

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



LoRAWAN KABLOSUZ İLETİŞİM PROTOKOLÜNÜN
İNCELENMESİ VE BİR İOT UYGULAMASI

Gürkan DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Donanım Bilim Dalı

ARALIK 2019

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

LoRAWAN KABLOSUZ İLETİŞİM PROTOKOLÜNÜN İNCELENMESİ VE BİR İOT UYGULAMASI

Tez Yazarı

Gürkan DOĞAN

Danışman

Prof. Dr. Yetkin TATAR

ARALIK 2019

ELAZIĞ

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “LoRaWAN Kablosuz İletişim Protokolünün İncelenmesi Ve Bir IoT Uygulaması” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

30/12/2019

Gürkan DOĞAN



ÖNSÖZ

İnternete bağlı cihazların (IoT) sayısının günümüzde 50 milyar adet olduğu tahmin edilmektedir. Gelecekte, internet alt yapısı, GSM, LPPAN ve LPWAN teknolojilerindeki gelişmeler göz önüne alındığında, IOT tabanlı gerçek zamanlı işlemlerde hızlı bir artışın olacağı bir gerçektir. 2011 yılında ortaya atılan Sanayi 4.0 devriminin temel parametrelerinden birisi olan IOT sistemleri ve bunların iletişimindeki geliştirme çalışmaları ise artarak devam etmektedir. Özellikle, uzun menzilli kablosuz PAN ve WAN sistemleri üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu teknolojilerin en önemlilerinden birisi de LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks) teknolojisidir.

Bu tez çalışmasında, yeni bir kablosuz sensör ağ teknolojisi olan ve IoT uygulamalarında sıkça kullanılmaya başlanan LoRaWAN teknolojisinin hem simülasyon çalışması hem de bir fiziksel/gerçek uygulaması yapılarak ve bu ağın performans testleri gerçekleştirilerek analiz sonuçlarının değerlendirmesi yapılmıştır. Simülasyon aracı olarak Opnet Modeler simülasyon aracı kullanılmıştır. Opnet Modeler platformunda mevcut olmayan LoraWAN düğümleri için orijinal modellemeler gerçekleştirilmiş ve simülasyon uygulamaları yapılmıştır. Tezin bu konudaki katkılarından birisi budur. Fiziksel/Gerçek ağ sisteminde ise, LoRaWAN ağ geçidi ve diğer düğümler kullanılarak konuma göre iletişim kalitesinin araştırması gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında yaptıkları katkılardan dolayı saygı değer hocam sayın **Prof.Dr.Yetkin TATAR**'a ve sayın **Dr.Öğr.Üyesi Güngör YILDIRIM**'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Gürkan DOĞAN

Elazığ, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. LoRa™ ve LoRaWAN İle İlgili Yapılan Çalışmalar	4
1.2. Tezin Amacı	5
1.3. Tezin Yapısı	6
2. LoRAWAN TEKNOLOJİLERİNE GENEL BAKIŞ	8
2.1. LoRa™	8
2.2. LoRaWAN	9
2.3. LoRaWAN Ağ Mimarisi	10
2.4. Nesnelerin Ağı (TTN)	11
2.5. Opnet Modeler Simülasyon Aracı	13
3. LoRa™ VE LoRAWAN	17
3.1. LoRa™ Modülasyonu	17
3.1.1. Shannon-Hartley Teoremi	17
3.1.2. Yayılı Spektrumun Temel Prensibi	18
3.1.3. LoRa Yayılı Spektrum	18
3.1.4. Bağlantı Maliyeti	22
3.2. LoRaWAN	24
3.2.1. LoRaWAN Sınıfları	24
3.2.2. LoRaWAN Paket Formatları	28
3.2.3. LoRaWAN Bölgesel Sınırlamaları	35
3.2.4. Cihaz Aktivasyonu ve Güvenlik	40
4. MATERYAL VE METOT	45
4.1. Simülasyon Uygulaması	45
4.1.1. LoRa Modülasyonun Modellenmesi	45
4.1.2. Çerçeve Formatlarının Modellenmesi	48
4.1.3. Düğümlerin Modellenmesi	54
4.1.4. Sonlu Durum Makinelerinin Modellenmesi	59
4.1.5. Kablosuz Propagasyonun Modellenmesi	69
4.1.6. Ağ Ortamının Modellenmesi	71
4.1.7. Senaryoların Tasarımı	73
4.2. Gerçek/Fiziksel Uygulama	74
4.2.1. Uç Cihaz	75
4.2.2. Ağ Geçidi	76
4.2.3. Nesnelerin Ağı (TTN)	77
4.2.4. Deneysel Yöntem	78

5. BULGULAR VE TARTIŞMA	82
5.1. Simülasyon Uygulamasının Sonuçları	82
5.1.1. Dış Mekân Ölçüm Sonuçları	82
5.1.2. İç Mekân Ölçüm Sonuçları.....	90
5.2. Gerçek Uygulamanın Sonuçları.....	95
5.2.1. Dış Mekân Ölçüm Sonuçları	95
5.2.2. İç Mekân Ölçüm Sonuçları.....	97
5.3. Simülasyon ve Gerçek Uygulamanın Analizi.....	101
6. SONUÇLAR.....	107
ÖNERİLER.....	110
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

LoRaWAN Kablosuz İletişim Protokolünün İncelenmesi Ve Bir IoT Uygulaması

Gürkan DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2019, Sayfa: xiv + 114

LoRa (Long Range), chirp spread-spectrum (CSS) tekniğine dayanan patentli bir modülasyon şemasıdır. Bu teknik, günümüzün önde gelen düşük güç alanlı (LPWA) teknolojilerinden biri olan LoRaWAN'ın fiziksel katmanında uygulanmaktadır. LoRa'nın en önemli özelliği, düşük veri hızı ve düşük enerji tüketiminin yanı sıra uzun menzilli iletişimi sağlayabilmesidir.

Bu tez çalışması, LoRa'nın farklı ortamlardaki performansına odaklanmaktadır. Bu performans testleri için iki farklı uygulama yapılmıştır; birincisi fiziksel uygulama ve ikincisi simülasyon uygulaması. Fiziksel uygulama için her ne kadar doğal olarak dış mekân performansına daha fazla dikkat edilse de, bu çalışma LoRa'nın iç mekân performansını da gözlemliyor. Dış mekân test yerleri kentsel alanlar, ağaçlı rekreasyon alanları ve iyi bir Fresnel Sahası olan yüksek tepelerdir. İç mekân ölçümleri iki ortamda yapılmıştır. İlki çok katlı bir binadır. İkincisi, dar kesitli bir tünel ortamıdır. Her test ortamı için farklı yayılım faktörü ve iletim gücü seçilerek paket teslim oranı (PDR), RSSI ve SNR değerleri gözlenip sonuçları tartışılmıştır. Simülasyon uygulaması için de seçilen propagasyon modeline göre hem dış mekân hem de iç mekân ortamlarının farklı konumlar ya da uzaklıklar seçilerek performans testleri yapılmaktadır. Performans testleri için Opnet Modeler simülasyon aracının kütüphanesinde henüz bulunmayan LoRaWAN uç cihazı, ağ geçidi, ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucusunun modellemesi yapılarak ve her bir konum için farklı yayılım faktörü, yol kaybı katsayısı ve iletim gücü seçilerek PDR, RSSI ve SNR performans ölçütleri değerlendirilip analizi yapıp sonuçları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: LoRa, LoRaWAN, Nesnelerin İnterneti, Opnet Modeler Simülasyon, Performans Analizi.

