin, doğrusal bir uyum için p değeri 2'dir. Adj-R^2, 0 ile 1 arasında değer alabilir. Adj-R^2 değeri 1'e ne kadar yakın ise uyum o kadar iyidir (Matlab Help Center RMSE, 2025).

Çizelge 3.4. MATLAB® eğri uydurma aracının uyum iyiliği parametreleri

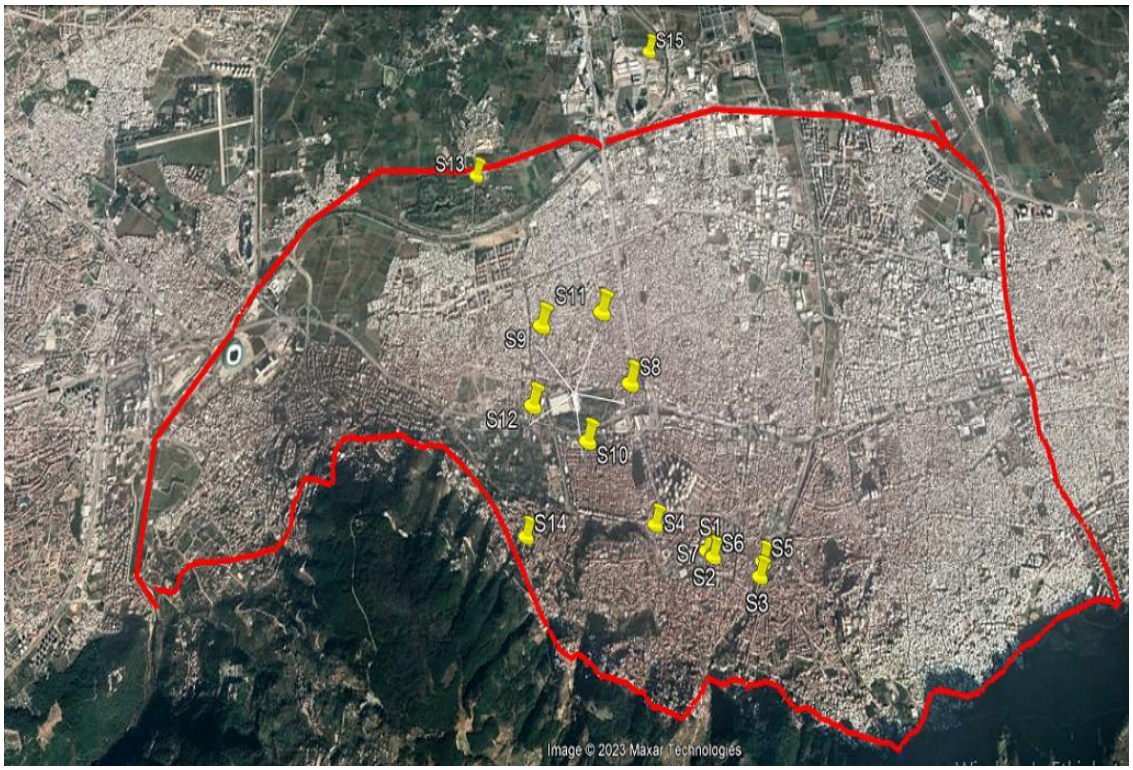
Parametre	**Açılımı**
RMSE	Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error)
R^2	R-Kare (R-Square)
Adj-R^2	Düzeltilmiş R-Kare (Adjusted R-Square)
SSE	Karesel Hataların Toplamı (Sum of Squared Errors)

Bu çalışmanın akabinde yapılanlar, farklı bir bina içi LoRaWAN® ağında gerçekleştirilen ağ tasarımının ardından test cihazı ile elde edilen ölçümleri ve yapay zekâ destekli veri üretimini kapsamaktadır. Bu doğrultuda, ağın kurulu olduğu kat içerisinde dört ana nokta belirlenmiş ve her bir noktada 20 farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Adeunis marka saha ölçüm cihazı kullanılarak alınmıştır. Elde edilen nokta tabanlı 80 veri, sırasıyla 200, 500 ve 1.000 veriye artırılarak genişletilmiştir. LoRaWAN® için kritik öneme sahip olan üç temel parametre — SF, SNR ve RSSI — ile paket kayıp oranları bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

3.2. Bina İçi ve Bina Dışı (Karma) Ortam LoRaWAN® Ağında Ölçümler ve Benzetimler ile Performans Analizi

Bu araştırma kapsamında, Bursa şehir merkezinde yaklaşık 50 km²'lik bir test alanında, Şekil 3.8'de harita üzerinde gösterildiği gibi, 15 adet UC kurulmuştur. Kurulan tüm UC'ler, LoRaWAN® protokolleri ile uyumludur. Böylece, uçtan uca bir LoRaWAN® ağı tesis edilmiştir. Ağ içerisindeki UC'lere ait sinyal verileri kaydedilmiş; araştırmanın ilk aşamasında RSSI ve SNR ölçüm sonuçları analiz edilmiştir.

Söz konusu LoRaWAN® ağı 41 gün boyunca aktif olarak çalışmış ve toplamda 88.560 mesaj üretmiştir. Tüm ölçüm düzeneği parametreleri ve düğüm yapılandırma detayları, Bölüm 3.2.1'de sunulmuştur.

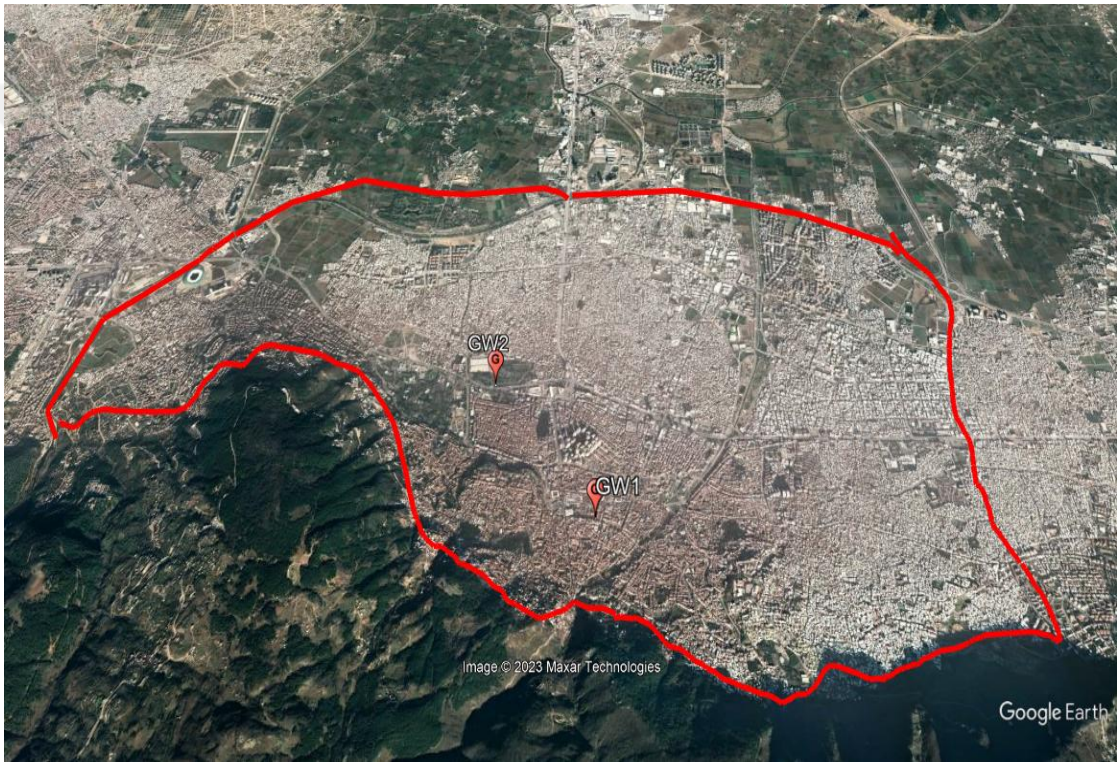


Şekil 3.8. Test alanı sınırları (kırmızı çizgi) ve UC kurulumlarının yerleri

Araştırmanın ikinci aşamasında, Bölüm 3.2.2'de açıklandığı üzere, aynı coğrafi alanda CloudRF® benzetim programı kullanılarak, aynı ağın benzetimleri yapılmış; ölçüm sonuçları ile benzetim verilerinin karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Benzetim aracının teknik özellikleri nedeniyle, araştırma süresince yalnızca RSSI değerleri, 2. Bölüm'de açıklanan yayılım modelleri yardımıyla harita üzerinde hesaplanmıştır. CloudRF®, 2 MHz–100 GHz frekans aralığında çalışan tüm radyo iletişim teknolojileri için uygun bir benzetim aracı olup ve LoRa, LTE, 4G, 5G gibi özel teknolojilerin modellenmesi için kullanılabilmektedir (CloudRF®, 2025). Bu araştırmanın temel amacı, izole laboratuvar koşulları yerine, gerçek kablosuz trafik ortamında, kentsel bir bölgede, LoRaWAN® sinyal performansının analizini ölçümler ve benzetimlerle karşılaştırmalı olarak gerçekleştirmektir.

3.2.1. Ağ Kurulumu, Düğüm Parametreleri ve Ölçümler

Şekil 3.9, test alanı sınırlarını ve GW kurulum yerlerini göstermektedir. Test alanı, kentsel nüfus yoğunluğu ve yol erişilebilirliği dikkate alınarak tanımlanmıştır. Ağda, çevresel ve tarımsal amaçlı ölçümler ile park yeri, nem, sıcaklık, bina eğimi ölçümleri vb. için kullanılan 15 adet UC bulunmaktadır. Bunlar iç veya dış mekânda konumlandırılmıştır. UC konumları rastgele seçilmiştir; ancak UC15 cihazı hariç hepsi test alanı içerisindedir.



Şekil 3.9. Test alanı sınırları (kırmızı çizgi) ve GW kurulum yerleri

Çizelge 3.5, kurulu ağdaki cihazları ve kurulum parametrelerini göstermektedir. UC'ler Microchip RN2483 alıcı-verici modüllerini, GW'ler ise SX1257 veya SX1301 alıcı-verici modüllerini kullanmaktadır. Bu modüllerin RSSI ve SNR alt sınırları, Çizelge 3.6'da verilmiştir. Kerlink GW ürün veri sayfasına (Datasheet Kerlink, 2025) göre, ağ geçitlerinde iki farklı türde alıcı-verici yonga seti seçilebilmektedir. Bu nedenle, her iki yonga seti türüne ait bilgiler Çizelge 3.5'te sunulmuştur. Trafik UC tarafından oluşturulduğu için, T_x gücü UC'nin maksimum iletim gücünü temsil eder. Ağ, EU868

frekans planına ve 125 kHz bantgenişliğine sahip 8 kanala dayanmaktadır. UC konumlarının GW'ye olan mesafeleri farklı olduğundan; SF sabit olmayıp değişmektedir. UC ve GW anten türleri ile kazançları aynıdır.

Çizelge 3.5. Ağ ölçümlerinde kullanılan cihazlar ve parametreleri

Cihaz/Parametre	**Markası/Değeri**
UC	Microchip RN2483
GW	KERLINK Wirnet Station 868 (SX1257, SX1301)
İletim Gücü	14 dBm
Frekans	868 MHz (8 kanal)
BW	125 kHz
UC anteni	3 dBi, çok yönlü
GW anteni	3 dBi, çok yönlü
UC alıcı hassasiyeti	-146 dBm (SF12 ile)
GW alıcı hassasiyeti	-141 dBm (SF12 ile)
SF	SF7-SF12 (uyarlanabilir)
CR	4/5
Trafik	UL
UC anten yüksekliği	Çizelge 3.7 ile verildi
GW anten yüksekliği	Çizelge 3.7 ile verildi

Ayrıca, Çizelge 3.5'te belirtilen hassasiyet, SF'nin 7 ile 12 arasında değişebildiği durumda, minimum değer olan SF12 için RSSI alt sınırını ifade etmektedir. CR, her 4 faydalı bitin 5 bit ile kodlanması anlamına geldiği için önemlidir. CR küçük olduğunda (en küçüğü 4/8), paket iletimi havada daha fazla zaman alır. Bu ağda, UC'ler mesajlaşmayı başlattığı için, trafik yukarı bağlantı modundadır. UC ve GW anten yükseklikleri fiziksel kurulumlarla ilgilidir. Diğer parametreler, ürünlerin iç sistemleriyle

ilgili olduğundan, yalnızca anten yükseklikleri manuel olarak tanımlanabilir.

Çizelge 3.6. RSSI ve SNR alt sınır değerleri

SF	RSSI (dBm)	SNR (dB)
7	-123	-7,5
8	-126	-10
9	-129	-12,5
10	-132	-15
11	-133	-17,5
12	-141	-20

Çizelge 3.7. GW'lerin ve UC'lerin konum özellikleri ve kurulum yükseklikleri

Cihaz (UC/GW)	Konum Özellikleri	Kurulum Yükseliği
GW1	Dışortam/Çatı	$h_{GW} = 20$ m
GW2	Dışortam/Çatı	$h_{GW} = 40$ m
UC1	İçortam/Ofis, apartman, duvar ve koridorlar	$h_{UC} = [4 - 6]$ m
UC2	İçortam/Ofis, apartman, duvar ve koridorlar	$h_{UC} = [4 - 6]$ m
UC3	Dışortam/ Bina dış yüzeyi	$h_{UC} = [3 - 5]$ m
UC4	Dışortam/ Kule tepesi	$h_{UC} = [30 - 33]$ m

Çizelge 3.7. GW'lerin ve UC'lerin konum özellikleri ve kurulum yükseklikleri (devam)

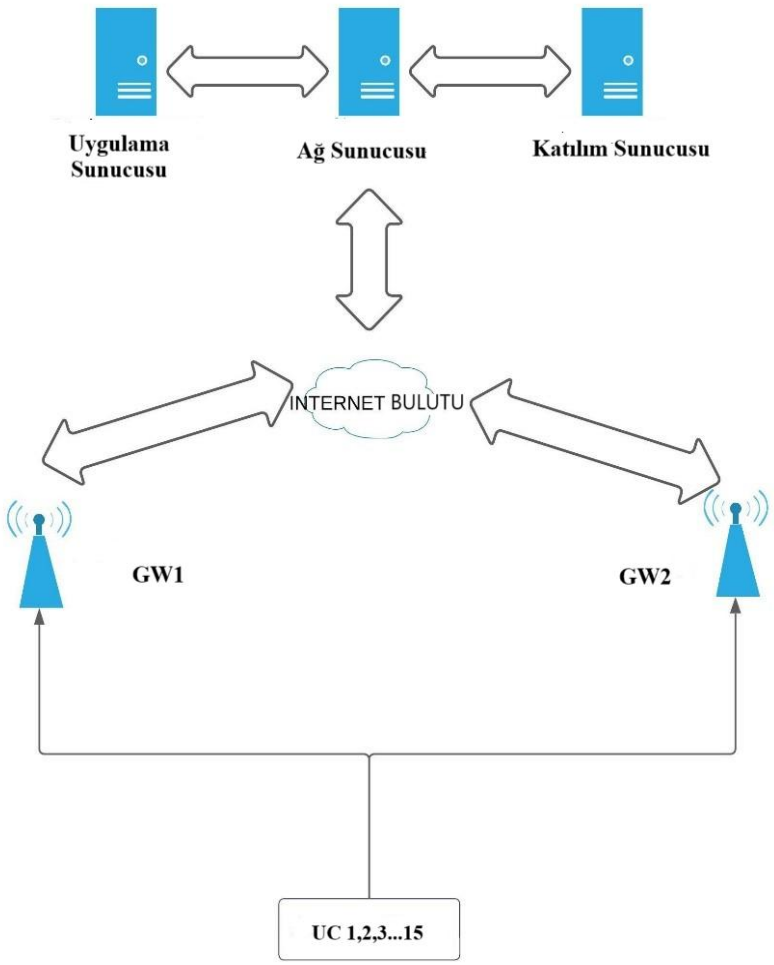
UC5	İçortam/ Köprü	$h_{UC} = [10 - 12]$ m
UC6	Dışortam/ Bina dış yüzeyi	$h_{UC} = [4 - 6]$ m
UC7	İçortam/Bina	$h_{UC} = [4 - 6]$ m
UC8	İçortam/Kongre Salonu	$h_{UC} = [8 - 10]$ m
UC9	İçortam/Kongre Salonu	$h_{UC} = [8 - 10]$ m
UC10	İçortam/Kongre Salonu	$h_{UC} = [8 - 10]$ m
UC11	İçortam/Kongre Salonu	$h_{UC} = [8 - 10]$ m
UC12	İçortam/Kongre Salonu	$h_{UC} = [8 - 10]$ m
UC13	Dışortam/Düşük yoğunluklu ortam, ağaçlık ve bahçe	$h_{UC} = 20$ cm
UC14	Dışortam/Düşük yoğunluklu ortam, ağaçlık ve bahçe	$h_{UC} = 20$ cm
UC15	Dışortam/Düşük yoğunluklu ortam, ağaçlık ve bahçe	$h_{UC} = 50$ cm

Çizelge 3.7, UC ve GW konum özellikleri ve kurulum yükseklikleri hakkında bilgi vermektedir. Çizelge 3.7'de gösterildiği gibi, her iki GW de 20 m ve 40 m yüksekliğe sahip bina çatılarında yer almaktadır. UC'lerden 6 adedi dış mekanda, 9 adedi iç mekanda çalışmaktadır. UC'ler için iç mekan konumları da, Çizelge 3.7'de verildiği gibi farklıdır. Dış mekanlar çoğunlukla bahçeler, yeşil alanlar veya çatı direkleridir.