ABSTRACT

Study Of LoRaWAN Wireless Communication Protocol And An IoT Application

Gürkan DOĞAN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Computer Engineering

December 2019, Sayfa: xiv + 114

LoRa is a patented modulation scheme based on the CSS technique. This technique is implemented in the physical layer of LoRaWAN, which is one of today's prominent LPWA technologies. The most important feature of LoRa is that it can enable long-range communication as well as a low data rate and low energy consumption.

This thesis focuses on the performance of LoRa in different environments. Two different applications were performed for these performance tests; the first is the physical application and the second is the simulation application. This study also observes the indoor performance of LoRa, although natural attention is paid more to outdoor performance for physical application. Outdoor test sites are urban areas, tree-lined recreation areas and high hills with a good Fresnel Field. Indoor measurements were in two environments. The first is a multi-storey building. The second is a narrow section tunnel environment. PDR, RSSI and SNR values were measured by selecting different spread factors and transmission power for each test environment and the results were discussed. According to the propagation model selected for simulation application, performance tests are performed by selecting different locations or distances of both outdoor and indoor environments. For performance tests, modeling of LoRaWAN end device, gateway, network, join and application servers, which is not yet in the library of Opnet Modeler simulation tool, was performed. PDR, RSSI and SNR performance criteria were evaluated and analyzed by selecting different spread factor, path loss exponent and transmission power for each different distance between the end device and the gateway.

Keywords: LoRa, LoRaWAN, Internet of Things, Opnet Modeler Simulation, Performance Analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Bağlı IoT cihazlarının sayısal tahmini.....	1
Şekil 2.1. LoRa™ Protokol Yığını.	9
Şekil 2.2. LoRaWAN Ağ Mimarisi	11
Şekil 2.3. Nesnelerin Ağ'ının arka uç mimarisi	12
Şekil 2.4. Opnet Modeller'in hiyerarşik modelleme yapısı.....	14
Şekil 3.1. Zaman içinde doğrusal olarak frekansta artan veya azalan sinüsoidal bir chirp dalga formatı. ..	19
Şekil 3.2. Sembol zamanı, Yayılma Faktörü ve seçilen bant genişliği arasındaki ilişki.....	20
Şekil 3.3. Bir mesajın chirp sinyalleri üzerine kodlanması	20
Şekil 3.4. Bir LoRa™ ağındaki sınıfların karşılaştırılması.....	24
Şekil 3.5. Sınıf A'ya göre son cihazın alım slotlarının zamanlaması	25
Şekil 3.6. Sınıf B'ye göre son cihazın alım slotlarının zamanlaması	26
Şekil 3.7. Sınıf C'ye göre son cihazın alım slotlarının zamanlaması.	27
Şekil 3.8. Yukarı-bağlantı Fiziksel katman mesaj formatı	28
Şekil 3.9. Aşağı-bağlantı Fiziksel katman mesaj formatı	28
Şekil 3.10. LoRa teknolojisinin mesaj formatı	33
Şekil 3.11. EU863-870 MHz ISM Bandına göre kanal listesi.....	36
Şekil 3.12. OTA aktivasyon sürecinde uçtan uca kimlik doğrulama ve anahtar yönetimi	41
Şekil 3.13. OTA aktivasyonun prosedürünün akış diyagramı	43
Şekil 4.1. CSS modülasyonu için BER ile E_b/N_0 grafiğinin OPNET Modeller'deki gösterimi	47
Şekil 4.2. MAC (PHYPayload) katmanının mesaj formatı	48
Şekil 4.3. MHDR alanının formatı	49
Şekil 4.4. MACPayload Alanının formatı	49
Şekil 4.5. FHDR alanının formatı.....	50
Şekil 4.6. UL ve DL çerçeveleri için çerçeve kontrol (FCtrl) alanının formatı	50
Şekil 4.7. Katılım isteği mesaj formatı	50
Şekil 4.8. Veri yapısı olarak katılım isteği mesaj formatı	51
Şekil 4.9. Katılım cevabı mesaj formatı	51
Şekil 4.10. Veri yapısı olarak katılım cevabı mesaj formatı.....	52
Şekil 4.11. Veri yapısı olarak aktivator komutu mesaj formatı	52
Şekil 4.12. Nem, sıcaklık ve ışık verilerinin tutulduğu veri yapısı.....	52
Şekil 4.13. Komutlar için mesaj formatı.....	53

Şekil 4.14. Uç cihazın düğüm modeli.....	54
Şekil 4.15. Ağ geçidinin düğüm modeli	56
Şekil 4.16. LoRa ağ geçidinin fiziksel katmandaki verici ve alıcı modüllerinin öznitelikleri	57
Şekil 4.17. Sunucu cihazlarının düğüm modeli	58
Şekil 4.18. Uç cihazın uygulama katmanındaki sonlu durum makinesi	59
Şekil 4.19. Uç cihazın uygulama katmanında LoRaWA ağına katılım için kullanılan primitifler	60
Şekil 4.20. Uç cihazın Mac katmanındaki sonlu durum makinesi.....	61
Şekil 4.21. LoRaWAN’da OTA aktivasyon grafiği	63
Şekil 4.22. LoRaWAN’da onaylı veri aktarım grafiği.....	64
Şekil 4.23. Ağ geçidinin uygulama katmanındaki sonlu durum makinesi.....	65
Şekil 4.24. Ağ geçidinin LoRa Mac katmanındaki sonlu durum makinesi	66
Şekil 4.25. Ağ sunucusunun sonlu durum diyagramı	67
Şekil 4.26. Katılım sunucusunun sonlu durum makinesi.....	67
Şekil 4.27. Uygulama Sunucusunun sonlu durum makinesi	68
Şekil 4.28. Aktivatorün kontrolü için kullanılan fonksiyondan bir görünüm	69
Şekil 4.29. LoRaWA ağ ortamından bir görüntü.....	72
Şekil 4.30. Ağ geçidi ve uç cihazın öznitelikleri	73
Şekil 4.31. Kurulumu ve entegrasyonu yapılan LoRaWAN sistemi (a) ve kullanılan cihazlar (b)	75
Şekil 4.32. Nesnelerin Ağı’nın teknoloji yığıcı	77
Şekil 4.33. Dış mekân ölçüm noktaları.....	79
Şekil 4.34. Bölüm binası ve kat planı.....	80
Şekil 4.35. LoRaWAN performans ölçümleri için kullanılan konumlar	81
Şekil 5.1. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 467 m konumundaki PDR ölçümleri	82
Şekil 5.2. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 467 m konumundaki RSSI ölçümleri	83
Şekil 5.3. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 467 m konumundaki SNR ölçümleri	84
Şekil 5.4. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 1380 m konumundaki PDR ölçümleri	84
Şekil 5.5. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 1380 m konumundaki RSSI ölçümleri	85
Şekil 5.6. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 1380 m konumundaki SNR ölçümleri	86
Şekil 5.7. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 3270 m konumundaki PDR ölçümleri	86
Şekil 5.8. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 3270 m konumundaki RSSI ölçümleri	87
Şekil 5.9. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 3270 m konumundaki SNR ölçümleri	87
Şekil 5.10. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 1300 m konumundaki PDR ölçümleri	88
Şekil 5.11. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 1300 m konumundaki RSSI ölçümleri	89
Şekil 5.12. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 1300 m konumundaki SNR ölçümleri	89

Şekil 5.13. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 69 m konumundaki PDR ölçümleri	90
Şekil 5.14. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 69 m konumundaki RSSI ölçümleri	91
Şekil 5.15. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 69 m konumundaki SNR ölçümleri	91
Şekil 5.16. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 106 m konumundaki PDR ölçümleri	92
Şekil 5.17. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 106 m konumundaki RSSI ölçümleri	93
Şekil 5.18. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre 106 m konumundaki SNR ölçümleri	93
Şekil 5.19. Farklı iletim gücü ve SF'lere göre dış mekân PDR ölçümleri	95
Şekil 5.20. Farklı iletim gücü ve SF'lere göre dış mekân RSSI ölçümleri	96
Şekil 5.21. Farklı iletim gücü ve SF'lere göre dış mekân SNR ölçümleri	96
Şekil 5.22. L6 ve L7 iç mekân konumu için PDR ölçümleri	97
Şekil 5.23. L6 ve L7 iç mekân konumu için RSSI ölçümleri	98
Şekil 5.24. L6 ve L7 iç mekân konumu için SNR ölçümleri	98
Şekil 5.25. Tünel için PDR ölçümleri	99
Şekil 5.26. Tünel için RSSI ölçümleri	99
Şekil 5.27. Tünel için SNR ölçümleri	100
Şekil 5.28. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 467m deki konum için PDR'nın kıyaslaması	101
Şekil 5.29. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 467m deki konum için RSSI kıyaslaması	102
Şekil 5.30. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 467m deki konum için SNR kıyaslaması	103
Şekil 5.31. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 1300m deki konum için PDR kıyaslaması	104
Şekil 5.32. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 1300m deki konum için RSSI kıyaslaması	105
Şekil 5.33. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 1300m deki konum için SNR kıyaslaması	106

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Mevcut olan bazı LPWAN sistemlerinin karşılaştırılması.....	3
Tablo 2.1. Farklı Yayılım Faktörleri için Bit Oranı ve Sembol Oranı	9
Tablo 3.1. SX1276 alıcı-vericisi için belirtilen alıcı hassasiyeti ve SNR değerleri	23
Tablo 3.2. MAC (PHYPayload) katmanının mesaj formatı.	29
Tablo 3.3. MHDR(MAC Header) alanının içeriği	30
Tablo 3.4. MAC katmanının mesaj türleri	30
Tablo 3.5. MAC yükü alanının içeriği.	30
Tablo 3.6. Çerçeve başlığı (FHDR) alanının içeriği.	31
Tablo 3.7. Aşağı-bağlantı (downlink) çerçeveleri için çerçeve kontrol (FCtrl) alanının içeriği.	31
Tablo 3.8. Yukarı-bağlantı (uplink) çerçeveleri için çerçeve kontrol (FCtrl) alanının içeriği	31
Tablo 3.9. Kodlama oranının hava üzerindeki zamana etkisi.	34
Tablo 3.10. EU863-870 MHz alt-bantları ve sınırlamaları	35
Tablo 3.11. Avrupa bölgesi için LoRaWAN tarafından tanımlanan veri oranları	38
Tablo 3.12. EU863-870 maksimum taşıma yükü boyutu (tekrarlayıcı).....	39
Tablo 3.13. EU863-870 maksimum taşıma yükü boyutu (tekrarlayıcısız).....	39
Tablo 4.1. LoRa demodülatörünün SNR değerleri	46
Tablo 4.2. Farklı SF'li sinyallerin önsöz örtüşme süreleri	62
Tablo 4.3. Yol kaybı katsayısının (β) bazı tipik değerleri	70
Tablo 4.4. Gölgeleme sapmasının (σ) bazı tipik değerleri.....	70
Tablo 4.5. LNS propagasyon modeli için kullanılan parametreler	71
Tablo 4.6. LoRaWAN düğümlerinin kullandığı parametreler	74
Tablo 4.7. Test konumları için Fresnel bölgesi özellikleri.....	79
Tablo 4.8. LoRa düğümü için kullanılan parametreler	81

KISALTMALAR

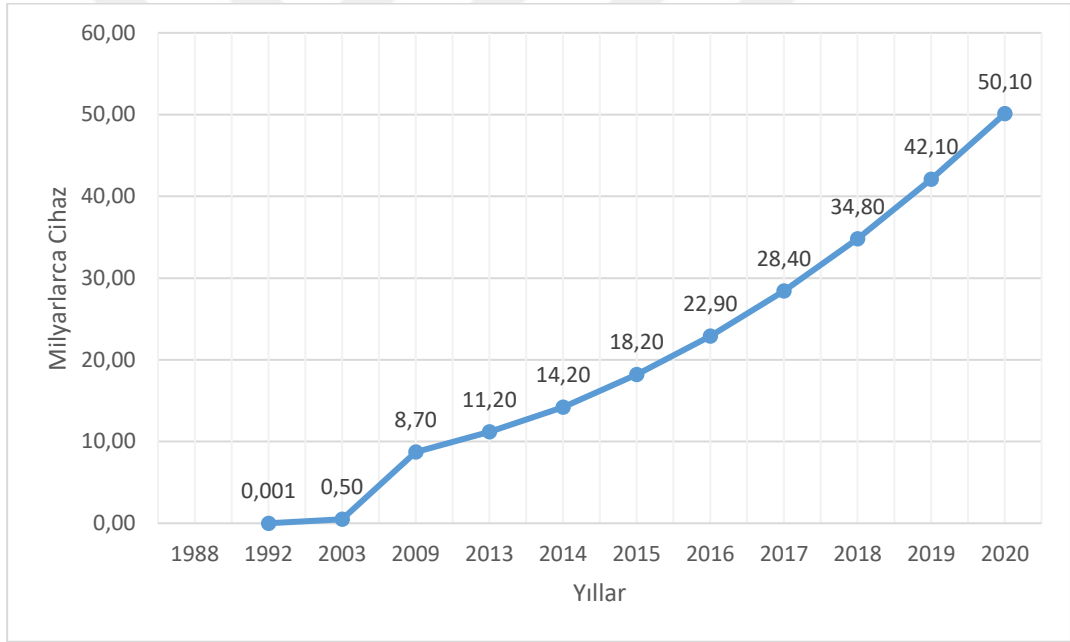
3GPP	: 3. Nesil Ortaklık Projesi
ABP	: Kişiselleştirme ile Aktivasyon
ADR	: Adaptif Veri Oranı
AS	: Uygulama Sunucusu (Application Server)
BER	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BW	: Bant Genişliği
CRC	: Döngüsel Artıklık Kontrolü
CHIRP	: Sıkıştırılmış Yüksek Yoğunluklu Darbe (Compressed High-Intensity Radiated Pulse)
DC	: Görev Döngüsü (Duty Cycle)
DL	: Aşağı Bağlantı / Giriş Hattı (Downlink)
DSSS	: Direct Sequence Spread Spectrum
ED	: Uç Cihaz (End Device)
EIRP	: Eşdeğer İzotropik Yayılım Gücü
EMA	: Harici Model Erişimi
ETSI	: Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü
FEC	: İleri Hata Düzeltme
FSK	: Frekans Kaymalı Anahtarlama
GFSK	: Gaussian Frekans Kaymalı Anahtarlama
GW	: Ağ Geçidi (Gateway)
HTTP	: Hypertext Transfer Protocolü
IEEE	: Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IoT	: Nesnelerin İnterneti
IP	: İnternet Protokolü
ISM	: Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi
JS	: Katılım Sunucusu (Join Server)
LNS	: Log Normal Shadowing
LoRa	: Uzun Menzil (Long Range)
LPWAN	: Düşük Güçlü Geniş Alanlı Ağlar
MCU	: Mikro Denetleyici Birimi
NS	: Ağ Sunucusu (Network Server)
OOK	: Açık/Kapalı Anahtarlama
OTAA	: Hava Yoluyla Aktivasyon
PDR	: Paket Teslim Oranı
PHY	: Fiziksel
PL	: Yol Kaybı (Path Loss)
RF	: Radyo Frekans
RFU	: Gelecekteki Kullanım İçin Rezerve Edilen Alan
RPC	: Uzaktan Prosedür Çağrısı
RSSI	: Alınan Sinyal Gücü Göstergesi
SDM	: Sonlu Durum Makinesi (Final State Machine / FSM)
SF	: Yayılım Faktörü
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
TTN	: Nesnelerin Ağı (The Things Network)