3.2.2. Radyo Arayüz Benzetimi

LoRaWAN® radyo arayüz benzetimi, Bursa şehir merkezinin aynı coğrafi bölgesinde, CloudRF® benzetim aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CloudRF®, çevresel etkileri dikkate alarak sinyal kapsama alanı tahminleri ve bağlantı bütçesi hesaplamaları yapabilen, çevrim içi bir radyo planlama aracıdır. Ayrıca bu araç, yüksek çözünürlüklü topografik veriler kullanılarak koşul benzetimleri yapılmasına ve gerçek ekipman özelliklerinin modellenmesine olanak sağlamaktadır (Behjati vd., 2021). Bu benzetim çalışmasında, CloudRF® aracı, sinyal yolu davranışının analiz edilmesi ve gerçek şehir koşulları altında, topografik verilere dayanarak, GW noktalarındaki RSSI değerlerinin

belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Söz konusu koşullar ve veriler Çizelge 3.8'de ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Benzetim sürecinde, yalnızca 15 UC noktasından GW1 ve GW2'ye iletilen sinyallerin RSSI değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.10'da verilen genel ağ yapısında sunucular, GW'ler ve UC'ler bulunsa da, benzetim yalnızca radyo arayüzü temelinde gerçekleştirilmiş; sunucular dikkate alınmamıştır. Bu tercih, kullanılan benzetim yazılımının yalnızca radio arayüz tabanlı çıktı üretmesi ve sunucu tabanlı veri sağlamamasıyla ilişkilidir.



Şekil 3.10. LoRaWAN® ağının hiyerarşik modeli

Daha önce de belirtildiği üzere, benzetimler için üç farklı yayılım modeli tercih edilmiştir: Doğrudan görüş hattı (LOS), Okumura-Hata ve COST231-Hata modelleri. UC ve GW cihazlarının yapılandırma ve kurulum parametreleri, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.7'de

sunulan bilgilerle aynıdır. Ayrıca Çizelge 3.8, CloudRF® yazılımına özgü yapılandırma parametrelerini detaylandırmakta olup, her bir yayılım modeli için GW'nin nasıl yapılandırıldığına ve her UC noktası için yol kaybının nasıl hesaplandığına ilişkin bilgileri içermektedir.

Çizelge 3.8. CloudRF benzetim aracında GW ve UC'ler için parametre tanımlamaları

Saha (GW)	
Parametre	**Tanımlama**
GW koordinatlar (Enlem/Boylam)	GW1:Gizli GW2:Gizli
GW yüksekliği	$h_{GW1} = 20$ m $h_{GW2} = 40$ m
İşaret (GW)	
Parametre	**Tanımlama**
Frekans	868 MHz
İletim gücü (T_x gücü)	14 dBm
Bantgenişliği (BW)	125 kHz
Bağlantı Kablosu (GW)	
Parametre	**Tanımlama**
Koaksiyel Tip	Standart
Koaksiyel Uzunluk	1 m
Kayıp	0 dB
Etkin Yayılan Güç (ERP)	0,25 W / +14 dBm
Etkin İzotropik Yayılan Güç (EIRP)	0,041 W / +16,1 dBm
Verimlilik	İyi (100%)
Anten (GW)	
Parametre	**Tanımlama**
Tür	Standart Tür
Kutup	V
Azimut	165º
Yatay Hüzme Genişliği (H-BW)	1º
Ön/Arka Oranı	2,15 dB
Tilt	0º

Çizelge 3.8. CloudRF benzetim aracında GW ve UC'ler için parametre tanımlamaları (devam)

UC	
Parametre	**Tanımlama**
Enlem/Boylam	UC1, UC2, ….UC15: Gizli
Zeminden Yükseklik (H-AGL)	20 cm/50 cm/3-33 m
Alıcı kazancı	2 dBi
Ölçülen birim	Alınan güç (dBm)
Hassasiyet	-140 dBm
Model	
Parametre	**Tanımlama**
Model	Okumura-Hata/COST231-Hata/LOS
Güvenilirlik	99% / -9 dB (Geleneksel)
İçerik	Geleneksel/Şehir
Kırınım	Kapalı
Çevresel Parametreler	
Parametre	**Tanımlama**
Profil	Şehir
Yükseklik	Arazi
Arazi Örtüsü	Açık
Binalar	Açık
İlave engeller	Kapalı
Gürültü tabanı	-123 dBm

Çizelge 3.8'de, saha (GW), sinyal özellikleri, besleyici sistem, anten türü, mobil alıcı (UC), kullanılan model ve çevresel koşullar gibi başlıklar yer almaktadır. Çizelge 3.8'de, Saha alt başlığı, GW'lerin koordinatlarının ve yüksekliklerinin tanımlanmasına izin vermektedir. İlgili bilgi güvenliği yönetim sistemi kuralları nedeniyle, gerçek koordinatlar verilmemiştir. İşaret alt başlığı, frekans, iletilen güç ve bantgenişliği özellikleri içindir.

Bağlantı kablosu, GW antenleri için kullanılan koaksiyel kablo tipini ve uzunluğunu, kablodaki kayıp değerini, Etkin Yayılan Güç (Effective Radiated Power, ERP), Etkin İzotropik Yayılan Güç (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) ve bir sinyalin iletilen gücünü etkileyen verimlilik parametrelerini tanımlar. Kullanılan koaksiyel kablonun tipi

besleme kaybını etkiler. Anten doğrudan telsize vidalanmışsa, koaksiyel kablo uzunluğu da güvenli bir şekilde göz ardı edilebilir. Besleme kaybı dB cinsinden verilir ve tipik olarak 0 dB ile 12 dB arasındadır. Kayıp değerinin 15 dB'den fazla olması, sistem verimliliğinin çok düşük olduğu anlamına gelir. RF giriş gücüne ve hesaplanan ERP'ye dayalı olarak sistem için hesaplanan çıkış gücü, maksimum çıkış gücü olan 14 dBm'dir. Anten alt başlıkları, anten özellikleri hakkında ayrıntılar verir. Tür parametresi, bir sistem şablonu seçmeye veya belirli bir desen şekli oluşturmaya izin verir. Kutup, antenin yatay veya dikey kutuplanmasını gösterir. Kazanç, antenin kazancıdır. Yatay Hüzme Genişliği (Horizontal Beamwidth, H-BW), yatay düzlemdeki desende, yarı güç (-3 dB) noktaları arasındaki derece cinsinden genişlik ve Dikey Hüzme Genişliği (Vertical Beamwidth, V-BW), dikey düzlemdeki desende, yarı güç (-3 dB) noktaları arasındaki derece cinsinden genişliktir. Anten Ön/Arka Oranı parametresi, bir desenin ön ve arka kazanç değerleri arasındaki oranı, dB cinsinden tanımlar. Kazanç, izotropik bir ışıyıcıya göre anten kazancını tanımlar; örneğin bir dipol antenin kazancı 2,15 dBi'dir (Costa, 2018). GW için tilt durumu söz konusu olmadığından; tilt değeri 0 olarak seçilmiştir. Çizelge 3.8'de yer alan saha, sinyal, besleyici ve anten değerleri, test edilen LoRaWAN® ağının GW ve UC özelliklerine göre tanımlanmıştır. Çizelge 3.8'de, UC alt menüsü, UC'lere ilişkin parametreleri göstermekte olup koordinat, yükseklik, alıcı kazancı ve hassasiyet değerlerini içermektedir; UC koordinatları veri güvenliği kuralları gereği açıkça belirtilmemiştir. UC alt menüsü yapılandırma parametreleri, UC durumlarına göre tanımlanmıştır. Örneğin H-AGL değerleri her UC için değişirken; UC antenler için alıcı kazancı 2 dBi olarak aynıdır. Model alt menüsü, araştırmamızın odak noktası olan yayılım modellerini ayırt etmek için kullanılır.

Her ne kadar 12 farklı yayılım modeli olsa da, 2. Bölüm, Kaynak Araştırması ve Kuramsal Temeller, başlığı altında belirtilen nedenlerden dolayı, bunlardan 3 tanesi seçilmiştir. Çizelge 3.8'deki Çevresel Parametreler alt bölümü, ortam profilleri, binalar, belirli engeller ve gürültü tabanı sınırları hakkında ayrıntılı bilgi içerir. Çizelge 3.8, ayrıca, CloudRF® benzetim aracında seçilen parametreleri ve bu parametreler için tanımlanan yapılandırma değerlerini de göstermektedir. Model ve Çevresel Parametreler alt başlıkları, CloudRF® benzetim aracının, şehir merkezinde konuşlandırılan ağ koşullarına ilişkin önerilerine göre seçilmiştir. Genel olarak, tüm konfigürasyon parametreleri,

mevcut GW, UC, ağ konfigürasyonlarına ve CloudRF® benzetim aracı önerilerine göre tanımlanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Bina İçi Ortam LoRaWAN® Ağları Performans Analiz Sonuçları

4.1.1. Çok Katlı Binada LoRaWAN® Ağ Performans Sonuçları

Bölüm 3.1'de açıklanan ortam koşulları altında, Çizelge 4.1, toplam 56 UC tarafından başarı ile iletilen yukarı yön mesajlarına ilişkin, elde edilen bulguları sunmaktadır. Bu çizelge aracılığıyla, GW'nin mesaj iletim performansına odaklanılmıştır. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3, ağ performansını değerlendirmede önemli bir gösterge olan, sırasıyla, her bir blok ve ağ geneli için ortalama RSSI değerlerini ve SNR değerlerini içermektedir.

Çizelge 4.1. UC'ler tarafından gönderilen yukarı yön mesaj sayıları

Blok	Gün Sayısı	UC Sayısı	Başarı ile İletilen Mesaj Sayısı
A	70	18	9.261
B	70	19	11.245
C	70	19	9.088
Toplam	70	56	29.594

Çizelge 4.2. Bloklarda ve ağın genelinde hesaplanan ortalama RSSI değerleri

Blok	Ortalama RSSI (dBm)
A	-109,22
B	-105,46
C	-109,82
Toplam	-108,16

Çizelge 4.3. Bloklarda ve ağın genelinde hesaplanan ortalama SNR değerleri

Blok	Ortalama SNR (dB)
A	-8,19
B	-0,26
C	-9,16
Toplam	-5,87

Analizlerde, UC'lerin yukarı bağlantı iletişimi sırasında kullandıkları SF değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.4, 4.5 ve 4.6, sırasıyla A, B ve C bloklarındaki SF değerlerinin kullanım sayılarını göstermektedir. Bu çizelgelerde, her blok için en sık tercih edilen SF değerleri, kalın yazılarla vurgulanmıştır. RSSI, SNR, SF kullanım yoğunluğu ve mesaj gönderim verileri birlikte değerlendirilerek yeni çizelgeler oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4. Her bir SF değerinin A Blok'ta kullanım sayısı

Blok	SF Değeri	Kullanım Sayısı
A	7	2.237
A	8	372
A	9	360
A	10	377
A	11	1.955
A	**12**	**3.960**
Toplam	7, 8, 9, 10, 11, 12	9.261

Çizelge 4.5. Her bir SF değerinin B Blok'ta kullanım sayısı

Blok	SF Değeri	Kullanım Sayısı
B	**7**	**7.507**
B	8	1.167
B	9	1.063
B	10	639
B	11	128
B	12	741
Toplam	7,8,9,10,11,12	11.245

Çizelge 4.6. Her bir SF değerinin C Blok'ta kullanım sayısı

Blok	SF Değeri	Kullanım Sayısı
C	7	1.513
C	8	371
C	9	586
C	10	1.021
C	11	1.838
C	**12**	**3.759**
Toplam	7,8,9,10,11,12	9.088

Bu kapsamda, Çizelge 4.7, Çizelge 4.4-4.6 verileri temel alınarak her blokta en çok kullanılan SF değerleri ile ilgili verileri özetlemektedir.

Çizelge 4.7. Her blokta en çok kullanılan SF değeri ve tüm SF değerlerinin içindeki kullanım yüzdesi

Blok	En çok kullanılan SF değeri	Bu değerin kullanım sayısı	Tüm SF değerlerinin kullanım sayısı	En çok kullanılan SF değerlerinin kullanım yüzdesi (%)
A	12	3.960	9.261	42,75
B	7	7.507	11.245	66,75
C	12	3.759	9.088	41,36

Çizelge 4.8, UC'ler tarafından başarıyla iletilen mesaj oranlarını sunarken; Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10, sırasıyla, ortalamanın üzerinde RSSI ve SNR değerlerine sahip UC sayılarını göstermektedir.

Çizelge 4.8. Mesaj gönderim başarı oranı

Blok	UC	Başarılı Şekilde İletilen Mesaj Sayısı	Gönderilen Mesaj Sayısı	Mesaj Gönderimindeki Başarı Oranı (%)
A	18	9.261	30.240(1.680x18)	30,63
B	19	11.245	31.920(1.680x19)	35,23
C	19	9.088	31.920(1.680x19)	28,47
Toplam	56	29.594	94.080(1.680x56)	31,46

Çizelge 4.9. Ortalama RSSI değerinden daha yüksek RSSI değerine sahip olan UC sayısı

Blok	Ortalama RSSI (dBm)	Ortalama RSSI Değerinden Daha Yüksek RSSI Değerine Sahip Olan UC Sayısı
A	-109,22	7
B	-105,46	9
C	-109,82	3

A Blok ve C Blok'taki UC'lerin GW'ye uzaklıkları benzer olduğundan, her iki blokta da çoğunlukla SF12 değeri tercih edilmiştir. Bu değerin kullanım oranları, sırasıyla, %42,75 ve %41,36 olarak Çizelge 4.7'de gösterilmektedir. Buna karşılık, LoRaWAN® GW'ye yakın konumda bulunan B Blok'ta, en çok SF7 değeri kullanılmıştır. Kullanım oranı %66,75'tir. SF7, LoRaWAN® mesaj iletimi sırasında, en geniş bantgenişliği ve en yüksek veri yükü kapasitesini temsil ederken, aynı zamanda en düşük alıcı hassasiyetine sahiptir. Çizelge 4.8'de gösterildiği üzere, test süresi boyunca, tüm UC'lerin (56 adet) toplamda 94.080 mesaj göndermesi beklenirken; bu mesajların yalnızca %31,46'sı başarıyla iletilmiştir. Bu düşük başarı oranının muhtemel nedenleri arasında, sinyal zayıflaması, fiziksel engeller ve bina yapı elemanları kaynaklı bozulmalar yer almaktadır.

Çizelge 4.10. Ortalama SNR değerinden daha yüksek SNR değerine sahip olan UC sayısı

Blok	Ortalama SNR (dB)	Ortalama SNR Değerinden Daha Yüksek SNR Değerine Sahip Olan UC Sayısı
A	-8,19	6
B	-0,26	9
C	-9,16	6

Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10, blok bazlı ortalama RSSI ve SNR değerlerinin, Çizelge 2.5 ile belirtilen sınırlar içerisinde kaldığını ortaya koymaktadır. B Blok'taki UC'ler, hem ortalama RSSI hem de ortalama SNR açısından, birbirine yakın konumda bulunan A Blok ve C Blok'taki UC'lere kıyasla, daha yüksek performans göstermektedir. Çizelge 4.9'a göre, B Blok'taki su sayaçlarının yaklaşık yarısının RSSI değeri, ortalama RSSI değerinin üzerindeyken; C Blok'ta yalnızca 19 cihazdan 3'ü ve A Blok'taki 18 cihazdan 7'si, ortalama RSSI değerinin üzerinde RSSI değerine sahiptir. Benzer şekilde, Çizelge 4.10'daki sonuçlar da, B Blok'un hem ortalama SNR değeri hem de ortalamanın üzerinde SNR değerine sahip UC sayısı açısından, A Blok ve C Blok'a göre daha iyi performans sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. A ve C Blok, yine birbirine yakın değerler göstermektedir.