UART	: Evrensel Asenkron Alıcı/Verici
UDP	: Kullanıcı Datagram Protokolü
UL	: Yukarı Bağlantı / Çıkış Hattı (Uplink)
WSN	: Kablosuz Sensör Ağları
YSA	: Yapay Sinir Ağları
IQR	: Çeyrekler Arasındaki Açıklık (Interquartile Range)



1. GİRİŞ

Günümüzde internete bağlı cihazların sayısı hızla arttıkça kullanım alanlarının çeşitliliği de buna paralel olarak artmaktadır. Uzaktan erişilebilen ev aletlerinden mevcut hava durumuna göre görünümünü değiştiren giysilere kadar her alanda internet bağlantısı özelliklerine sahip yeni cihazların ve nesnelerin ortaya çıktığını görüyoruz. Bu cihazların ve nesnelerin, kablosuz iletişim sistemleri ile birlikte mevcut internet altyapılarını kullanarak uygulamalarla uzaktan iletişim kurulup kontrol edilmesi, genellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) olarak adlandırılan kavrama odaklanmamızı sağlar. Nesnelerin İnterneti (IoT), internete bağlı kablosuz ağlar aracılığıyla uygulamalarla bilgi toplayan ve bunlarla bilgi alışverişinde bulunan elektronik, yazılım, sensörler ve kablosuz bağlantı protokollerini içeren bağlı nesneler topluluğudur. Bununla birlikte IoT, fiziksel ve sanal dünya arasında doğrudan bir entegrasyon ve iletişim sağlamaktadır.



Şekil 1.1. Bağlı IoT cihazlarının sayısal tahmini

Nesnelerin interneti, insanların yaşamlarını son on yıllar boyunca daha verimli ve daha konforlu hale getirmekte ve daha iyi olması beklenmektedir. Teknoloji daha sofistike hale geldikçe ve geliştiriciler bir sonraki en iyi cihazla ortaya çıktıkça, birbirine bağlı nesnelerin ağı, mutfak araçlarından giyilebilirler, Amazon'un ALEXA'sı ve Google Home gibi sesle çalışan asistanlara kadar, katlanarak büyüyecektir. Cisco'ya göre, 2030 yılına kadar 500 milyar cihazın İnternete bağlanması bekleniyor. Şekil 1.1'de yıllara göre aktif olarak kullanılan IoT cihazlarının sayısı tahmin edilmiştir [1,2].

IoT uygulamalarının uzun menzilli, düşük veri oranı, düşük enerji tüketimi ve maliyet etkinliği gibi özel gereksinimleri vardır. Yaygın olarak kullanılan kısa kablosuz teknolojiler (örneğin; ZigBee, Bluetooth), uzun menzilli haberleşmeyi gerektiren senaryolarda kullanılamaz. Hücresel iletişimlere dayanan teknolojiler (örneğin, 2G, 3G ve 4G) daha büyük kapsama sağlayabilir, ancak çok fazla enerji tüketirler. Bu nedenle, IoT uygulamalarının gereksinimleri yeni bir kablosuz iletişim teknolojisi olan LPWAN'ın ortaya çıkmasına neden oldu [3].

LPWAN, düşük güçlü, uzun menzilli ve düşük maliyetli iletişim özellikleri nedeniyle sanayi ve araştırma topluluklarında giderek daha fazla popülerlik kazanmaktadır. Kırsal bölgelerde 10-40 km, kentsel bölgelerde ise 2-5 km'ye kadar iletişim sağlar. Bununla birlikte, yüksek enerji tasarruflu (yani 10+ yıl pil ömrü [4]) ve maliyet açısından ucuzdur[5].

LPWA ağları için önemli kullanım alanları arasında; akıllı şehirler, akıllı sokak aydınlatması, varlık takibi ve durum izlemesi ile tedarik zinciri yönetimi, elektrikle çalışan akıllı şebekeler, su ve gaz ölçümü, arazi koşullarına sahip akıllı tarım veya hayvan izleme vb. gibi sayılabilir. Birkaç radyo teknolojisi, LPWA ağlarını uygulamak için bir araya gelmiştir. Ultra Dar Bant (UNB) protokolü ile birlikte, LoRa ve MAC katman uygulaması - LoRaWAN - şu anda IoT uygulamalarını ve servislerini desteklemek için en fazla ilgi çeken LPWA ağ çözümüdür [6].

Özetle LPWAN, yalnızca çok küçük miktarda veri iletmesi gereken IoT uygulamaları için son derece uygundur. GPRS, NB-IoT, SIGFOX, LoRa, LoRaWAN, WiFi, DASH7 v.b birçok LPWAN teknolojisi lisanslı ve lisanssız frekans bant genişliği, farklı modülasyon, farklı hassasiyet ve farklı iletim menzili vb. gibi karakteristiklerle ortaya çıkmıştır. Bu karakteristikler ve daha fazlasına göre değerlendirmeler Tablo 1.1'de gösterilmektedir [7]. Bunlardan LoRa ve LoRaWAN teknolojileri günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlayan ve gelişimi devam eden LPWAN teknolojilerinin en önemlilerinden birisi olduğundan bu tez çalışmasının konusu olarak seçilmiştir.

Tablo 1.1. Mevcut olan bazı LPWAN sistemlerinin karşılaştırılması

	GPRS	NB-IoT	SIGFOX	LoRa	WiFi 802.11ah	Wireless M- Bus	DASH7
Frekans + Bant	8-900 MHz licensed	7-900 MHz licensed or shared	ISM; 865- 868 / 902-928 MHz	ISM; 433/868 (EU)/ 780/915 (USA) 902 MHz	Unlicensed under 1GHz, except TV	868 MHz, 169 MHz	ISM; 433/868(EU)/ 915 (USA) MHz
Kanal Genişliği	200 kHz	200 kHz	100 Hz	≥125 kHz	1/2/4/8/16 MHz	10 kHz to 100 kHz	25 or 200 kHz
Modülasyon ve Erişim Tekniği	TDMA	FDMA (UL), OFDM (DL)	BPSK	FSK + CSS	TDM / OFDM	FSK	FSK + CSMA
İletilen Güç (edge)	Up to 43 dBm	20 dBm	Up to 20 dBm	EU: 14dBm / US: 27 dBm	0 dBm to 30 dBm, depending on region	10 dBm	433 MHz: +10dBm(ETSI) 868/915 MHz: +27dBm
GW hassasiyeti (Uygulamaya Özel)	-114 dBm	-123.4 dBm	-142 dBm	-137 dBm	-92 dBm (2 MHz)	-105 dBm (at 32kc)	-
Menzil (ideal şartlar altında)	5 km	2-5 km (rural)	5-10 km (urban), 100 km (rural)	5 km (urban), 15 km (rural)	1 km (rural)	500m	5-10 km
Topoloji	Star	Star	Star	Star	Star, tree (2- hop)	Star	Tree by default, star or mesh
DL Veri Oranı	10 kb/s	150 kb/s (NB) < 1Mb/s	4x8b/day	EU: 30 b/s- 50 kb/s US: 100-900 kb/s	150 kb/s, up to 300 Mb/s	4.8-100 kb/s	9.6-167 kb/s
UL Veri Oranı	10 kb/s	150 kb/s (NB) < 1 Mb/s	100 b/s	EU: 30 b/s- 50 kb/s US: 100-900 kb/s	150 kb/s, up to 300 Mb/s	4.8-100 kb/s	9.6-167 kb/s
Mobilite	Yes	Yes	No	No	No	No	No
GW başına düşen düğüm	5000	50000	1000000	250000	8191	Not specified	N/A (connectionless)
GW de dubleks mod	Full	Full	Half	Half	Full	Full	Half
Batarya Ömrü (tahmini verilen görev döngüsü)	1 week	5 years	10 years	10 years	1 week	Years	10 years
Yönetim Kurulu	3GPP	3GPP	SIGFOX	LoRa alliance	WiFi alliance and IEEE standards	M-Bus	DASH7 alliance

1.1. LoRa™ ve LoRaWAN İle İlgili Yapılan Çalışmalar

LoRa teknolojisi, Fransa'da, uzun menzilli düşük güçlü bir iletişim cihazı kurmak isteyen büyük yarı iletken şirketlerin emektarlarından oluşan Cycleo adlı bir girişim tarafından icat edilip 2008 yılında patenti alınmıştır. Daha sonra LoRa Birliği'nin kurucu ortaklarından olan Semtech firması 2012 'de bu teknolojiyi satın almıştır [8,9]. LoRa ve LoRaWAN teknolojilerinin tarihine bakıldığında yaklaşık 10 yıllık bir mazisi bulunmaktadır. Dolayısıyla bu teknolojiler, çok yeni bir teknoloji olduğu için araştırmacıların dikkatini üzerine çekmektedir. Bu teknolojiler ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıdaki gibidir;

Lora modülasyonu için bir hata modeli (AWGN Channel) kullanılarak uç cihaz ya da ağ geçidi sayısının artırılması veya azaltılması ile paket teslim oranı ilişkisinin incelenmesi [10]'da, uyarlanabilir veri oranı planının, paket yük uzunluğunun, bağlantı kontrollerinin ve ACK kullanımlarının paket teslim oranı üzerindeki etkisi [11]'te, temel LoRaWAN ağlarında cihazla cihaz (D2D) arasında doğrudan bir haberleşme olmamasına karşın [12]'de D2D haberleşme planı geliştirilmiş ancak bu geliştirilen D2D haberleşme planı güvenliksiz olduğu için [13]'de güvenli bir D2D bağlantı kurma planı önerilmektedir.

Lora Birliğinin 'in geliştirdiği Lora'nın MAC protokolünden farklı olan RS-Lora'yı geliştirip paket hata oranı, çıktı ve enerji verimliliği gibi performans ölçütlerinin etkisi [14]'de, yukarı bağlantıların (uplink) görev döngüsü (Duty Cycle) kısıtlamaları altındaki çarpışma oranı, gecikme ve çıktı açısından performansını değerlendirmek için bir model [15]'te sunulmuştur.

Halihazırda bulunan LoRaWAN cihazları (son cihaz ve ağ geçidi) genellikle kapalı kaynaklı ve özel mülk olması nedeniyle [16]'te açık kaynaklı ve düşük maliyetli LoRaWAN cihazlarını tasarlanıp prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak üretilen bu cihaz kitlerinin enerji tüketimi, paket kayıp oranı gibi testleri de gerçekleştirmiştir. Hareket halindeki düğümler üzerinde yapılan deneyler, 40 km / s'den daha yüksek hızlarda, iletişim performansının Doppler etkisine bağlı olarak kötüleştiğini göstermiştir [17], [18].

Miller [19], LoRaWAN'a yapılan olası saldırıları analiz etti ve şifreleme anahtarı oluşturma sürecinin ve anahtar yönetimi politikasının geliştirilebileceğini iddia etti. Bir LoRaWAN'da, iletişim güvenliğini sağlamak için tüm son cihazlar, ağ geçitleri ve sunucuların kendi kullanıcı doğrulama ve anahtar koruma politikalarına sahip olmaları gerekir. Tomasın ve diğerleri [20] ve Aras ve diğerleri [21], LoRaWAN'ın güvenlik zayıflığını da araştırdılar. Tomasın ve diğerleri bir uç cihaz yeni eklendiğinde tekrarlama saldırısı ve DoS saldırısının gerçekleşebileceğini iddia etti. Replay ataklarının yanı sıra Aras ve arkadaşları ayrıca, uzun mesafe iletişiminin radyo sıkışması ve solucan deliği saldırılarına maruz kalabileceğini belirtti. Buna göre, mevcut LoRaWAN için pek çok güvenlik tasarım sorununun iyileştirilmesi gerekiyor.

[22] 'de, simülasyonlar yoluyla girişimlerin ağ performansı üzerinde çok güçlü bir etkisi olabileceğini gösteren bir LoRa ağının ölçeklenebilirliğini ele almaktadır. Ayrıca, ağ geçitlerinin

yoğunlaştırılmasının bu sorunun azaltılmasına yardımcı olabileceğini ve yaklaşımın ağ geçitlerinde yönlü anten kullanımından daha verimli olduğunu göstermektedir. Girişimin LoRa tabanlı iletişimler üzerindeki etkisini vurgulayan ampirik sonuçlar [23] 'da bildirilmiştir. [24] 'da ağlar arası girişime maruz kalan bir LoRa ağının performansını karakterize etmek için stokastik geometri araçları kullanılmıştır. Bu çalışmada, performansın ağdaki cihaz sayısındaki artışla üssel olarak azaldığını göstermektedir. Lee yayılım modelinin küçük şehir ortamlarında akıllı şehir senaryoları için LoRa teknolojisine dayalı kablosuz ağların tasarımı, planlaması ve yönetimindeki kullanılabilirlik analizleri [25]'de, LoRa teknolojisinin yayılımını iç-dış mekân senaryolarında analiz etmekte ve yaygın olarak kullanılan yayılma modelleriyle (log-distance ve COST231) karşılaştırmakta ve COST231 modelinde iyileştirmeler yapmakta ve iyileştirilen COST231 modeli ile bir YSA dan oluşan hibrit bir modelin önerilmesi [26]'de, LoRa teknolojisi için free-space modeli, Oulu modeli, longly-rice düzensiz bölge modelinin ölçümlerini Almanya'da yarı kentsel bir test alanından elde ettiği ölçümlerle karşılaştırılması [27]'de, Lora teknolojisini Dortmund şehrinde hem 433 MHz hemde 868 MHz frekanslarında çalışan Akıllı şehir senaryoları oluşturulmuş ve her bir frekans için yol kaybı ölçülmüştür ve bu ölçülen değerler ile Okumura Hata, ITU Advanced, Winner + ve 3GPP Uzaysal Kanal Modeli gibi yol kaybı modellerinden elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır [28].

[29] 'de LoRaWAN'ın kapsamı ile ilgili deneysel bir analiz yapılmıştır. Yazarlar, yer ve su üzerinde bulunan test yatakları için haberleşme aralığını sırasıyla 15 ve 30 km olarak gözlemlemek için maksimum iletim gücünü ve SF'yi kullanır. Yazarlar ayrıca yol kaybını tahmin etmek için deneysel verilere dayanarak kanal zayıflatma modelini sunar. Aynı yazarlar [30] 'de LoRaWAN son düğümleri için performans ölçümleri çizmiştir ve tek bir LoRaWAN hücresinin birkaç milyon son düğümü destekleyebileceğini göstermektedir. Uplink LoRaWAN kanalının kapasitesinin, ağ geçidinden olan mesafeye oldukça bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde, LoRaWAN fiziksel katmanının iç ve dış performansı, [31] 'te analiz edilmiştir; bu, LoRaWAN'ın gelecekteki uzaktan algılama uygulamaları için güvenilir bir bağlantı olabileceğini göstermektedir.