Çizelge 4.11. UC'lerden ve AFTD ölçümlerinden elde edilen karşılaştırmalı RSSI sonuçları

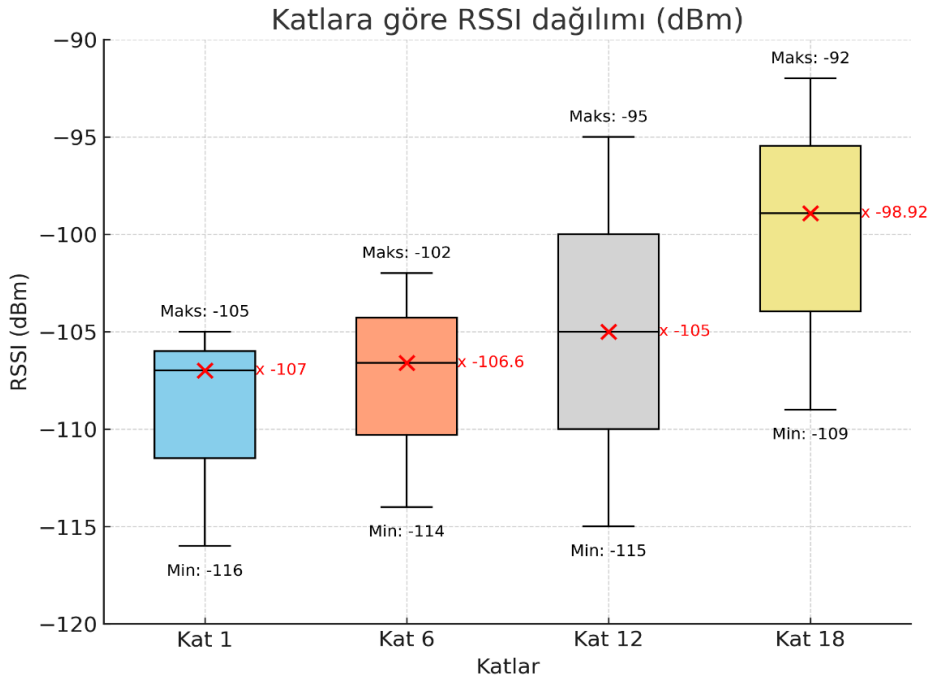
	LoRaWAN® UC Sonuçları			**AFTD Sonuçları**		
Kat	**Ortalama RSSI (dBm)**	**Maksimum RSSI (dBm)**	**Minimum RSSI (dBm)**	**Ortalama RSSI (dBm)**	**Maksimum RSSI (dBm)**	**Minimum RSSI (dBm)**
18	-98,92	-92	-109	-89,34	-85	-97
12	-105	-95	-115	-107,98	-102	-113
6	-106,60	-102	-114	-110,63	-107	-115
1	-107	-105	-116	-119,78	-115	-124

Çizelge 4.11, bu çalışmanın ikinci bölümünde elde edilen bulguları, UC'lerden elde edilen bir günlük ölçüm sonuçları ile test ortamı ve ağ verilerine erişim kısıtlamaları nedeniyle farklı günlerde aynı katlarda gerçekleştirilen 5 örnek AFTD ölçümünden elde edilen RSSI değerlerini, karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. AFTD ile yapılan tek bir testin süresi test alanında yaklaşık 2 dakikadır. Bu nedenle, bir kat için toplam test süresi yaklaşık 10 dakika; tüm bina genelinde ise toplam test süresi yaklaşık 40 dakika olarak

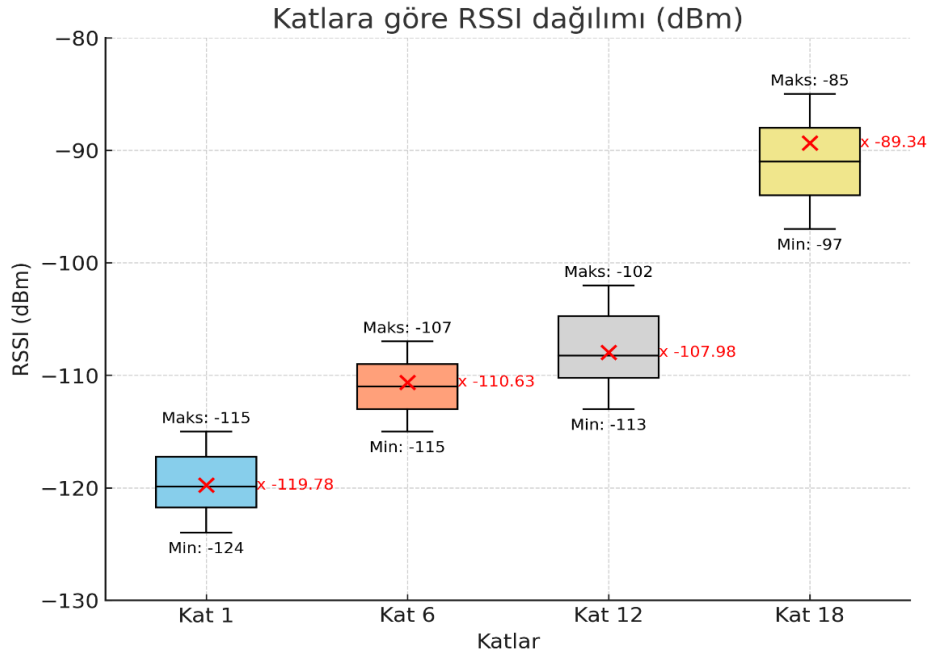
gerçekleşmiştir. RSSI ölçüm sonuçları, hem AFTD cihazı hem de UC'ler için elde edilen ortalama, maksimum ve minimum değerlerin, Çizelge 2.5'te belirtilen referans aralıklarla uyumlu ve kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Ortalama RSSI değerleri incelendiğinde, UC'lerden elde edilen ölçüm sonuçlarında, yaklaşık 8 dB'lik bir değişim gözlenmiştir. Bu değerler, –98,92 dBm ile –107 dBm arasında değişmektedir. AFTD cihazı ile elde edilen ortalama RSSI değerleri ise, -89,34 dBm ile –119,78 dBm arasında olup, yaklaşık 30 dB'lik bir değişim göstermektedir. Maksimum RSSI değerleri analiz edildiğinde, UC'lerden elde edilen ölçüm sonuçları, –92 dBm ile –105 dBm arasında değişmekte olup 13 dB'lik bir değişim gözlemlenmiştir. Öte yandan, AFTD ile elde edilen maksimum RSSI değerleri, –85 dBm ile –115 dBm aralığında değişmekte ve 30 dB'lik bir değişim sunmaktadır. Son olarak, minimum RSSI değerleri incelendiğinde, AFTD ölçüm sonuçlarında –97 dBm ile –124 dBm arasında 27 dB'lik bir değişim gözlenmiştir. Buna karşılık, UC'lerden elde edilen minimum değerler, –109 dBm ile –116 dBm arasında olup 7 dB'lik bir değişim göstermektedir.

Tüm RSSI verilerindeki değişimler topluca değerlendirildiğinde; UC ölçümlerindeki ortalama RSSI değişimi 9,33 dB, AFTD ölçümlerindeki ortalama değişim ise 29 dB olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.11'de gösterildiği üzere, hem en yüksek hem de en düşük RSSI değerleri AFTD ölçümlerinde gözlenmiş olup, sırasıyla 18. katta –85 dBm ve 1. katta –124 dBm olarak kaydedilmiştir.

RSSI değerlerinin LoRaWAN® UC'lerden ve AFTD ölçümlerinden elde edilen dağılımlarına ait grafik gösterimleri, sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sunulmuştur. Maksimum ve ortalama RSSI değerleri analiz edildiğinde, her iki şekilde de (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2), kat numarası arttıkça —1. kattan 18. kata doğru— RSSI değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Ancak minimum RSSI değerleri incelendiğinde, Şekil 4.1'de, beklenenin aksine 6. kat ile 12. kat arasında minimum RSSI değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Buna karşılık, Şekil 4.2'de minimum RSSI değerleri kat yükseldikçe artış göstermektedir. Bu durum, anlık RSSI değerlerinin, yalnızca GW'ye olan mesafeye değil, aynı zamanda çevresel etkenlere de bağlı olarak değişebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.1. LoRaWAN® UC'lerinden elde edilen RSSI değerlerinin dağılım grafiği



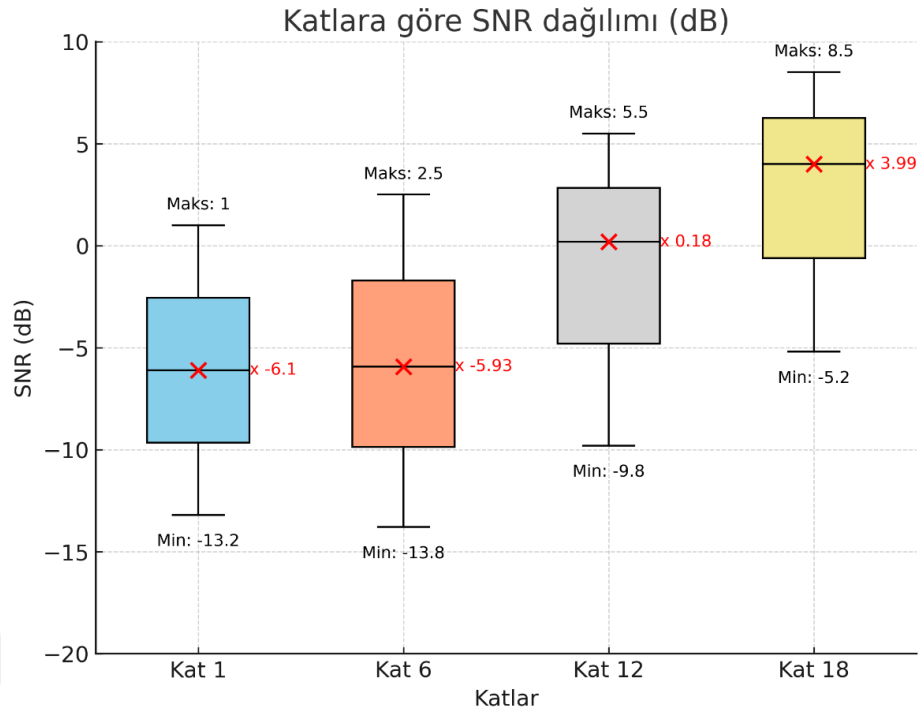
Şekil 4.2. AFTD ölçümlerinden elde edilen RSSI değerlerinin dağılım grafiği

Çizelge 4.12, UC'lerden ve AFTD ile gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen karşılaştırmalı SNR değerlerini göstermektedir. Çizelge 4.12'ye göre, beklentilerle uyumlu olarak, GW'ye olan mesafe arttıkça, hem UC ölçümlerinde hem de AFTD ölçümlerinde, ortalama SNR değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu ölçümler, LoRaWAN® teknolojisinin negatif SNR değerlerinde dahi çalışabildiğini ortaya koymaktadır. UC ölçümlerinden elde edilen ortalama SNR değeri, 18. kattan 1. kata doğru gidildikçe 3,99 dB'den –6,1 dB'ye düşmektedir. Benzer şekilde, AFTD ölçümlerinden elde edilen ortalama SNR değeri ise, aynı kat aralığında 6,4 dB'den –4,9 dB'ye gerilemektedir. UC ölçümlerinde elde edilen maksimum SNR değeri, 18. kattan 1. kata doğru 8,5 dB'den 1 dB'ye düşerken; AFTD ölçümlerinde bu değer, 8 dB'den –4 dB'ye düşmektedir. Minimum SNR değerleri açısından bakıldığında ise, UC ölçümlerinde elde edilen minimum değerler –5,2 dB'den –13,2 dB'ye, AFTD ölçümlerinde ise 4 dB'den –8 dB'ye düşüş göstermektedir.

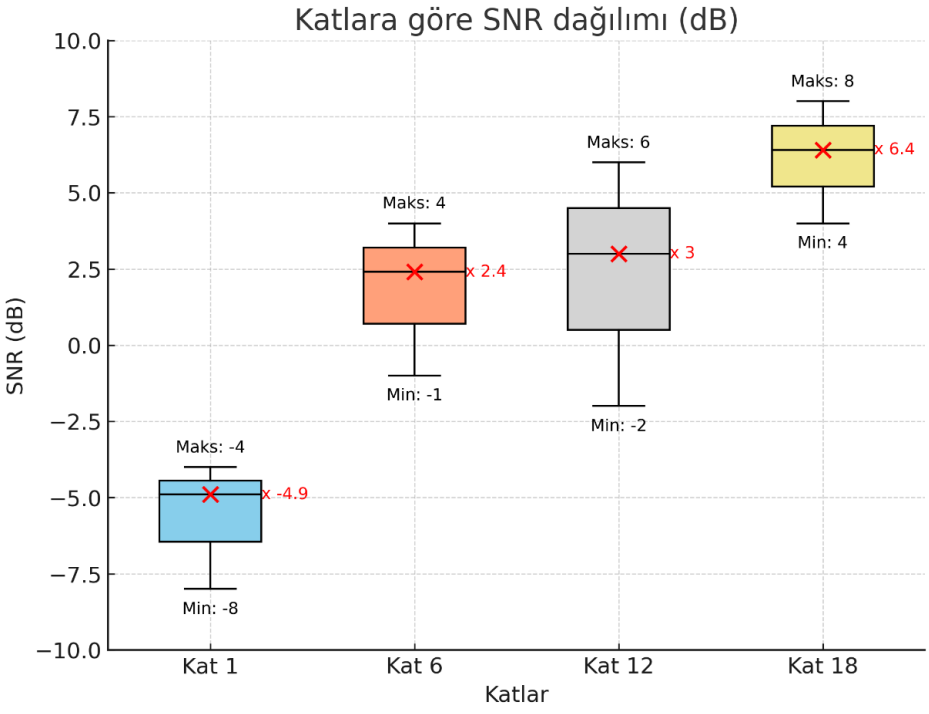
Çizelge 4.12. UC'lerden ve AFTD ölçümlerinden elde edilen karşılaştırmalı SNR sonuçları

	LoRaWAN® UC Sonuçları			**AFTD Sonuçları**		
Kat	**Ortalama SNR (dB)**	**Maksimum SNR (dB)**	**Minimum SNR (dB)**	**Ortalama SNR (dB)**	**Maksimum SNR (dB)**	**Minimum SNR (dB)**
18	3,99	8,5	- 5,2	6,4	8	4
12	0,18	5,5	-9,8	3	6	- 2
6	-5,93	2,5	-13,8	2,4	4	-1
1	-6,1	1	-13,2	- 4,9	- 4	- 8

LoRaWAN® UC'lerden ve AFTD cihazı ile gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen SNR değerlerinin dağılımına ilişkin grafik gösterimleri, sırasıyla, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur. Şekil 4.3'te, UC ölçümleri için 1. ve 18. katlar arasındaki ortalama SNR değişimi 10,09 dB olarak belirlenirken; Şekil 4.4'te AFTD ölçümleri için bu değişim 11,3 dB olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. LoRaWAN® UC'lerden elde edilen SNR değerlerinin dağılım grafiği



Şekil 4.4. AFTD ölçümlerinden elde edilen SNR değerlerinin dağılım grafiği

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, hem UC ölçümlerinde hem de AFTD ölçümlerinde, 1. kattan 18. kata doğru GW'ye olan mesafenin azalmasıyla birlikte, ortalama ve maksimum SNR değerleri, genel beklentilerle uyumlu şekilde, artış göstermektedir. Minimum SNR değerleri için de benzer bir artış eğilimi gözlemlenmekle birlikte; bu eğilim Şekil 4.3'te 6. katta UC ölçümlerinde, Şekil 4.4'te ise 12. katta AFTD ölçümlerinde istisnalar içermektedir. Bu tür sapmalar, RSSI ölçümlerinde olduğu gibi, çevresel faktörlerden kaynaklanan etkilerle açıklanabilir.

4.1.2. Bina İçi LoRaWAN® Ağında Veri Analizi, MATLAB® Eğri Uydurma Analizi ve Yapay Zeka Destekli Veri Üretimi ile Ağ Performans Analizi Sonuçları

Kurulan iç ortam LoRaWAN® ağından elde edilen veri seti hakkındaki bilgiler, Çizelge 4.13 ile verilmiştir. Çizelge 2.5'te sunulduğu üzere, 7 ile 12 arasında değişen SF değerleri, sistem tarafından otomatik atanmakta olup, kullanıcı tarafından manuel olarak belirlenmemektedir. Kurulan ağ yapısında, GW ile UC arasındaki mesafenin kısa olması ve ölçüm süresince sabit kalması nedeniyle; SF değeri sürekli 7 olarak atanmıştır. UC tarafından gönderilen toplam 194 mesajdan 165'i ağ sunucusuna başarıyla ulaşmış ve değerlendirmeye alınmıştır.