1.2. Tezin Amacı

Nesnelerin İnterneti (IoT) 'nde kullanılan cihaz teknolojileri ve protokolleri, hem sanayi hem de akademik alanda en çok çalışılan konular arasında yer almaktadır. Özellikle yeni bir teknoloji olması ve rakiplerine göre üstün özellikleri olması bakımından, bir IoT çözümü olan LoRaWA ağları araştırma ve geliştirmeye açık bir alandır. Bir LoRaWAN sistemi, LoRaWAN uç cihazı, ağ geçidi, merkezi ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucu gibi düğümlerin oluşturduğu LPWAN sistemidir. LoRaWA ağlarında uygulama geliştirme süreci; uç cihazları, ağ geçitleri, merkezi ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucusu gibi düğümlerin LoRaWAN™ spesifikasyon 1.1 'e ve LoRaWAN™ 1.1 Bölgesel Parametreler'e uygun bir şekilde

programlanarak modellenmesi ve simüle edilmesi ayrıca gerçek sistemin de test edilmesi gibi bilgiye dayalı çok karmaşık evrelerden oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında;

- OPNET Modeller simülasyon aracının kütüphanesinde henüz yer almayan LoRaWAN uç cihazı, ağ geçidi, merkezi ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucu gibi düğümlerin modelinin ve propagasyon modelinin oluşturulup ilgili yazılım aracının kütüphanesine eklenmesi,
- Simülasyon aracında oluşturulan düğüm ve propagasyon modelleriyle hem dış mekân hem de iç mekân (bina içi) ortamlarında LoRa ağ geçidi sabit konumda tutulurken LoRa uç cihaz için farklı konumlar seçilerek ve LoRa ağ geçidine farklı veri oranı, ortam katsayısı ve iletim gücü ile paket gönderimi yapılarak bu konumların PDR, RSSI ve SNR gibi performans ölçütleriyle analizinin yapılması,
- Gerçek sistemin oluşturulduğu ağ ortamında da hem dış mekân hem de iç mekân (bina içi ve tünel) ortamlarında LoRa ağ geçidi sabit konumda tutulurken LoRa uç cihaz için farklı konumlar seçilerek, LoRa ağ geçidine farklı veri oranları ve iletim gücü ile paket gönderimi yapılarak bu konumların PDR, RSSI ve SNR gibi performans ölçütleriyle analizinin yapılması,
- Gerçek ortamda sürekli olarak sensörlerden gelen verilerin depolanmasıyla büyük veri kapasiteleri elde edilip, makine öğrenmesi, derin öğrenme v.b yöntemlerle analiz edilebilir hale getirilmesi

için hem OPNET Modeller simülasyon aracında hem de gerçek LoRaWAN ortamında The Things Network (TTN) ile entegre bir şekilde çalışmasını sağladığımız LoRa ağ geçidi ve düğümlerinden oluşan bir LoRaWAN sisteminin gerçekleştirilmesi açıklanmıştır.

1.3. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması 6 ana bölümden oluşmaktadır;

1. Bölümde, Nesnelerin İnterneti (IoT), düşük güçlü geniş alan ağları (LPWAN) gibi teknolojilerin önemi vurgulanarak genel yapısı ve LPWAN 'ın yeni bir teknolojisi olan LoRaWAN'nın diğer LPWAN teknolojilerine olan üstünlüğü ve LoRaWAN teknolojisi ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.
2. Bölümde, çalışmamızda kullanılan bazı önemli teknolojilerden olan LoRa, LoRaWAN, OPNET Modeller, TTN hakkında temel bilgiler verilmiştir.
3. Bölümde, LoRa Modülasyonu ve LoRaWA ağlarında kullanılan sınıf yapıları, temel mesaj formatları, bölgesel sınırlamaları ve uç düğümlerin aktivasyonu ve kimliklendirilmesi hakkında ayrıntılı bilgiler bulunmaktadır.

4. Bölümde, LoRaWA ağlarının gerçek (fiziksel) ortamda tesis edilmesi, simülasyon ortamında modellenmesi ve bu iki uygulamada PDR, RSSI ve SNR performans ölçütlerinin istatistikî verilerinin elde edilebilmesi için gerekli olan senaryolar ve deneysel yöntemler detaylandırılmıştır.
5. Bölümde, gerçek ve simülasyon uygulamalarında oluşturulan LoRaWA ağlarındaki uç cihaz ve ağ geçidinin konumuna dayalı PDR, RSSI ve SNR performans ölçütlerinden elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu iki uygulama arasında, aynı olan iki konumun PDR, RSSI ve SNR kriterlerine göre kıyaslamasıyla ilgili analizlere yer verilmiştir.
6. Bölümde, gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ileride yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



2. LoRAWAN TEKNOLOJİLERİNE GENEL BAKIŞ

Bu bölümde, bu tez çalışmasında kullanılan; LoRa™, LoRaWAN ve LoRaWA ağları için düşük maliyetli, güvenli ve ölçeklendirmeyi destekleyen ve bir dizi açık araç sunan, herkesin kullanımına açık bulut tabanlı bir ağ olan The Things Network'e (TTN) ve LoRaWA ağının modellenip simüle edildiği OPNET Modeler simülasyon aracı gibi teknolojiler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

2.1. LoRa™

LoRa™, ilk olarak Semtech Firması tarafından geliştirilen ve şuan LoRa Birliği'nin kontrolü altında olan tescilli bir yayılı spektrum modülasyon tekniğidir. Diğer LPWAN teknolojilerinin aksine, LoRa™, çok yollu sönümlemeye ve Doppler etkisine karşı direçli olmasını sağlayan ve alıcının hassasiyetini arttıran ve DSSS'in bir alt kategorisi olarak kabul edilen chirp yayılı spektrum modülasyonunu (CSS) temel alır. [29, 32-35]

Chirp Yayılı Spektrum, 1940'lı yıllarda radar uygulamaları için geliştirilmiştir. Genelde bir dizi askeri ve güvenli iletişim uygulamasında kullanılmaktayken yaklaşık son yirmi beş yıl süresince bu modülasyon tekniği, nispeten düşük iletim gücü gereksinimleri ve çok yollu sönümleme, Doppler ve bant içi sıkışma girişimcileri gibi kanal bozulma mekanizmalarından kaynaklanan doğal dayanıklılığından ötürü bir çok veri haberleşme uygulamasında giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. CSS, alıcının hassasiyet sorununu aşmayı ve düşük spektral verim maliyeti karşılığında iletişim aralığını arttırmayı mümkün kıldığı için IoT ağ gereksinimlerine uygundur.[34,35]

GHz altındaki radyo bantları ve çok düşük veri oranları sayesinde LoRa™, çok uzun bir iletişim menzilli elde edebilmektedir. Tek bir ağ geçidi veya baz istasyonu tüm şehirleri veya yüzlerce kilometre kareyi kapsayabilir. Menzil büyük ölçüde çevreye veya belirli bir yerdeki engellere bağlıdır, ancak LoRa™ ve LoRaWAN diğer standart iletişim teknolojilerinden daha büyük bir bağlantı maliyetine sahiptir. Genelde desibel (dB) olarak verilen bağlantı maliyeti, belirli bir ortamdaki menzilin belirlenmesinde birincil etkidir. LoRa™ ile, son cihazlar ve ağ geçitleri arasındaki iletişim farklı frekans kanallarında ve veri oranlarında yayılır. Bu veri oranını belirleyen en önemli parametre yayılım faktörüdür. Veri oranının seçimi dolayısıyla yayılım faktörü (SF) seçimi, haberleşme menzili ile mesaj süresi arasında bir denge kurar, farklı veri oranları ile mesajlar/sinyaller birbirleriyle girişime neden olmaz. Farklı yayılım faktörleri için yayılma kodları ortogonal olduğundan farklı SF'ler (SF7...SF12) kullanılarak aynı frekans kanalında eşzamanlı haberleşme mümkündür. LoRa™, Avrupa'da 868 MHz, Kuzey Amerika'da 915 MHz ve Asya'da 433 MHz olan lisanssız ISM bantlarını kullanmaktadır. Bununla birlikte LoRa™'da veri oranı 0,3

kbps - 50 kbps arasındadır. Maksimum taşıyıcı yük uzunluğu ise ~243 bayttır.[3,32,33] Aşağıdaki Tablo 2.1 ‘de farklı yayılım faktörleri için veri oranı ve sembol oranı gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Farklı Yayılım Faktörleri için Bit Oranı ve Sembol Oranı

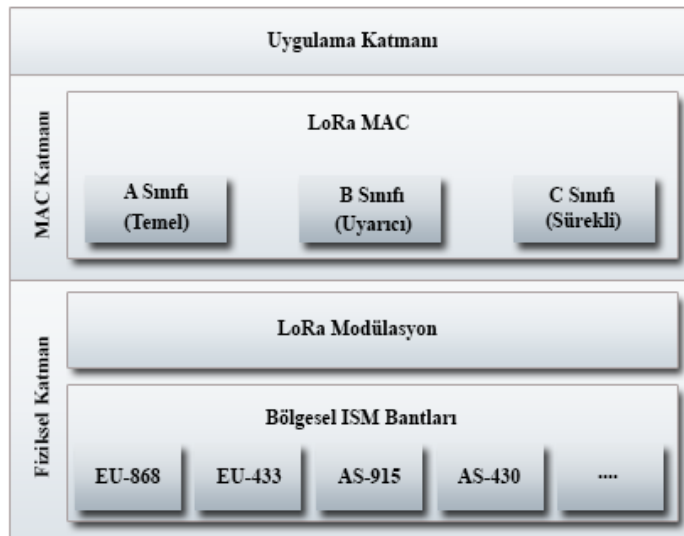
Yayılma Faktörü (SF)	Sembol Sayısı	Bant Genişliği (Hz)	Sembol Oranı (symbols/sec)	Bit Oranı (Bit Rate) (bits/sec)
7	128	125000	976,56250000	6835,9375000
8	256	125000	488,28125000	3906,2500000
9	512	125000	244,14062500	2197,2656250
10	1024	125000	122,07031250	1220,7031250
11	2048	125000	61,035156250	671,38671875
12	4096	125000	30,517578125	366,21093750

2.2. LoRaWAN

LoRa™ fiziksel katmanı (PHY), uzun menzilli iletişim bağlantısını sağlarken LoRaWAN, ağ için Ortam Erişim Kontrolü (MAC) katman protokolünü ve sistem mimarisini tanımlar. Protokol ve ağ mimarisi, bir düğümün pil ömrünü, ağ kapasitesini, servis kalitesini, güvenliği ve ağ tarafından sunulan uygulama çeşitliliğini belirlemede en fazla etkiye sahiptir [36].

Şekil 2.1’deki LoRa™ protokol yığını uygulama katmanı, MAC katmanı ve fiziksel katmandan (Modülasyon ve Bölgesel ISM bandını içeren) oluşmaktadır [48].

Uygulama katmanından gelen veriler, son cihaz ile ağ geçidi arasında bağlantı kurmak için gerekli olan MAC komutları MAC yükü(payload) olarak taşınır ve ardından MAC katmanı MAC yükünü kullanarak MAC çerçevesini oluşturur.



Şekil 2.1. LoRa™ Protokol Yığını [48].

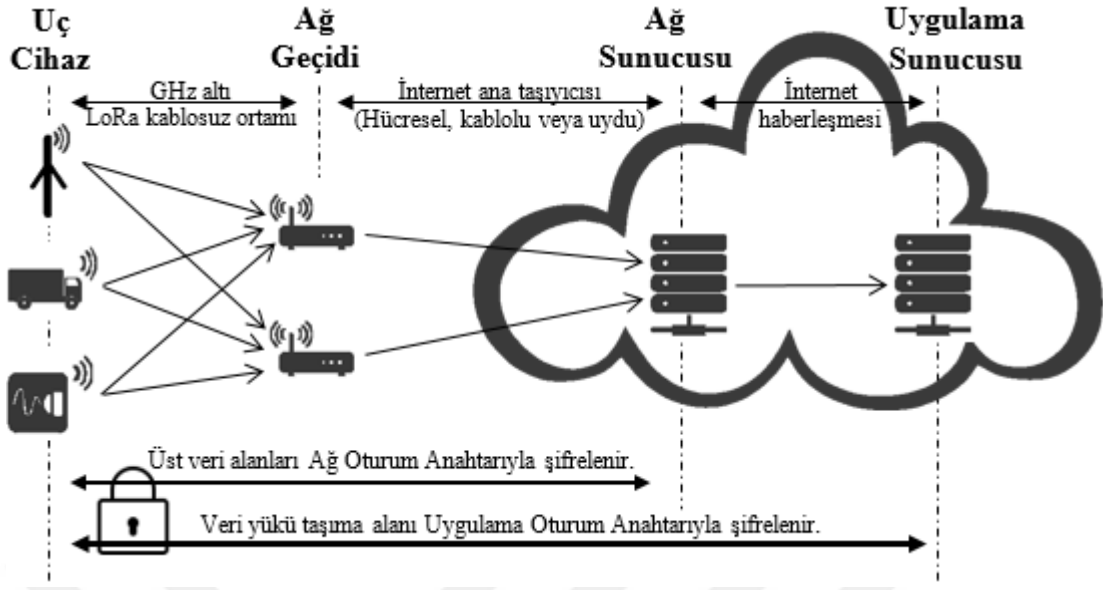
Son olarak, PHY katmanı PHY yükü olarak MAC çerçevesini kullanır ve başlangıç (preamble), PHY başlığı/üst bilgisi (header), CRC ve tüm CRC çerçevesini yerleştirdikten sonra PHY çerçevesini oluşturur. Bu nihai çerçeve, istenen RF taşıyıcısı kullanılarak hava ortamından iletimi sağlanır [32].

Frekanslar, bantlar, güç seviyeleri, modülasyon ve temel RF protokollerini içeren RF parametrelerinin tümü LoRa™ RF veya fiziksel katman özelliklerinde bulunmaktadır [32]. LoRa™ , LoRaWAN™ Bölgesel Parametreler 1.1’de yer alan ve bölgeden bölgeye değişen farklı kanal planları uygulamaktadır. Bu kanal planları, EU863-870, US902-928, CN779-787, EU433, AU915-928, CN470-510, AS923, KR920-923, IN865-867 ve RU864-870 olarak verilebilir.

Herhangi bir LPWAN’ın güvenliğini sağlamak son derece önemlidir. LoRaWAN™ teknolojisinde biri ağ ortamı diğeri uygulama için olmak üzere iki güvenlik katmanını kullanmaktadır [32].

2.3. LoRaWAN Ağ Mimarisi

LoRaWAN ağ mimarisi, uç cihazların yalnızca LoRaWAN ağ geçitleriyle iletişim kurabildiği ve doğrudan birbirleriyle iletişim kuramayacağı bir yıldız topolojisine sahiptir. Birden fazla ağ geçidi merkezi bir ağ sunucusuna bağlıdır. LoRaWAN ağındaki son cihazlar belirli bir ağ geçidi ile ilişkili değildir. Dolayısıyla bir son cihaz tarafından iletilen paketler, birden fazla ağ geçidi tarafından –eğer kapsama alanında ise- alınabilir. Her ağ geçidi, alınan bu paketi son cihazdan bulut tabanlı merkezi ağ sunucusuna bazı ana taşıyıcılar (backhaul) (örn: hücresel, ethernet, uydu veya Wi-Fi) vasıtasıyla iletir. Bir başka deyişle LoRaWAN ağ geçitleri sadece uç cihazlardan gelen ham veri veya komut paketlerini UDP/IP paketleriyle kapsülleyerek merkezi ağ sunucusuna iletilmesinden sorumludur. Ağ sunucusu, ağı yönetmekten, gereksiz gelen paketleri filtrelemekten (duplication), güvenlik kontrolleri yapmaktan, en uygun ağ geçidi üzerinden onayları (ACK) planlamaktan, Uyarlamalı Veri Oranını uygulamaktan, geçerli paket bir veri paketi ise ilgili uygulama sunucusuna paketi iletmekten ve gerekirse son cihazlara doğru aşağı-bağlantı (downlink) paketleri ve MAC komutları göndermekten sorumludur. Ayrıca, iletişim üçüncü tarafların sahip olabileceği uygulama sunucularında sonlandırılır. Tek bir ağ sunucusuna birden fazla uygulama katmanı bağlanabilir. Şekil 2.2 LoRaWAN ağ mimarisi temsil etmektedir [36,37,38].