Çizelge 4.13. Kurulan LoRaWAN® ağından elde edilen veri seti hakkındaki bilgiler

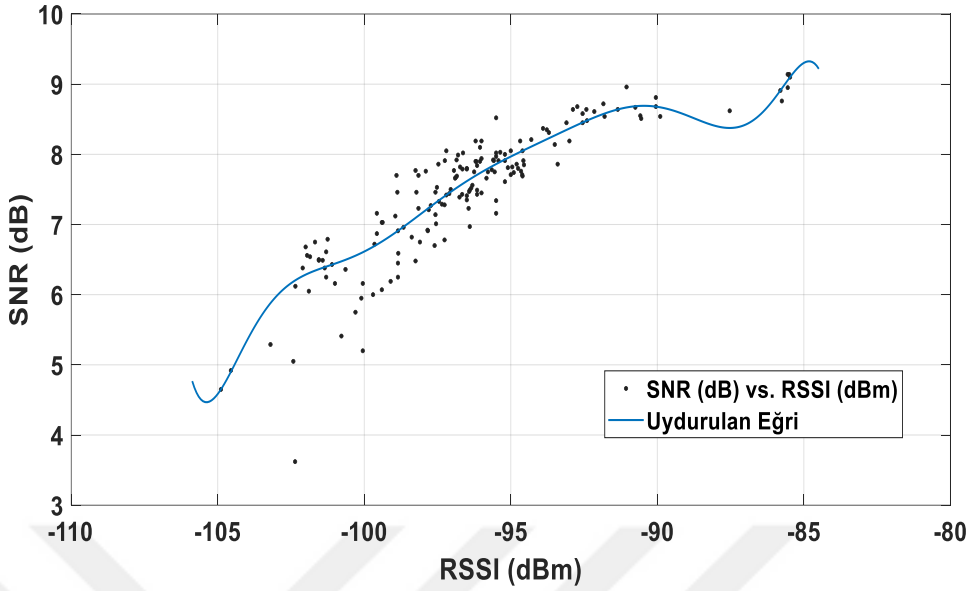
Veri Türü	Açıklama
Kayıt Süresi (Gün)	67
Tarih Aralığı	23.07.2024-27.09.2024
SF	7
Başarıyla İletilen Paket Sayısı (Adet)	165
Başarıyla İletilen Paket/Gönderilen Toplam Paket (Adet/Adet)	165/194
Paket İletim Başarı Oranı (%)	%85,05
Ortalama SNR (dB)	7,46
Ortalama RSSI (dBm)	-96,43

Başarıyla iletilen mesaj sayısı üzerinde, kablosuz iletişim ortamında meydana gelebilecek yol kayıplarının, iletim hatalarının ya da UC ve ağ altyapısından kaynaklı olası sorunların etkili olduğu düşünülmektedir. Ağda yalnızca bir UC'nin bulunması nedeniyle, paket iletim başarımına yönelik karşılaştırmalı bir analiz yapılmamıştır. Ağ sunucusuna ulaşan 165 mesajdan elde edilen ortalama RSSI ve SNR değerleri ile birlikte, paket iletim başarı oranı da Çizelge 4.13 ile detaylı biçimde sunulmaktadır.

Çizelge 4.14. Veri setindeki RSSI ve SNR değer dağılımından elde edilen istatistiki veriler

	RSSI (dBm)	**SNR (dB)**
Minimum	-104,9	3,62
Maksimum	-85,47	9,14
Ortalama	-96,43	7,46
Medyan	-96,5	7,69
Mod	-95,5	7,91
Değişim Aralığı	19,43	5,52

Çizelge 4.14, veri setindeki RSSI ve SNR değerlerinden elde edilen minimum, maksimum, ortalama, medyan, mod ve değişim aralığı gibi istatistiki verileri göstermektedir. Veri setinden elde edilen ölçümler, MATLAB® yazılımı kullanılarak eğri uydurma (curve fitting) yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu analiz kapsamında, iç mekânda kurulu bir LoRaWAN® ağına ait veriler üzerinden, SNR ile RSSI arasındaki ilişki regresyon modelleri aracılığıyla değerlendirilmiş ve matematiksel olarak ifade edilmiştir. Elde edilen bu ilişkiler, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'da görsel olarak sunulmuştur. Şekil 4.5'te yer alan siyah noktalar, ağdan toplanan RSSI ve SNR ölçüm çiftlerini temsil ederken, mavi renkli eğri, bu iki parametre arasındaki ilişkiyi tanımlayan ve eğri uydurma yöntemi ile oluşturulan polinom regresyon modelini göstermektedir.



Şekil 4.5. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (polinom regresyon modeli)

İlgili regresyon eğrisinin, gerçek ağ verileriyle olan uyum düzeyi ve modelin başarımını gösteren istatistiksel değerler ise Çizelge 4.15'te detaylı biçimde sunulmaktadır. Şekil 4.5'teki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi Denklem (4.1) ile verilmiştir.

$$SNR = \sum_{i=0}^{9} p_i . (RSSI)^i \quad (4.1)$$

Çizelge 4.15. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Polinom regresyon modeli için)

Parametre	Değer
SSE	9,2273
R^2	0,9362
Adj-R^2	0,9325
RMSE	0,2440

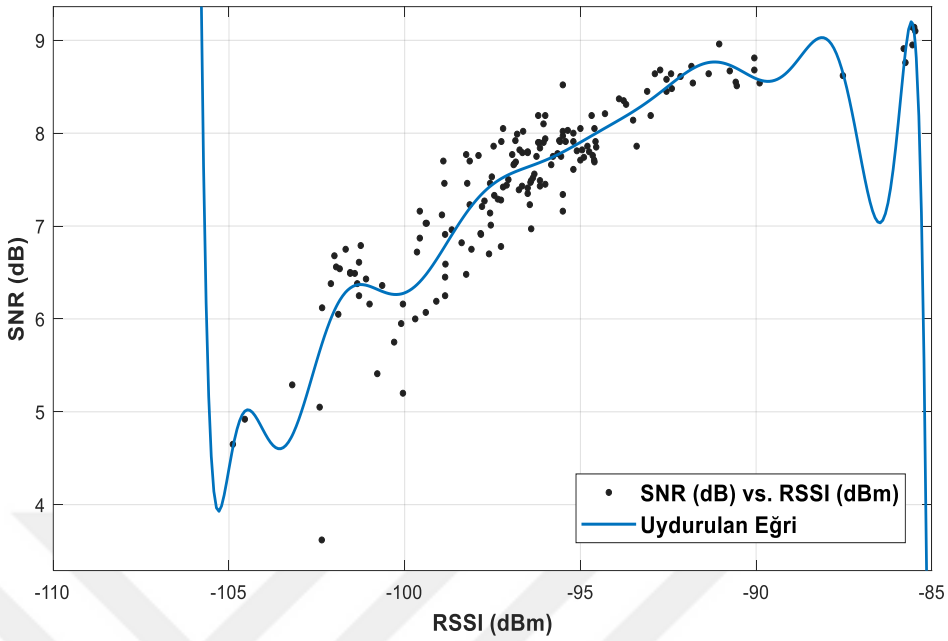
Denklem (4.1)'deki p_i katsayıları Çizelge 4.16 ile verilmiştir. Denklem (4.1) ve Çizelge 4.16 incelendiğinde, SNR–RSSI ilişkisini tanımlayan modelin, MATLAB® eğri

uydurma aracı tarafından izin verilen en yüksek dereceli polinom olan 9. dereceden bir polinom olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.16. Polinom regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları

Katsayı	Değer
p_0	7,6365
p_1	0,9796
p_2	-0,3390
p_3	0,0073
p_4	0,2945
p_5	-0,0938
p_6	-0,0969
p_7	0,0304
p_8	0,0086
p_9	-0,0026

Yapılan denemelerde, daha düşük dereceli polinomlar kullanıldığında, elde edilen R^2 ve RMSE değerlerinin, 9. dereceden polinoma göre daha düşük uyum iyiliği sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, modelleme doğruluğu açısından, 9. dereceden polinomun, söz konusu veri seti için en uygun eğriyi temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.6. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Fourier regresyon modeli)

Şekil 4.6'da verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Çizelge 4.17'de sunulmuştur.

Çizelge 4.17. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Fourier regresyon modeli için)

Parametre	**Değer**
SSE	22,3050
R^2	0,8459
Adj-R^2	0,8280
RMSE	0,3895

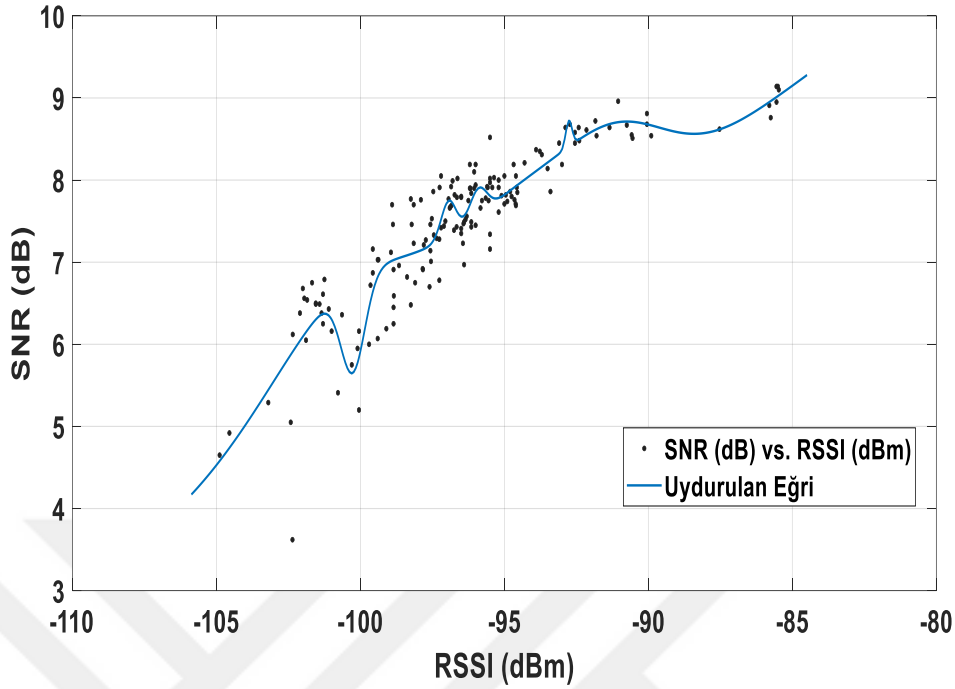
Şekil 4.6'daki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi Denklem (4.2) ile verilmektedir.

$$SNR = \sum_{i=0}^{8} a_i.cos(i.w.RSSI) + b_i.sin(i.w.RSSI) \qquad (4.2)$$

Denklem (4.2)'deki a_i, b_i ve w katsayıları Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Fourier regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları

Katsayı	Değer
a_0	$1{,}2930 \times 10^{9}$
a_1	0
b_1	$-4{,}5538 \times 10^{10}$
a_2	$-4{,}9115 \times 10^{9}$
b_2	$6{,}4413 \times 10^{10}$
a_3	$7{,}3008 \times 10^{9}$
b_3	$-5{,}3613 \times 10^{10}$
a_4	$-5{,}8801 \times 10^{9}$
b_4	$3{,}0508 \times 10^{10}$
a_5	$3{,}0106 \times 10^{9}$
b_5	$-1{,}2101 \times 10^{10}$
a_6	$-9{,}8711 \times 10^{8}$
b_6	$3{,}2308 \times 10^{9}$
a_7	$1{,}9107 \times 10^{8}$
b_7	$-5{,}2535 \times 10^{8}$
a_8	$-1{,}6742 \times 10^{7}$
b_8	$3{,}9488 \times 10^{7}$
w	0,0539



Şekil 4.7. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Gauss regresyon modeli)

Şekil 4.7'de, siyah noktalar, ağdan elde edilen RSSI ve SNR değerlerini; mavi renkli eğri ise, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren, eğri uydurma yöntemi ile belirlenen ve Gauss regresyon modeline karşılık gelen eğriyi göstermektedir.

Çizelge 4.19. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Gauss regresyon modeli için)

Parametre	**Değer**
SSE	20,6652
R^2	0,8572
Adj-R^2	0,8339
RMSE	0,3828

Şekil 4.7'de verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Çizelge 4.19'da sunulmuştur. Şekil 4.7'deki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi Denklem (4.3) ile verilmektedir.

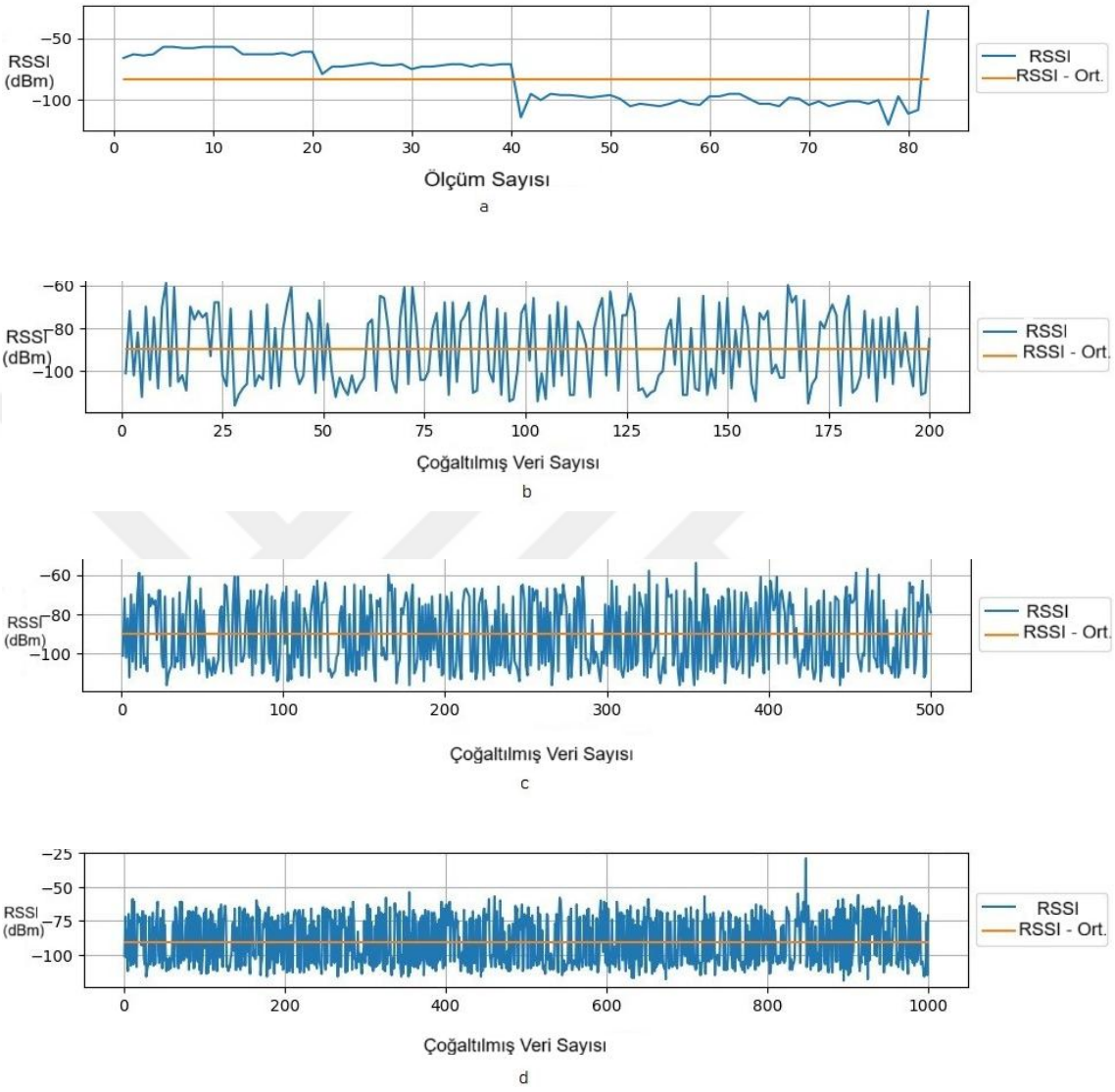
$$SNR = \sum_{i=1}^{8} a_i . e^{\left(\frac{RSSI-b_i}{c_i}\right)^2} \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'teki a_i, b_i ve c_i katsayıları Çizelge 4.20 ile verilmiştir.

Çizelge 4.20. Gauss regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları

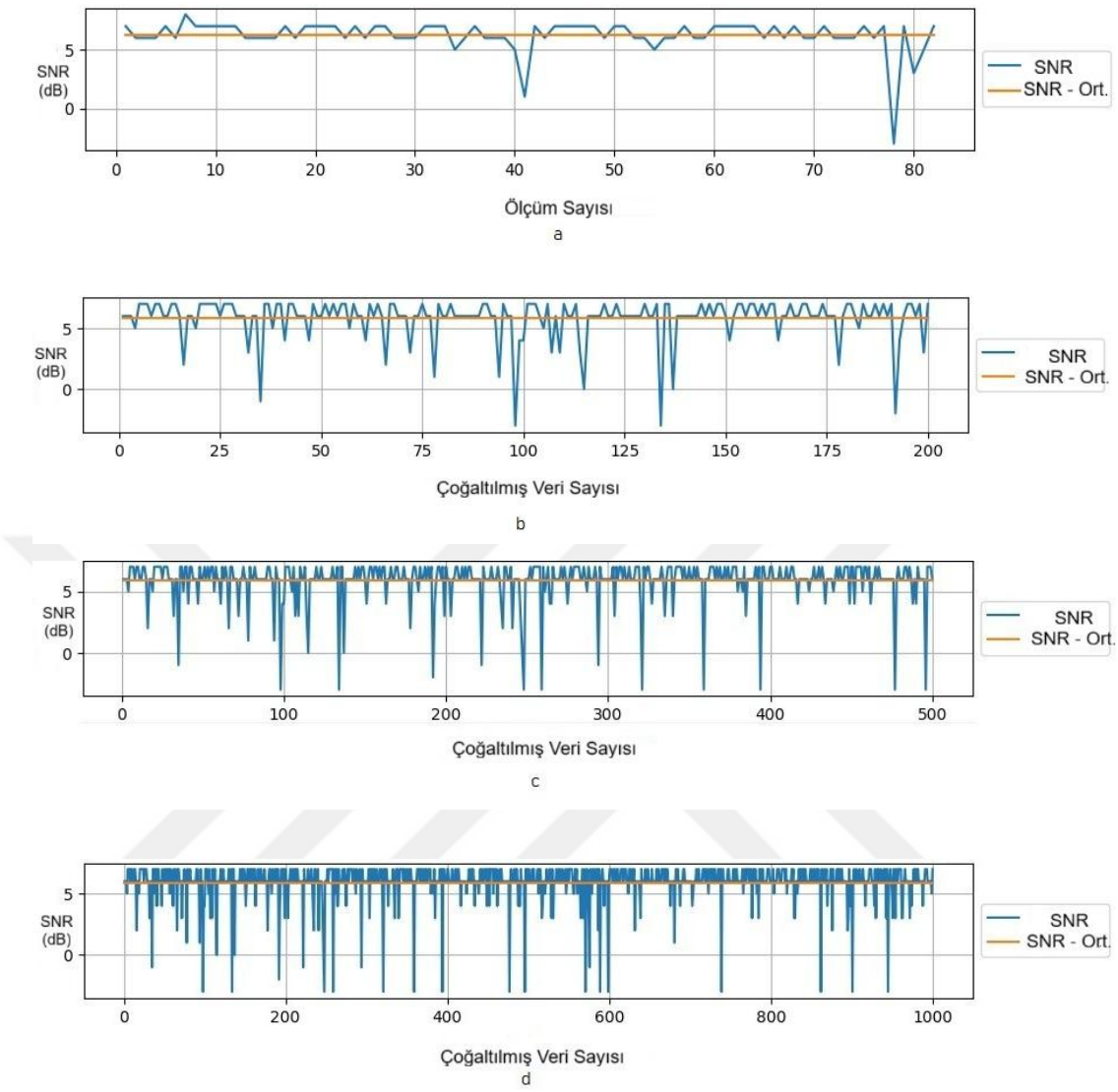
Katsayı	Değer
a_1	2,8521
b_1	-97,9110
c_1	5,3457
a_2	0,6790
b_2	-91,0085
c_2	2,4514
a_3	0,3169
b_3	-92,7618
c_3	0,1547
a_4	0,3311
b_4	-95,9062
c_4	0,4149
a_5	0,4341
b_5	-96,9416
c_5	0,3629
a_6	-1,1318
b_6	-100,2621
c_6	0,5948
a_7	-1,4335
b_7	-97,4803
c7	3,2396
a8	13,0624
b8	-60,3599
c8	41,2263

Bölüm 4.1.2'nin ikinci alt çalışmasından elde edilen ölçümler, yapay zekâ destekli veri üretim yöntemleriyle ile çoğaltılmış ve analiz edilmiştir.



Şekil 4.8. Elde edilen RSSI grafikleri a) 80 ölçümden b) 200 adet çoğaltılmış veriden c) 500 adet çoğaltılmış veriden ve d) 1.000 adet çoğaltılmış veriden

Ölçümlerden elde edilen nokta bazlı 80 veri, akabinde, 200, 500 ve 1.000 veriye çoğaltılarak SF, SNR ve RSSI ile paket kayıp oranları incelenmiştir. Buna göre, SF değerinin, tüm ölçümlerde SF7 değerini aldığı; RSSI ve SNR değerlerinin ise değiştiği belirlenmiştir. RSSI değeri -120 dBm ile -28 dBm aralığında, SNR ise -3 dB ile 8 dB aralığında değerler almıştır. Ölçüm sonuçlarına göre, ortalama RSSI değeri -83,45 dBm ve ortalama SNR değeri 6,25 dB olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.9. Elde edilen SNR grafikleri a) 80 ölçümden b) 200 adet çoğaltılmış veriden c) 500 adet çoğaltılmış veriden ve d) 1.000 adet çoğaltılmış veriden

Yapay zeka yöntemlerinden Gretel AI (Gretel Artificial Intelligence) uygulaması kullanılarak veri çoğaltma işlemine göre, 200 adet veride RSSI ortalama değeri -84,77 dBm ve SNR ortalama değeri 6,44 dB; 500 adet veride RSSI ortalama değeri -84,79 dBm ve SNR ortalama değeri 6,43 dB; 1.000 adet veride ise RSSI ortalama değeri -84,67 dBm ve SNR ortalama değeri 6,41 dB olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9, sırasıyla RSSI ve SNR değişkenleri için, ölçümü gerçekleştirilen 80 adet ile, çoğaltılan 200, 500 ve 1.000 adet veri setlerinin karşılaştırmalarını vermektedir.

4.2. Bina İçi ve Bina Dışı (Karma) Ortam LoRaWAN® Ağının Performans Analiz Sonuçları

4.2.1. LoRaWAN® Ağından Elde Edilen Ölçüm Sonuçları

Bölüm 3.2'de belirtildiği üzere, LoRaWAN® ağ sisteminde yer alan UC'ler, 41 günlük test süresi boyunca toplamda 88.560 mesaj göndermiştir. Bu toplam mesaj sayısı temel alınarak, her bir UC için ölçüm sonuçlarına dayalı olarak elde edilen RSSI ve SNR'ın maksimum, minimum ve ortalama değerleri Çizelge 4.21'de sunulmuştur. Ağdan elde edilen sonuçlar, 15 farklı UC'nin, LoRaWAN® standartlarına uygun olarak ya GW1 ya da GW2 ile başarılı şekilde iletişim kurabildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.22, 41 günlük ağ gözlem sürecine ilişkin olarak, 15 UC'ye ait RSSI ve SNR değerlerine yönelik maksimum, minimum ve ortalama değerler, standart sapmalar, en sık gözlemlenen değerler gibi istatistiksel sonuçları içermektedir.

Çizelge 4.21. LoRaWAN® ağ sistemine ait RSSI ve SNR ölçümlerinin ortalama, maksimum ve minimum değerleri

UC	RSSI (dBm) (Ortalama, Maksimum, Minimum)	SNR (dB) (Ortalama, Maksimum, Minimum)
UC1	-73/-58/-122	8,02/11,8/-9,5
UC2	-71/-58/-123	7,55/11/-9,5
UC3	-120,16/-92/-129	-11,31/-4/-19,5
UC4	-95/-78/-118	7,53/11,5/-10,5
UC5	-120,35/-91/-129	-11,09/-3,2/-20,8
UC6	-81,68/-70/-126	8,83/12,2/-9,5

Çizelge 4.21. LoRaWAN® ağ sistemine ait RSSI ve SNR ölçümlerinin ortalama, maksimum ve minimum değerleri(devam)

UC7	-80,37/-66/-123	8,91/12,2/-10,2
UC8	-111/-80/-128	-0,57/7/-18
UC9	-112/-76/-126	-3,29/7,2/-19
UC10	-113/-82/-128	-2,27/7,5/-18,8
UC11	-114,03/-84/-126	-4,99/4,2/-13,2
UC12	-108/-76/-129	-1,43/9,8/-20,8
UC13	-117,45/-88/-129	-8,14/2,8/-20
UC14	-110/-78/-129	0,30/10/-18,5
UC15	-120/-64/-131	-7,02/1,8/-20,8

Çizelge 4.22. LoRaWAN® ağına ait RSSI ve SNR ölçümlerinin istatistiksel değerlendirme sonuçları

Parametre	**Minimum Değer**	**Maksimum Değer**	**Ortalama Değer**	**Standart Sapma**	**En Çok Gözlenen Değer/ Gözlem Sayısı**
RSSI (dBm)	-131	-58	-103,14	17,23	-121/9.111
SNR (dB)	-20,8	12,2	-0,56	7,02	9,5/4.423

Çizelge 4.23, 41 günlük ağ gözlem sürecine ilişkin olarak, toplamda 15 UC'nin gönderdiği paket sayısı, ağ sunucusuna başarıyla iletilen paket sayısı ve paket iletim oranı (Packet Delivery Rate, PDR) gibi istatistiksel sonuçları sunmaktadır.

Çizelge 4.23. LoRaWAN® ağı üzerinden elde edilen ağ performansına yönelik istatistiksel değerlendirme sonuçları

Gönderilen Paket Sayısı	Başarılı İletim Sayısı	Başarılı İletim Yüzdesi
88.560	87.535	%98,84

4.2.2. Radyo Arayüz Benzetim Sonuçları ve Ölçüm Sonuçlarıyla Karşılaştırmalı Analizi

Şekil 3.8'de konumları gösterilen 15 UC için, LoRaWAN® sinyali, CloudRF® benzetim aracı kullanılarak ayrıca benzetime tabi tutulmuştur. Ağda iki adet GW bulunduğundan, LoRaWAN® ağ sunucusu, her bir UC'den iletilen mesaja karşılık, her iki GW'den alınan RSSI değerlerini karşılaştırarak en uygun GW'yi belirlemektedir. Bu nedenle, Çizelge 4.21'de UC'ler ve GW'ler arasında doğrudan bir eşleştirme yapılmamış olup, benzetimler Çizelge 4.24'te belirtildiği üzere, hem GW1 hem de GW2 için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.24, 15 UC için LOS, Okumura-Hata ve COST231-Hata yol kaybı modelleri kullanılarak elde edilen RSSI değerlerini sunmaktadır.

LOS modeli ile elde edilen tüm RSSI değerleri, Çizelge 2.5'de belirtilen referans alt sınır olan –141 dBm'in üzerinde bulunmuştur. Ancak, GW1 için Okumura-Hata ve COST231-Hata modelleriyle elde edilen RSSI değerleri arasında yalnızca UC1–UC7 ölçümleri bu sınırın üzerinde kalmıştır. Öte yandan, GW2 için aynı modellerle elde edilen sonuçlarda UC1, UC2, UC4, UC7–UC12, RSSI değerlerinin referans alt sınırın üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca, GW2 için COST231-Hata modeliyle elde edilen UC6 ve UC14 RSSI değerleri de alt sınırın üzerinde yer almakta; ancak Okumura-Hata modeli kullanıldığında, aynı noktalardaki RSSI değerlerinin alt sınırın altında kaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.24. Her iki GW için CloudRF® benzetim aracıyla elde edilen 15 UC'ye ait RSSI değerleri

UC	GW1 üzerinden LOS modeliyle elde edilen RSSI değerleri (dBm)	GW1 üzerinden Okumura-Hata modeliyle elde edilen RSSI değerleri (dBm)	GW1 üzerinden COST231-Hata modeliyle elde edilen RSSI değerleri (dBm)	GW2 üzerinden LOS modeliyle elde edilen RSSI değerleri (dBm)	GW2 üzerinden Okumura-Hata modeliyle elde edilen RSSI değerleri (dBm)	GW2 üzerinden COST231-Hata modeliyle elde edilen RSSI değerleri (dBm)
UC1	-52,1	-83,6	-71,2	-89,5	-134,3	-130,8
UC2	-60,8	-94,8	-80,1	-89,1	-133,5	-130
UC3	-78,4	-117,7	-114,2	-115,5	-162,4	-158,9
UC4	-82	-133	-129,4	-85,2	-125,3	-121,9
UC5	-78,6	-126,3	-121,4	-115,3	-162,4	-158,9
UC6	-52,9	-75,4	-69,4	-113,5	-158,3	-130,8
UC7	-56	-89,9	-86,7	-89,4	-134,2	-130,7
UC8	-90,8	-147,6	-144	-74,9	-118,9	-115,4
UC9	-90,8	-147,6	-144	-74,8	-118,7	-115,3
UC10	-90,8	-147,6	-144	-74,8	-118,7	-115,3
UC11	-90,8	-147,6	-144	-74,8	-118,7	-115,3
UC12	-90,8	-147,6	-144	-74,8	-118,7	-115,3
UC13	-97,3	-159	-155,5	-92,9	-150,7	-147,2
UC14	-116,6	-176,5	-173	-84,9	-143	-139,5
UC15	-98,3	-161,7	-158,1	-95,9	-158,5	-155

Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26, sırasıyla, GW1 ve GW2 için CloudRF® benzetim aracı kullanılarak elde edilen RSSI değerlerine ilişkin istatistiksel analiz sonuçlarını içermektedir. Bu çizelgeler, Çizelge 4.24 temel alınarak elde edilen maksimum, minimum, ortalama ve standart sapma değerlerini kapsamaktadır. Her iki çizelgede de, en yüksek RSSI değerleri, LOS yol yayılım modeli ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.25. CloudRF® benzetim aracı kullanılarak GW1 güzergâh analizi için elde edilen RSSI değerlerine ilişkin istatistiksel analiz sonuçları

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
RSSI (dBm) / LOS	-116,6	-52,1	-81,8	18,21
RSSI (dBm) / Okumura Hata	-176,5	-75,4	-130,39	30,23
RSSI (dBm) / Cost231-Hata	-173	-69,4	-125,27	32,41

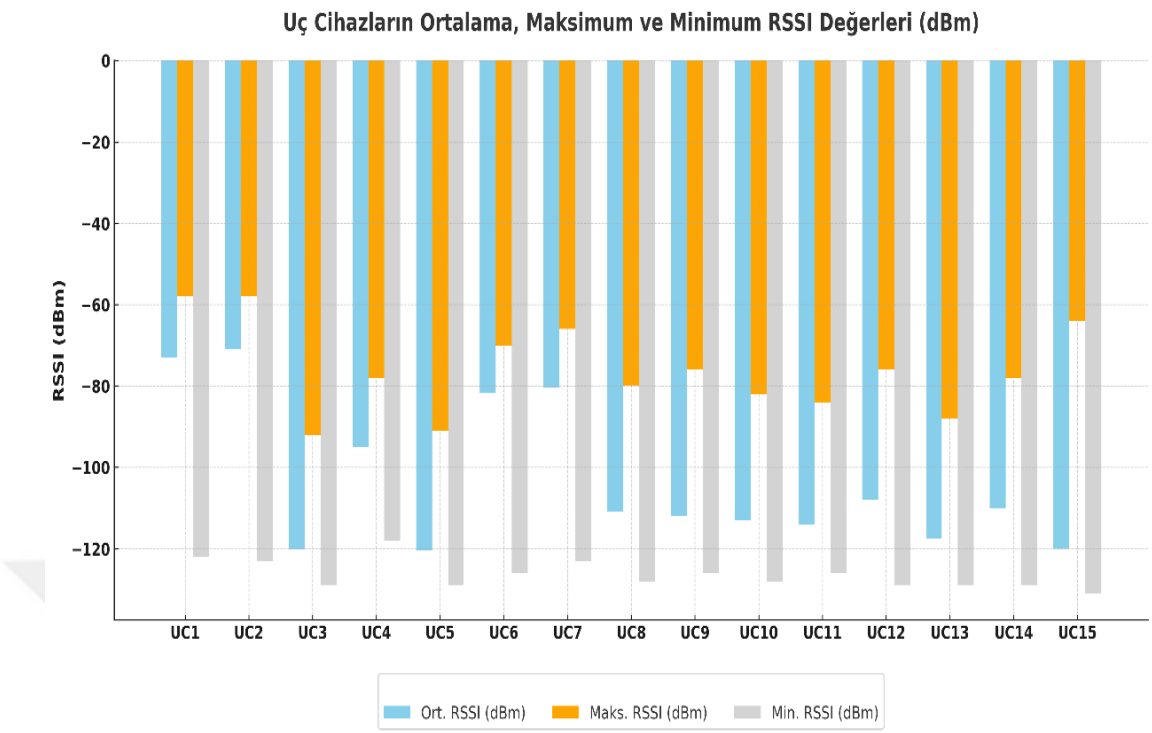
Çizelge 4.26. CloudRF® benzetim aracı kullanılarak GW2 güzergâh analizi için elde edilen RSSI değerlerine ilişkin istatistiksel analiz sonuçları

Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
RSSI (dBm) / LOS	-115,5	-74,8	-89,69	14,35
RSSI (dBm) / Okumura Hata	-162,4	-118,7	-137,09	16,85
RSSI (dBm) / Cost231-Hata	-158,9	-115,3	-132,02	15,84

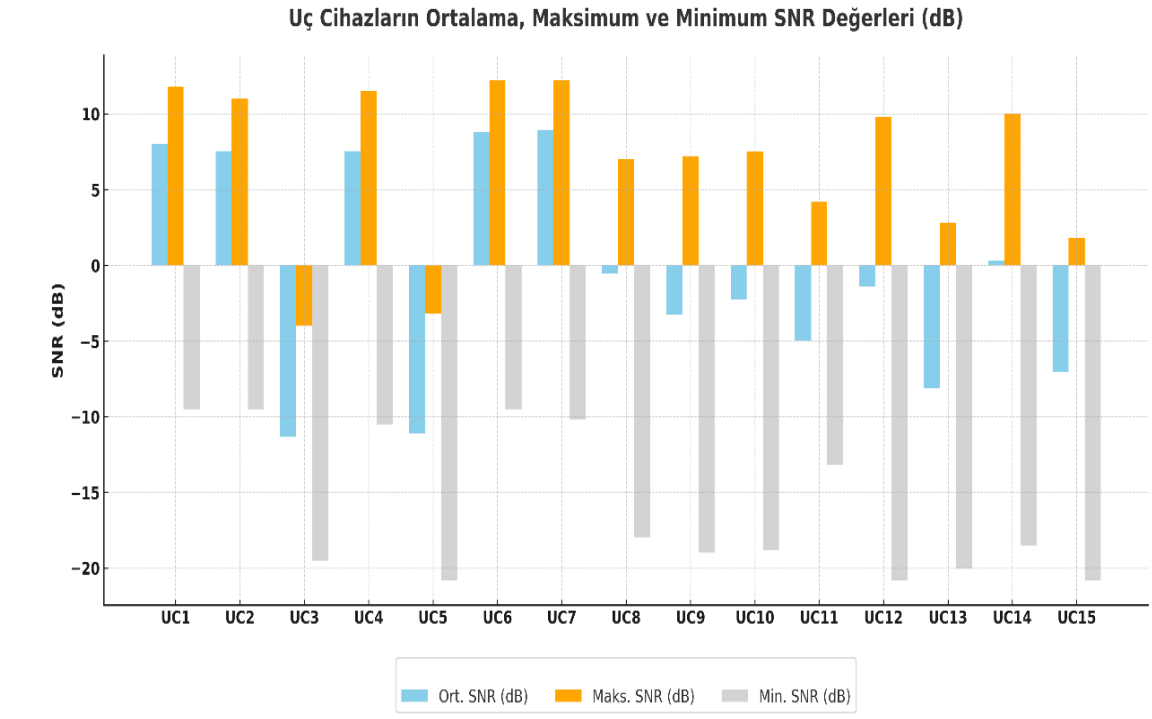
Araştırmanın her bir aşamasında elde edilen bulgular öncelikle ayrı ayrı analiz edilmiştir. Ardından, iki aşama birlikte ele alınarak değerlendirilmiştir. Çizelge 4.21'de gösterildiği üzere, LoRaWAN® ağ kurulumunun test alanındaki sinyal davranışı farklı karakteristikler sergilemektedir. 15 UC'den toplanan ortalama RSSI değerleri, -120,35 dBm ile -71 dBm arasında değişmektedir. Diğer önemli bir performans parametresi olan ortalama SNR değerleri ise, -11,31 dB ile 8,91 dB arasında değişmektedir. Tüm UC'ler için verilen değerlere göre, RSSI ve SNR için maksimum/minimum değerler, sırasıyla, -58 dBm/-131 dBm ve 12,2 dB/-20,8 dB olarak ölçülmüştür. Öte yandan, Çizelge 4.21'de sunulan bu sonuçlar, çoğunlukla Çizelge 3.6'da

gösterilen verici-alıcı (transceiver) ürün ailesi sınırlarıyla uyumludur. Ancak UC5, UC12 ve UC15 numaralı UC'ler için, elde edilen minimum SNR değerleri, bu uyumun dışında kalmaktadır. Bu tür istisnalar, kullanılan farklı verici-alıcı türlerinden kaynaklanmaktadır; çünkü bazı UC'lerde Microchip'in RN2483 LoRa verici-alıcısı da kullanılmaktadır. Referans sınırların altındaki daha düşük SNR değerleri gözlemlenmiş olsa da, bu değerler geçerli sonuçlar olarak değerlendirilmemiştir. Bu yaklaşım, literatürde bazı çalışmalarda da uygulandığı şekilde benimsenmiştir (Milanovic vd., 2007).

Ayrıca, Çizelge 4.24'te verilen benzetim sonuçları da, maksimum ve minimum RSSI değerleri arasında büyük farklar olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26'da sunulan benzetim sonuçlarına ait istatistiksel analizler de, ilgili farkların büyüklüğünü ortaya koymaktadır. Örneğin, GW1 için RSSI (dBm)/LOS maksimum-minimum değerler farkı 64,5 dB iken, GW2 için bu fark 40,8 dB olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, RSSI (dBm)/LOS için standart sapma değerleri, sırasıyla, Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26'de 18,21 ve 14,35 olarak yer almaktadır. Benzer bir durum, Çizelge 4.24-4.26'da verilen RSSI (dBm)/Okumura-Hata ve RSSI (dBm)/Cost231-Hata sonuçları için de geçerlidir. Örneğin, GW1 için RSSI (dBm)/Okumura-Hata maksimum-minimum değerler farkı 101,1 dB iken, GW2 için bu fark 43,7 dB olarak hesaplanmış; standart sapma değerleri, sırasıyla, Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26'da 30,23 ve 16,85 olarak yer almaktadır. Bunun yanında, GW1 için RSSI (dBm)/Cost231-Hata maksimum-minimum değerler farkı 103,6 dB iken, GW2 için bu fark 43,6 dB olarak hesaplanmıştır. Cost231-Hata için belirlenen standart sapma değerleri, sırasıyla, Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26'da 32,41 ve 15,84 olarak yer almaktadır.



Şekil 4.10. Ağdan elde edilen ortalama, maksimum ve minimum RSSI değerleri



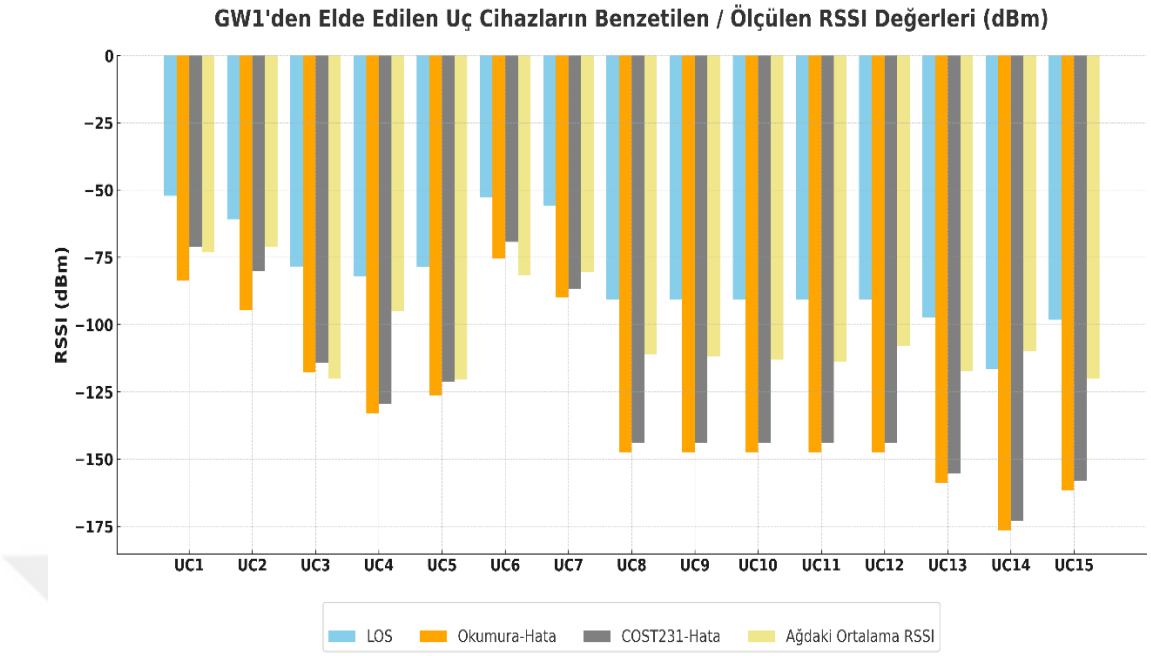
Şekil 4.11. UC'ler için ağ ölçümlerinden elde edilen ortalama, maksimum ve minimum SNR değerleri

UC'lerin konumlarının büyük bir şehir alanında yer alması ve bu konumların iç mekân, dış mekân, çatı, ağaçlı bahçe gibi farklı çevresel koşulları içermesi nedeniyle, hem gerçek ağ hem de benzetim sonuçlarında bu tür farkların oluşmasının normal olduğu değerlendirilmektedir. Şekil 4.10'da, 15 UC'nin ortalama, maksimum ve minimum RSSI değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.10'dan açıkça görülebileceği üzere, LoRaWAN® ağında maksimum ve minimum RSSI değerleri arasında büyük farklar olabilmektedir. Bazı UC'lerde, maksimum ve minimum RSSI değerleri arasındaki fark, 60 dB'nin üzerindedir; örneğin UC1 ve UC2 için bu durum geçerlidir. Şekil 4.11, 15 UC'ye ait ortalama, maksimum ve minimum SNR değerlerini göstermektedir. Şekil 4.11'den görülebileceği üzere, üç UC'de (UC5, UC12 ve UC15) SNR değerleri -20 dB' nin altındadır.

Çizelge 4.27, Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.24 verilerinden türetilmiştir. Çizelge 4.27'nin amacı, GW1 benzetimleri kapsamında ağdaki ölçümlerden elde edilen ortalama RSSI değerine en yakın benzetim değerini, bu değerin elde edildiği yayılım modelini ve en yakın benzetim değerinin ölçülen değerden yüzdesel sapma miktarını göstermektir. Yüzdesel sapma miktarı, ölçülen değerle en yakın benzetim değeri arasındaki farkın ölçülen değere oranı hesaplanarak elde edilmiştir. UC3 ve UC6 için en yakın değerler, Okumura-Hata modeliyle elde edilmiştir. UC1, UC2, UC5 ve UC7'de ise en yakın sonuçlar, COST231-Hata modeliyle alınmıştır. Diğer 9 UC'de ise, en yakın sonuçlar LOS yayılım modeli kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 4.27, ayrıca, her bir UC'ye en yakın GW'yi de göstererek, yayılım davranışı hakkında fikir vermeyi amaçlamaktadır.

Çizelge 4.27. GW1 benzetim sonuçlarının ağ ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması ve her bir UC için ölçüm sonucuna en yakın benzetim sonucunu veren yayılım modelinin belirlenmesi

UC	UC'ye en yakın GW	LOS benzetimi ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	Okumura-Hata benzetimi ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	COST231-Hata benzetimi ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	Ağ ölçümü ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	En yakın sonucu veren yayılım modeli	En yakın benzetim değerinin ölçülen RSSI değerinden sapma miktarı (%)
UC1	GW1	-52,1	-83,6	-71,2	-73	COST231-Hata	2,47
UC2	GW1	-60,8	-94,8	-80,1	-71	COST231-Hata	12,82
UC3	GW1	-78,4	-117,7	-114,2	-120,16	Okumura-Hata	2,05
UC4	GW1	-82	-133	-129,4	-95	LOS	13,68
UC5	GW1	-78,6	-126,3	-121,4	-120,35	COST231-Hata	0,87
UC6	GW1	-52,9	-75,4	-69,4	-81,68	Okumura-Hata	7,69
UC7	GW1	-56	-89,9	-86,7	-80,37	COST231-Hata	7,88
UC8	GW2	-90,8	-147,6	-144	-111	LOS	18,20
UC9	GW2	-90,8	-147,6	-144	-112	LOS	18,93
UC10	GW2	-90,8	-147,6	-144	-113	LOS	19,65
UC11	GW2	-90,8	-147,6	-144	-114,03	LOS	20,37
UC12	GW2	-90,8	-147,6	-144	-108	LOS	15,93
UC13	GW2	-97,3	-159	-155,5	-117,45	LOS	17,16
UC14	GW2	-116,6	-176,5	-173	-110	LOS	6
UC15	GW2	-98,3	-161,7	-158,1	-120	LOS	18,08



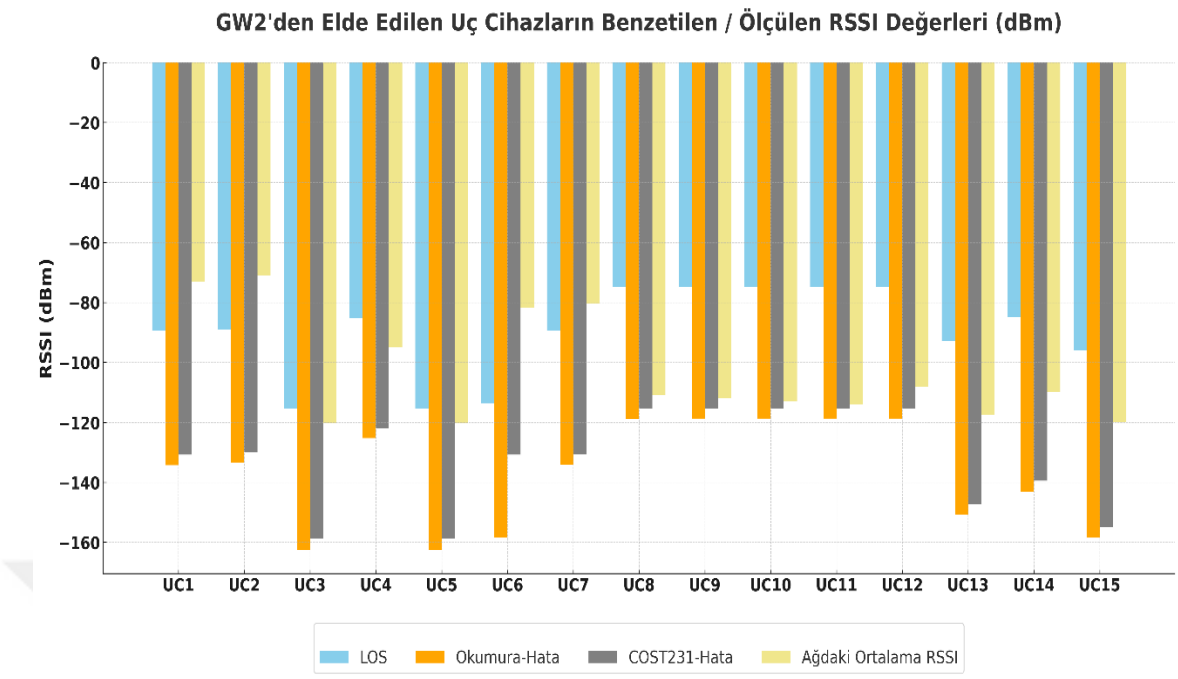
Şekil 4.12. GW1 üzerinden elde edilen UC'lere ait benzetimlerden/ölçümlerden bulunan ortalama RSSI değerleri

Şekil 4.12'den de görülebileceği üzere, ağdaki ortalama RSSI değeri ile benzetimlerden elde edilen RSSI değerinin en yakın olduğu cihaz ve benzetim modeli; UC14 için LOS modeli sonucu, UC1, UC5, UC7 için COST231-Hata model sonucu, UC3 için ise Okumura-Hata modelinin sonucu olmuştur.

Çizelge 4.28, Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.24 verilerinden türetilmiştir. Çizelge 4.28'in amacı, GW2 benzetimleri kapsamında ağ ölçümlerinden elde edilen ortalama RSSI değerine en yakın benzetim değerini, bu değerin elde edildiği yayılım modelini ve en yakın benzetim değerinin ölçülen değerden yüzdesel sapma miktarını göstermektir. Yüzdesel sapma miktarı, ölçülen değerle en yakın benzetim değeri arasındaki farkın ölçülen değere oranı hesaplanarak elde edilmiştir. UC8-UC12 için en yakın değerler, COST231-Hata modeliyle elde edilmiştir. UC1-UC7 ve UC13- UC15'te ise en yakın sonuçlar, LOS yayılım modeliyle alınmıştır. Çizelge 4.28, ayrıca, her bir UC'ye en yakın GW'yi de göstererek, yayılım davranışı hakkında fikir vermeyi amaçlamaktadır.

Çizelge 4.28. GW2 benzetim sonuçlarının ağ ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması ve her bir UC için ölçüm sonucuna en yakın benzetim sonucunu veren yayılım modelinin belirlenmesi

UC	UC'ye en yakın GW	LOS benzetimi ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	Okumura-Hata benzetimi ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	COST231-Hata benzetimi ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	Ağ ölçümü ile elde edilen ortalama RSSI (dBm)	En yakın sonucu veren yayılım modeli	En yakın benzetim değerinin ölçülen RSSI değerinden sapma miktarı (%)
UC1	GW1	-89,5	-134,3	-130,8	-73	LOS	22,60
UC2	GW1	-89,1	-133,5	-130	-71	LOS	25,49
UC3	GW1	-115,5	-162,4	-158,9	-120,16	LOS	3,88
UC4	GW1	-85,2	-125,3	-121,9	-95	LOS	10,32
UC5	GW1	-115,3	-162,4	-158,9	-120,35	LOS	4,20
UC6	GW1	-113,5	-158,3	-130,8	-81,68	LOS	38,96
UC7	GW1	-89,4	-134,2	-130,7	-80,37	LOS	11,24
UC8	GW2	-74,9	-118,9	-115,4	-111	COST231 -Hata	3,96
UC9	GW2	-74,8	-118,7	-115,3	-112	COST231 -Hata	2,95
UC10	GW2	-74,8	-118,7	-115,3	-113	COST231-Hata	2,04
UC11	GW2	-74,8	-118,7	-115,3	-114,03	COST231 -Hata	1,11
UC12	GW2	-74,8	-118,7	-115,3	-108	COST231 -Hata	6,76
UC13	GW2	-92,9	-150,7	-147,2	-117,45	LOS	20,90
UC14	GW2	-84,9	-143	-139,5	-110	LOS	22,82
UC15	GW2	-95,9	-158,5	-155	-120	LOS	20,08



Şekil 4.13. GW2 üzerinden elde edilen UC'lere ait benzetimlerden/ölçümlerden bulunan ortalama RSSI değerleri

Şekil 4.13'te, GW2 için üç farklı yayılım modeliyle elde edilen karşılaştırmalı RSSI benzetim sonuçları ile ağdaki ölçüm sonuçlarından elde edilen ilgili ortalama RSSI sunulmaktadır. Şekil 4.13'e göre, UC6 hariç, tüm UC'lerde COST231-Hata ve Okumura-Hata modeli sonuçları birbirine oldukça yakındır. UC1, UC2, UC6 ve UC7 hariç tutulduğunda, LOS yayılım modeliyle elde edilen RSSI değerlerinin tamamı, ağ ölçümlerinden elde edilen ortalama RSSI değerlerinin üzerindedir. Ayrıca, ağ ölçümlerinden elde edilen tüm ortalama RSSI değerleri, Okumura-Hata ve COST231-Hata modeli sonuçlarından daha yüksektir. Bununla birlikte, UC8 ile UC12 arasındaki UC'ler için, bu üç değer, diğer UC'lere kıyasla birbirine en yakın seviyededir. Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.28'deki veriler birlikte değerlendirildiğinde, toplam 30 sonuç arasında ölçülen değerlere en yakın benzetim sonuçları; 2 durumda Okumura-Hata modeli, 9 durumda COST231-Hata modeli ve 19 durumda LOS yayılım modeli tarafından elde edilmiştir.

Çizelge 4.29. Benzetimlerde kullanılabilecek en uygun yayılım modeli ile UC'lerin konum özellikleri arasındaki ilişki

UC	UC'ye en yakın GW	UC Kurulum Yüksekliği	UC Konumu Hakkında Çevresel Bilgi	En Uygun Yayılım Modeli
UC1	GW1	$h_{UC} = [4-6]$ m	İçortam/Ofis, apartman, duvar ve koridorlar	COST231-Hata
UC2	GW1	$h_{UC} = [4-6]$ m	İçortam/Ofis, apartman, duvar ve koridorlar	COST231-Hata
UC3	GW1	$h_{UC} = [3-5]$ m	Dışortam/ Bina dış yüzeyi	Okumura-Hata
UC4	GW1	$h_{UC} = [30-33]$ m	Dışortam/ Kule tepesi	LOS
UC5	GW1	$h_{UC} = [10-12]$ m	İçortam/ Köprü	COST231-Hata
UC6	GW1	$h_{UC} = [4-6]$ m	Dışortam/ Bina dış yüzeyi	Okumura-Hata
UC7	GW1	$h_{UC} = [4-6]$ m	İçortam/Bina	COST231-Hata
UC8	GW2	$h_{UC} = [8-10]$ m	İçortam/Kongre Salonu	COST231-Hata
UC9	GW2	$h_{UC} = [8-10]$ m	İçortam/Kongre Salonu	COST231-Hata
UC10	GW2	$h_{UC} = [8-10]$ m	İçortam/Kongre Salonu	COST231-Hata
UC11	GW2	$h_{UC} = [8-10]$ m	İçortam/Kongre Salonu	COST231-Hata
UC12	GW2	$h_{UC} = [8-10]$ m	İçortam/Kongre Salonu	COST231-Hata
UC13	GW2	$h_{UC} = 20$ cm	Dışortam/Düşük yoğunluklu ortam, ağaçlık ve bahçe	LOS
UC14	GW2	$h_{UC} = 20$ cm	Dışortam/Düşük yoğunluklu ortam, ağaçlık ve bahçe	LOS
UC15	GW2	$h_{UC} = 50$ cm	Dışortam/Düşük yoğunluklu ortam, ağaçlık ve bahçe	LOS

Çizelge 4.29, ölçülen ağ değerlerine en yakın benzetim sonuçlarını veren en uygun yayılım modeli ile UC konum özellikleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu özellikler arasında, ilgili UC'ye en yakın GW, UC kurulum yüksekliği ve UC'nin bulunduğu konumun çevresel özellikleri yer almaktadır. Çizelge 4.29'da görüldüğü üzere, UC4 ile UC13–UC15 için en uygun yayılım modeli, LOS (Line-of-Sight) modeli olarak belirlenmiştir. Bu UC'lerin açık alanlarda yer alması nedeniyle, UC'lerin dış mekânda çalıştığı durumlarda, ağ planlaması için LOS modelinin tercih edilebileceği sonucuna

varılabilir. UC3 ve UC6 için, Okumura-Hata yayılım modeli, en uygun model olarak gözlemlenmiştir. Bu iki UC, binaların dış yüzeyinde konumlandırılmış olup UC ile GW arasında engellerin bulunduğu alanlardadır. Bu nedenle, dış ortam uygulamalarındaki UC ile GW arasında engellerin bulunduğu durumlarda, ağ planlaması için Okumura-Hata modelinin uygun bir seçenek olabileceği söylenebilir. UC1, UC2, UC5 ve UC7–UC12 numaralı UC'ler için, en uygun yayılım modeli COST231-Hata modeli olarak belirlenmiştir. Bu UC'lerin tamamı kapalı alanlarda konumlandırıldığından, kapalı alan koşullarındaki ağ planlaması için, COST231-Hata yayılım modelinin en uygun model olduğu ifade edilebilir.

5. SONUÇ

Bu doktora tezinde, farklı ortamlarda (bina içi aynı kat ve çok katlı yapılarda; bina içi katlar arası uygulamalar; bini içi ve bina dışı karma ortam uygulamaları) kurulan LoRaWAN® ağlarının performansı; RSSI, SNR, SF dağılımları ve mesaj iletim başarı oranları gibi parametreler temel alınarak kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, ağırlıklı olarak açık ortam uygulamalarında tercih edilen LoRaWAN® teknolojisinin, özellikle kentsel ortamlarda sinyal zayıflaması ve fiziksel engellere rağmen düşük güçlü iletişim yeteneklerini sürdürebileceğini ortaya koymuştur.

Çok katlı yapılarda bina içi katlar arası LoRaWAN® ağı performans analizi sonuçları, temel su tüketimi parametrelerinin, gerekli iyileştirmelerle birlikte şehir içinde uygulanan LoRaWAN® teknolojisi kullanılarak günlük olarak ve uzaktan izlenebileceğini göstermektedir. LoRaWAN® ağ performansının analizinde kullanılan başlıca parametreler RSSI, SNR, SF ve UC yukarı yön mesajlarıdır. Bu nedenle, yapılacak ağ iyileştirmelerinde bu parametrelere odaklanması gerektiği anlaşılmaktadır. Araştırmada ortalama RSSI değeri -108,16 dBm, ortalama SNR değeri ise -5,87 dB olarak tespit edilmiştir.

Bina içi aynı katta kurulu LoRaWAN® ağ performans analizi neticesinde, elde edilen SF, SNR ve RSSI verileri kullanılarak, MATLAB® eğri uydurma yöntemi ile SNR ve RSSI arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu ilişkiyi tanımlayan ampirik denklemler, polinom, Fourier ve Gauss regresyon modelleri kullanılarak türetilmiştir. SNR-RSSI ilişkisinin, R^2=0,9362 ve RMSE=0,2440 ile ağdan elde edilen verilere en yüksek uyum iyiliği gösteren 9. dereceden bir polinom yardımıyla ifade edilebildiği belirlenmiştir. Regresyon modellerinden elde edilen karşılaştırmalı uyum iyiliği sonuçları Çizelge 5.1 ile verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, bina içi LoRaWAN® ağlarında sabit SF durumlarında SNR-RSSI ilişkisini modellemeyi amaçlayan çalışmalar için referans olma özelliğindedir. Ayrıca, sabit SF değerli ve kabul edilebilir paket kayıp oranlı (bu çalışmada tespit edilen % 15 ve altındaki oranlara sahip) iç ortam ağ planlamalarında, bu çalışmada elde edilen eğri formüllerinin referans alınabileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 5.1. Polinom, Fourier ve Gauss regresyon modellerinden elde edilen karşılaştırmalı uyum iyiliği sonuçları

Regresyon modeli	SSE	R^2	Adj-R^2	RMSE
Polinom	9,2273	0,9362	0,9325	0,2440
Fourier	22,3050	0,8459	0,8280	0,3895
Gauss	20,6652	0,8572	0,8339	0,3828

Bina içi ve bina dışı karma ortam LoRaWAN® ağ performansı için, kentsel bir LoRaWAN® ağı içerisinde RSSI ve SNR değerleri analiz edilmiştir. İlk olarak, Bursa şehir merkezinde yer alan 40 km^2'lik bir test alanında, 15 UC ve 2 GW'den oluşan bir LoRaWAN® ağı kurulmuştur. Ağ sunucusundan RSSI ve SNR ölçüm sonuçları toplanmıştır. Ardından, LOS, Okumura-Hata ve COST231-Hata yayılım modelleri kullanılarak CloudRF® kablosuz planlama ve benzetim aracı ile RSSI benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları, ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. LoRaWAN® ağ sunucusundan elde edilen maksimum RSSI değeri -58 dBm, minimum RSSI değeri ise -131 dBm'dir. Aynı ağda gözlemlenen maksimum SNR değeri 12,2 dB, minimum SNR değeri ise -20,8 dB olarak kaydedilmiştir. CloudRF® yazılım aracıyla yapılan RSSI benzetimleri sayesinde, kentsel alandaki LoRaWAN® sinyalleri için her biri farklı konum ve çevre özelliklerine sahip 15 UC özelinde, LOS, Okumura-Hata ve COST231-Hata modelleri arasında, ölçüm sonuçlarına en yakın benzetim sonuçlarını veren yayılım modeli belirlenmiştir. Bu karşılaştırmada, 15 uç cihazın 4'ü için en iyi sonuçları LOS modeli, 2'si için Okumura-Hata modeli, 9'u için ise COST231-Hata modeli sağlamıştır.

Her bir UC'nin konumu ve çevresel özellikleri ile bu cihazlar için en uygun görülen yayılım modeli birlikte değerlendirildiğinde; üç yayılım modeli arasında açık alan uygulamaları için en uygun modelin LOS; engelli dış ortam uygulamaları için Okumura-Hata; kapalı alan uygulamaları için ise COST231-Hata modeli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, yalnızca toplanan veriye değil, aynı zamanda UC

konumu, yüksekliği ve çevresel parametreler gibi farklı etkenlerin de dikkate alındığı karşılaştırmalı analizlere dayanmaktadır.

Bu doktora çalışmasının bilime katkıları aşağıda sıralanmıştır:

1. LoRaWAN® ağlarında SF, SNR, RSSI ve paket kaybı parametreleri arasındaki çok değişkenli ilişki ilk kez bütünleşik bir model ile değerlendirilmiş; ilişkilerin ağ verimliliği üzerindeki etkileri gösterilmiştir.
2. Literatürdeki benzetim tabanlı çalışmalardan farkı olarak; yayılım modeli tabanlı benzetimler yapılmış ve yapılan bu benzetimlerin saha ölçümlerinden elde edilen verilerle karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir.
3. LORAWAN® tabanlı LPWAN sistemleri için, SNR ve RSSI parametrelerinin eşzamanlı optimizasyonu ve ağ tasarımı konularında çalışan/çalışacak araştırmacılara rehberlik edebilecek öneriler ortaya konmuştur.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar şunlardır;

1. LoRaWAN dışındaki diğer LPWAN teknolojilerini benzer koşullar altında inceleyerek kapsamlı karşılaştırmalı ağ performans analizleri gerçekleştirmek; bu sayede farklı kullanım senaryoları için en verimli ağ teknolojisinin belirlenmesine yönelik bilimsel bir temel oluşturmak.
2. Yerli bir LPWAN protokolünün yazılım ve donanım altyapısını tasarlayarak çalışır durumda bir sistem haline getirmek; bu çalışma ile ulusal haberleşme teknolojileri ekosistemine katkı sağlamak.
3. Uydu üzerinden LPWAN servislerinin olanaklarını araştırarak bu alanda yerli ürün ve çözümler geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütmek.
4. Daha büyük ölçekli ağlarda güvenlik, enerji verimliliği ve ağ performansı üzerine derinlemesine analizler yaparak yeni nesil LoRaWAN® ağ modelleri tasarlamak ve geliştirmek.
5. LoRaWAN® ve diğer LPWAN teknolojilerinin 4G, 5G ve 6G gibi mobil hücresel haberleşme teknolojileriyle birlikte çalışabilirliğini araştırmak ve bu doğrultuda hibrit ağ mimarileri geliştirmek.

6. IoT sistemleri aracılığıyla toplanan büyük veriyi analiz ederek makine öğrenmesi ve yapay zeka tabanlı IoT uygulamalarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürütmek.

KAYNAKLAR

Aksoy, A., Yıldız, Ö., & Karlık, S. E. (2024). Comparative analysis of end device and field test device measurements for RSSI, SNR and SF performance parameters in an indoor LoRaWAN® network. *Wireless Personal Communications*, 134(1), 339-360. https://doi.org/10.1007/s11277-024-10911-z

Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology*, 22(1), 3-21. https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092

Alipio, M., ve Bures, M. (2024). Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN® in IoT applications: Classification, issues, and future directives. *Internet of Things*, 25, 101053. https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101053

Al-Sarawi, S., Anbar, M., Abdullah, R., & Al Hawari, A. B. (2020). Internet of Things market analysis forecasts, 2020–2030. *2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)*, Birleşik Krallık, pp. 449-453, http://dx.doi.org/10.1109/WorldS450073.2020.9210375

Amin, M. A. (2020). WOLFF: A LoRa-based network architecture to extend internet service in remote areas (Yüksek Lisans Tezi) *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 28087770).

Andrianingsih, A., Wibowo, E. P., Wirawan, S., Enriko, I. K. A., & Harahap, R. K. (2024). Experimental visualization of the LoRaWAN® variable correlation in Jakarta. *IEEE Access*, 12, 22978-22990. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3362634

Arratia, B., Rosas, E., Calafate, C. T., Cano, J. C., Cecilia, J. M., & Manzoni, P. (2024). AlLoRa: Empowering environmental intelligence through an advanced LoRa-based IoT solution. *Computer Communications*, 218, 44-58. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.02.014

Bagherian, M. H., Tehrani, Y. H., & Atarodi, S. M. (2025). Enhancing LoRaWAN® localization efficiency: Leveraging machine learning and optimized parameter tuning for a 60% improvement. *Measurement*, 242, 116064. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116064

Bansal, A. (2024). Pushing the accuracy and range limits of wireless localization systems (Doktora Tezi) ProQuest Dissertations & Theses Global veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 3097626349).

Behjati, M., Mohd Noh, A. B., Alobaidy, H. A. H., Zulkifley, M. A., Nordin, R., & Abdullah, N. F. (2021). LoRa communications as an enabler for internet of drones towards large-scale livestock monitoring in rural farms. *Sensors*, 21(15), 5044. https://doi.org/10.3390/s21155044

Bhat, S. A., Huang, N. F., Hussain, I., & Sajjad, U. (2023). Correlating the ambient conditions and performance indicators of the LoRaWAN® via surrogate Gaussian process-based bidirectional LSTM stacked autoencoder. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 20(3), 3413-3427. https://doi.org/10.1109/TNSM.2023.3238013

Bhavanam, B. P. R., & Ragam, P. (2025). LoRa sense: Sensing and optimization of LoRa link behavior using path-loss models in open-cast mines. *Computer Modeling in*

Engineering & Sciences, 142(1), 425–466. https://doi.org/10.32604/cmes.2024.052355

Bor, M. C. (2020). Towards the efficient use of LoRa for wireless sensor networks (Doktora Tezi). Erişim adresi: https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/141920/1/2020borphd.pdf

Bor, M., Vidler, J., Roedig, U. (2016). LoRa for the Internet of Things. *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN '16)*, 361–366. https://dl.acm.org/doi/10.5555/2893711.2893802

Bouguera, T., Diouris, J.-F., Chaillout, J.-J., Jaouadi, R., & Andrieux, G. (2018). Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN®. *Sensors*, 18(7), 2104. https://doi.org/10.3390/s18072104

Buurman, B., Kamruzzaman, J., Karmakar, G., & Islam, S. (2020). Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. *IEEE Access*, 8, 17179-17220. https:/doi.org/ 10.1109/ACCESS.2020.2968057

Casals, L., Mir, B., Vidal, R., & Gomez, C. (2017). Modeling the energy performance of LoRaWAN®. *Sensors*, 17(10), 2364. https://doi.org/10.3390/s17102364

Centelles, R. P., Meseguer, R., Freitag, F., Viñas, R. B., & Navarro, L. (2024). A minimalistic distance-vector routing protocol for LoRa mesh networks. *IEEE Access*, 12, 128941-128962. https://doi:10.1109/ACCESS.2024.3443605

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. doi: 10.1109/MWC.2016.772174

Chaudhari B. S., & Zennaro, M. (2020). *Introduction to low-power wide-area networks*, Editor: Bharat S. Chaudhari, Marco Zennaro (Ed.), LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications, (s. 1-13) içinde. Yer: Academic Press

Chaudhari, B. S., Zennaro, M., & Borkar, S. (2020). LPWAN technologies: emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet*, 12(3), 46. https://doi.org/10.3390/fi12030046

CloudRF® (2025, 1 Kasım). Supported Technologies. https://cloudrf.com/about/

Costa, B.A.D.S. (2018). IoT network – design and implementation. (Yüksek Lisans Tezi) Lizbon Politeknik Üniversitesi veri tabanından erişildi (Erişim: http://hdl.handle.net/10400.21/10166)

Cotrim, R., Assis, F., dos Santos Brito, A., Peixouto, Y. S., & Peixouto, L. S. (2024). Multi-Hop LoRa-based underground network for monitoring soil moisture in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109592. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109592

da Rocha Santos, L. C., Bruschi, S. M., de Souza, P. S. L., Ueyama, J., dos Santos, A. D. J., & Barbosa, J. S. (2024). Performance analysis of a vehicular Ad-Hoc network using LoRa technology and IoT devices in Amazon rivers. *Ad Hoc Networks*, 152, 103301. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103301

DASH7 (2025, 1 Kasım). DASH7 Alliane Protocol. https://www.dash7-alliance.org/#technology

Datasheet Kerlink (2025, 1 Kasım). Wirnet Station 868, LoRaWAN® gateway for IoT chain.

https://www.thethingsnetwork.org/forum/uploads/default/original/1X/1be8efc08586c0bb5676689df122a3628fe3e0e1.pdf

Datasheet Microchip. (2021, 1 Kasım). Low-power long range LoRa technology transceiver module. https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-DS50002346F.pdf

Datasheet RAK Wireless. (2025, 1 Kasım). Wisgate developer D0 gateway datasheet. https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Datasheet/

Datasheet Semtech. (2025, 1 Kasım). SX1272/3 datasheet, 2017. https://datasheet4u.com/share_search.php?sWord= %20SX1272/3

Datasheet Skymot1. (2025, 1 Kasım). Motion acceleation monitoring device. https://store.gsl.com.tr/class/INNOVAEditor/assets/Motion_Module_SKYMOT1_ACC_Datasheet_v104.pdf.

Dunnala, S. H. (2018). Design, implementation and testing of paper-printed LoRa modules: Enabling the internet of things (Yüksek Lisans Tezi). ProQuest Dissertations & Theses Global veri tabanından erişildi. (Sipariş No:10823791)

Edward, P., El-Aasser, M., Ashour, M., & Elshabrawy, T. (2020). Interleaved chirp spreading LoRa as a parallel network to enhance LoRa capacity. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3864-3874, https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3027100

El Fehri, C., Baccour, N., & Kammoun, I. (2023). A new schedule-based scheme for uplink communications in LoRaWAN®. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 4, 2815-2829, https://doi:10.1109/OJCOMS.2023.3321875

El Khaled, Z., Ajib, W., & Mcheick, H. (2020). An accurate empirical path loss model for heterogeneous fixed wireless networks below 5.8 GHz frequencies. *IEEE Access*, 8, 182755-182775. https://doi:10.1109/ACCESS.2020.3023141

Ependi,U., Rochim, A. F. & Wibowo, A. (2022). Smart city assessment for sustainable city development on smart governance: A systematic literature review, *2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, Tayland, 1088-1097, https://doi:10.1109/DASA54658.2022.9765192

Fourtet C. & Ponsard B. (2020). *An introduction to Sigfox radio system*, Editor: Bharat S. Chaudhari, Marco Zennaro (Ed.), LPWAN technologies for IoT and M2M applications, (s. 103-118) içinde. Yer: Academic Press

Gorrela, A., & Choudhury, N. (2025). A clustering-based adaptive data rate technique for industrial LoRaWAN®-IoT networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(6), 6506-6518. https://doi:10.1109/JIOT.2024.3492233

Harinda, E., Hosseinzadeh, S., Larijani, H., & Gibson, R. M. (2019). Comparative performance analysis of empirical propagation models for LoRaWAN® 868mhz in an urban scenario. *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, İrlanda, 154-159. https://doi:10.1109/WF-IoT.2019.8767245

Haxhibeqiri, J., De Poorter, E., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). A survey of LoRaWAN® for IoT: from technology to application. *Sensors*, 18(11), 3995. https://doi.org/10.3390/s18113995

Haxhibeqiri, J., Karaagac, A., Van den Abeele, F., Joseph, W., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2017). LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study. *2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and*

factory automation (ETFA), Güney Kıbrıs Rum Cumhuriyeti, 1-8. https://doi:10.1109/ETFA.2017.8247601

Ibrahim, D. M. (2019). Internet of Things technology based on LoRaWAN® revolution. *2019 10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, Ürdün 234-237. https://doi:10.1109/IACS.2019.8809176

Ingabire, W., Larijani, H., & Gibson, R. M. (2020). Performance evaluation of propagation models for LoRaWAN® in an urban environment. *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)* Türkiye, 1-6. https://doi:10.1109/ICECCE49384.2020.9179234

Ingenu. (2025, 1 Kasım). Ingenu Technology, https://www.ingenu.com/technology/

Islam, K. Z., Murray, D., Diepeveen, D., Jones, M. G., & Sohel, F. (2024). LoRa localisation using single mobile gateway. *Computer Communications*, 182-193. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.03.012

ITU. (2021, 1 Kasım). ITU-T Recommendations: Low power protocol for wide area wireless networks, https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=14818&lang=en

Jouhari, M., Saeed, N., Alouini, M. S., & Amhoud, E. M. (2023). A survey on scalable LoRaWAN® for massive IoT: recent advances, potentials, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(3), 1841-1876, https://doi:10.1109/COMST.2023.3274934

Kaur, G., Balyan, V., & Gupta, S. H. (2024). Experimental analysis of low-duty cycle campus deployed IoT network using LoRa technology. *Results in Engineering*, 23, 102844. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102844

Khanderay, R. B., & Kemkar, O. (2021). Analysis of LoRa framework in IoT technology. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Machine Vision (AIMV)* Hindistan, 1-4. https://doi.org/10.1109/AIMV53313.2021.9670961

Khutsoane, O., Isong, B., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN®. *2017 IEEE 43rd Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON)*, Çin, 6107-6112 https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217061

Kim, S., Lee, H., & Jeon, S. (2020). An adaptive spreading factor selection scheme for a single channel LoRa modem. *Sensors*, *20*(4), 1008. https://doi.org/10.3390/s20041008

Lopez Chalacan, V. H. (2020). Performance evaluation of long range (LoRa) wireless RF technology for the internet of things (IoT) using Dragino LoRa at 915 MHz (Yüksek Lisans Tezi) *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 28392144).

LoRa (2025, 1 Kasım). Modulation Types and Chirp Spread Spectrum https://lora.readthedocs.io/en/latest/

LoRa Alliance® Achieves (2025, Kasım 1). LoRa Alliance® achieves 66% growth in public LoRaWAN® networks over past 3 years. https://resources.lora-alliance.org/home/lora-alliance-achieves-66-growth-in-public-lorawan-networks-over-past-3-years

LoRa Alliance® Applications (2025, 1 Kasım). What is LoRaWAN® Specification? https://lora-alliance.org/about-LoRaWAN®

LoRa Teknik Yazı (2025, 1 Kasım). LoRa: Kablosuz Haberleşmenin Yükselen Yıldızı. https://gsl.com.tr/lora-kablosuz-haberlesmenin-yukselen-yildizi.html

Mahjoub, T., Mnaouer, A. B., Said, M. B., & Boujemaa, H. (2024). LoRa signal propagation and path loss prediction in Tunisian date palm oases. *Computers and Electronics in Agriculture*, 222, 109027. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109027

Marais, J. M. (2018). Construction and performance valuation of a LoRaWAN® testbed (Yüksek Lisans Tezi) *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 30710283).

Margelis, G., Piechocki R., Kaleshi D. & Thomas P. (2015). Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations, *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, İtalya, 181-186, https://doi:10.1109/WF-IoT.2015.7389049

Masoudi, M., Azari, A., & Cavdar, C. (2021). Low power wide area IoT networks: Reliability analysis in coexisting scenarios. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(7), 1405-1409. https://doi:10.1109/LWC.2021.3068815

Matlab Help Center Curve. (2025, 1 Kasım). Curve fitting toolbox. https://www.mathworks.com/help/curvefit/index.html?s_tid=CRUX_lftnav

Matlab Help Center Evaluating. (2025, 1 Kasım). Evaluating goodness of fit. https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html

Matlab Help Center Goodness. (2025, 1 Kasım). Goodness of fit. https://www.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html?s_tid=doc_ta

Matlab Help Center RMSE. (2025, 1 Kasım). RMSE. https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rmse.html?s_tid=doc_ta

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

Mendes, B. (2022). Optimal deployment of mobile gateways in LoRaWAN® environments (Yüksek Lisans Tezi). *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 3110361006)

Migabo, E. M., Djouani, K. D., & Kurien, A. M. (2020). The narrowband Internet of Things (NB-IoT) resources management performance state of art, challenges, and opportunities. *IEEE Access*, 8, 97658-97675. https://doi:10.1109/ACCESS.2020.2995938

Milanovic, J., Rimac-Drlje, S., & Bejuk, K. (2007). Comparison of propagation models accuracy for WiMAX on 3.5 GHz, *14th IEEE international conference on electronics, circuits and systems, Fas*, 111-114, https//doi:10.1109/ICECS.2007.4510943

Milarokostas, C., Tsolkas, D., Passas, N., & Merakos, L. (2022). A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems. *IEEE communications Surveys & Tutorials*, 25(1), 825-867. https://doi:10.1109/COMST.2022.3229846

Miles, B., Bourennane, E. B., Boucherkha, S., & Chikhi, S. (2020). A study of LoRaWAN® protocol performance for IoT applications in smart agriculture. *Computer Communications*, 164, 148-157. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.10.009

Navarro-Ortiz, J., Sendra, S., Ameigeiras, P., & Lopez-Soler, J. M. (2018). Integration of LoRaWAN® and 4G/5G for the Industrial Internet of Things. IEEE Communications Magazine, 56(2), 60-67.

https://doi:10.1109/MCOM.2018.1700625
Pasolini, G. (2022). On the LoRa chirp spread spectrum modulation: Signal properties and their impact on transmitter and receiver architectures. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(1), 357–369. https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3095667
Patel, D. (2018). Low power wide area networks (LPWAN): Technology review and experimental study on mobility effect. (Yüksek Lisans Tezi) *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 10930452).
Patel, D., & Won, M. (2017). Experimental study on low power wide area networks (LPWAN) for mobile Internet of Things. *2017 IEEE 85th vehicular technology conference (VTC Spring)*, Avustralya, 1-5. https://doi:10.1109/VTCSpring.2017.8108501
Pérez, M., Sierra-Sánchez, F. E., Chaparro, F., Chaves, D. M., Paez-Rueda, C. I., Galindo, G. P., & Fajardo, A. (2022). Coverage and energy-efficiency experimental test performance for a comparative evaluation of unlicensed lpwan: LoRaWAN® and sigfox. IEEE Access, 10, 97183-97196. https://doi:10.1109/ACCESS.2022.3206030
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), 1–16. https://doi.org/10.1177/1550147717699412
Pham, C.-D, Bounceur, A., Clavier, L., Noreen, U. Ehsan, M. (2020). Radio channel access challenges in LoRa low-power wide-area networks. Bharat S. C. ve Zennaro M. (Ed), LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications (s. 65-102) içinde. https://doi:10.1016/B978-0-12-818880-4.00004-1
RF Wireless World (2025, 1 Kasım). LoRa Sensitivity Calculator and Formula. https://www.rfwireless-world.com/calculators/lora-sensitivity-calculator
Qadir, Q. M., Rashid, T. A., Al-Salihi, N. K., Ismael, B., Kist, A. A., & Zhang, Z. (2018). Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs. *IEEE Access*, 6, 77454-77473. https://doi:10.1109/ACCESS.2018.2883151
Qin, Z., Li, F. Y., Li, G. Y., McCann, J. A., & Ni, Q. (2019). Low-power wide-area networks for sustainable IoT. *IEEE Wireless Communications*, 26(3), 140-145. https://doi:10.1109/MWC.2018.1800264
Rahman, M. M. (2020). Low-power wide-area network design (Doktora Tezi). *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 28023272)
Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855-873. https://doi:10.1109/COMST.2017.2652320
Reynders, B., & Pollin, S. (2016). Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. *2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT), Belçika*, 1-5. https://doi.org/10.1109/SCVT.2016.7797659
Rodriguez, A. (2024). Designing multi-scale public IoT systems (Doktora Tezi). *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 31489612)
Saban, M., Aghzout, O., Medus, L. D., & Rosado, A. (2021). Experimental analysis of IoT networks based on LoRa/LoRaWAN® under indoor and outdoor environments: Performance and limitations. *IFAC-PapersOnLine*, 54(4), 159–164.

https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.027
Sadhukhan, P. (2018). An IoT based framework for smart city services. *2018 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT), Hindistan,* 376-379, https://doi:10.1109/IC3IoT.2018.8668103
Sigfox (2025, 1 Kasım). What is Sigfox 0G Technology. https://sigfox.com/what-is-sigfox/
Souli, N., Karatzia, M., Georgiades, C., Kolios, P., & Ellinas, G. (2024). Mission-critical UAV swarm coordination and cooperative positioning using an integrated ROS-LoRa-based communications architecture. *Computer Communications*, 225, 205-216. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.07.011
Schroder Filho, H.G. & Morelli, V. L., (2016), The adequacy of LoRaWAN® on smart grids: A comparison with RF mesh technology, *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), İtalya*,1-6. https://doi:10.1109/ISC2.2016.7580783
Stanco, G., Navarro, A., Frattini, F., Ventre, G., & Botta, A. (2024). A comprehensive survey on the security of low power wide area networks for the Internet of Things. *ICT Express*, 10(3), 519-552. https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.03.003
Stankovic, M. (2020). NB-IOT and LoRaWAN® performance testing in urban and rural environment (Yüksek Lisans Tezi). *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 30505532)
Tardy, I.C.R., Aakvaag, N., Myhre, B., Bahr, R. (2017). Comparison of wireless technique applied to enviromental sensor monitoring. (Yayın No: A27942) SINTEF: Stiftelsen for industriell og teknisk forskning-The Foundation for Industrial and Technical Research. https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2436270
Thingsboard. (2025, 1 Kasım). Open source IoT platform. https://thingsboard.io/
Tian, P., Boano, C. A., Ma, X., & Wei, J. (2023). LoRaHop: Multihop support for LoRaWAN® uplink and downlink messaging. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(17), 15376-15392. https://doi:10.1109/JIOT.2023.3263630
Ting, Y. T., & Chan, K. Y. (2024). Optimising performances of LoRa based IoT enabled wireless sensor network for smart agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101093. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101093
Turčinović, F., Vuković, J., Božo, S., & Šišul, G. (2020). Analysis of LoRa parameters in real-world communication. *2020 International Symposium ELMAR, Hırvatistan,* 87–90, https://doi.org/10.1109/ELMAR49956.2020.9219028
United Nations Habitat. (2024). World Cities Report, Cities and Climate Action. (Yayın-ISBN No: 978-92-1-132955-1). United Nations Human Settlements Programme. https://unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024_-_full_report.pdf
Vo, H., Tran, V. L., Ferrero, F., Lee, F. Y., & Tsai, M. H. (2024). Advance path loss model for distance estimation using LoRaWAN® network's Received Signal Strength Indicator (RSSI). *IEEE Access*, 12, 83205-83216, https://doi:10.1109/ACCESS.2024.3412849
Wang, H., Zhang, X., Liao, J., Zhang, Y., & Li, H. (2024). An improved adaptive data rate algorithm of LoRaWAN® for agricultural mobile sensor nodes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219, 108773. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108773
Wang, Y. P. E., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., Blankenship, Y., Bergman, J., & Razaghi, H. S. (2017). A primer on 3GPP narrowband Internet of Things. *IEEE*

Communications Magazine, 55(3), 117-123. https://doi:10.1109/MCOM.2017.1600510CM

Wu, W., Wang, W., Wang, B., & Song, R. (2021). Throughput of distributed queueing-based LoRa for long-distance communication. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 28. https://doi.org/10.1186/s13634-021-00739-1

Yalçın, S. (2023). An artificial intelligence-based spectrum sensing methodology for LoRa and cognitive radio networks. International Journal of Communication Systems. *International Journal of Communication Systems.* 36 (5), 1074-5351. https://doi.org/10.1002/dac.5433

Yıldız, Ö. & Karlık, S. E., (2021*)*. Design and performance analysis of a LoRaWAN® protocol based network for data communication with smart water-meter devices: Bursa case study . International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'21), Türkiye, 211-216.

Yıldız, Ö., & Karlık, S. E. (2025). Bir bina içi LoRaWAN ağında SNR ile RSSI ilişkisinin MATLAB eğri uydurma yöntemi yardımıyla regresyon analizi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 15(2), 702-717. https://doi.org/10.31466/kfbd.1577612

Yunus, R. R., Abidin, H. Z., Kamaru Zaman, F. H., & Che Abdullah, S. A. (2019). Outdoor signal performance of LoRaWAN® technology for campus-scale IoT connectivity. *2019 29th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, Yeni Zelanda, 1–6 https://doi.org/10.1109/ITNAC46935.2019.9077978

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, 1(1), 22-32. https://doi:10.1109/JIOT.2014.2306328

Zhang, J. J. (2011). Development strategy of China's internet of things (Yüksek Lisans Tezi). *ProQuest Dissertations & Theses Global* veri tabanından erişildi. (Sipariş No: 10480414).

Zorbas, D., Abdelfadeel, K., Kotzanikolaou, P., & Pesch, D. (2020). TS-LoRa: Time-slotted LoRaWAN® for the industrial Internet of Things. *Computer Communications*, 153, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.056