Şekil 2.2. LoRaWAN Ağ Mimarisi

Ağ güvenliği, cihazın ağdaki güvenilirliğini sağlarken, uygulama katmanı güvenliği, ağ operatörünün son kullanıcıların uygulama verilerine erişememesini sağlar. Veriler ilk önce bir Ağ Oturum Anahtarı (NwkSKey) ile ardından bir Uygulama Oturum Anahtarı (AppSKey) ile AES şifreleme algoritması kullanılarak şifrelenmektedir. Bu sayede verilere sadece ilgili uygulama sunucusu erişebilmektedir.

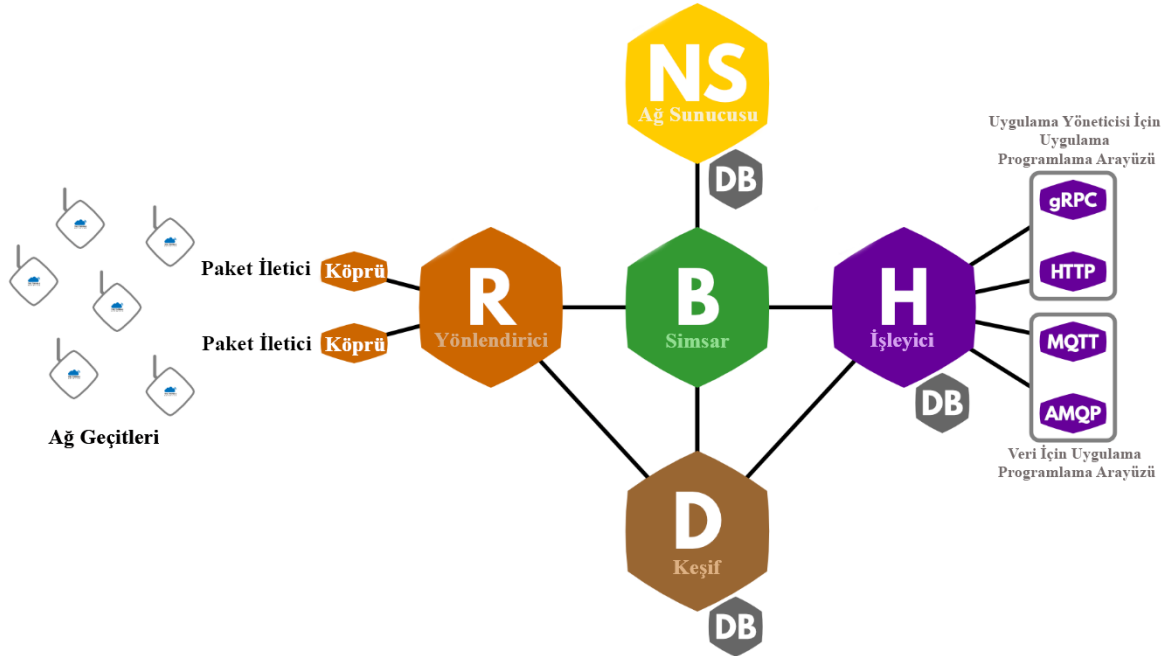
2.4. Nesnelerin Ağı (TTN)

Nesnelerin Ağı (TTN), topluluk üyeleri ve gönüllüler tarafından geliştirilen ve bakımı yapılan dünya çapında bir LoRaWAN oluşturmak için topluluk temelli bir girişimdir. Bu tez çalışmasında LoRaWA ağ ortamı düşük maliyetli, güvenli ve ölçeklendirmeyi destekleyen ve bir dizi açık araç sunan, herkesin kullanımına açık bulut tabanlı bir ağ olan The Things Network'e (TTN) entegre bir şekilde çalışmaktadır. Dolayısıyla TTN'nin LoRaWAN'da uyguladığı spesifik özelliklere bakmak çok önemlidir.

Nesneler Ağı'nın arka uç (backend) sistemleri, Nesnelerin İnterneti verilerinin cihazlar ve uygulamalar arasında yönlendirilmesinden sorumludur. Tipik bir Nesneler Ağı, belirli radyo protokolleri ile internet arasında bir köprü olarak ağ geçitleri gerektirir. Eğer uç cihazların kendisi IP yığınına destekliyorsa, bu ağ geçitleri yalnızca paketleri internete iletmesi yeterlidir. Aksine uç cihazlar LoRaWAN gibi IP dışı protokolleri destekliyorsa, mesajların bir uygulamaya teslim edilmesinden önce bir takım yönlendirme ve işleme ihtiyaçlarının karşılanmasını gerektirir. Nesneler Ağı, ağ geçitleri ve uygulamalar arasında konumlandırılırken yönlendirme ve işleme adımlarıyla ilgilenir.

Nesnelerin Ağı'nın vizyonu, tüm bu yönlendirme işlevlerini merkezi olmayan ve dağıtılmış bir şekilde gerçekleştirmektir. İlgilenen herhangi bir taraf kendi ağlarını ve arka uçlarının (backend) kendi bölümlerini kurabilmeli ve böylece küresel topluluk ağına katılmalarını sağlamalıdır. Ağın sorumluluğunu merkezden dağıtmak için, aşağıdaki şekilde (Şekil 2.3'de) gösterilen bir dizi bileşene ayrılmıştır.

Düğüm, LoRaWAN mesajlarını LoRa radyo protokolü üzerinden yayınlar. Bu mesajlar birçok Ağ Geçidi tarafından alınır. Ağ Geçidi, radyo yayınlarını arka uca (backend) ileten bir donanım parçasıdır. Ağ geçitleri de bir yönlendiriciye bağlanır. Yönlendirici, ağ geçidinin durumunu yönetmekten ve yayınları planlamaktan sorumludur. Her yönlendirici bir veya daha fazla simsara (Broker) bağlanır. Simsarlar (Brokers), Nesnelerin Ağı'nın merkezi parçasıdır. Sorumlulukları bir aygıtı bir uygulamaya eşlemek, yukarı bağlantı (Uplink) mesajlarını doğru uygulamaya iletmek ve aşağı bağlantı (Downlink) mesajlarını doğru yönlendiriciye iletmektir. Ağ Sunucusu, LoRaWAN'a özgü işlevlerden sorumludur. Bir işleyici (Handler), bir veya daha fazla uygulamanın verilerini işlemekten sorumludur. Bunu yapmak için uygulamaları ve cihazları kaydeden bir simsara (Broker) bağlanır. İşleyici (Handler) ayrıca verilerin şifreli veya şifresi çözülmüş bir noktadır.



Şekil 2.3. Nesnelerin Ağı'nın arka uç mimarisi [39].

Nesnelerin Ağı'nın amacı, dağıtım seçenekleri açısından çok esnek olmaktır. Tercih edilen seçenek, Nesnelerin Ağı Kuruluş'u (TTN Foundation) veya ortakları tarafından barındırılan kamu

topluluğu ağına (the public community network) bağlanmaktadır. Bu durumda, uygulama, genellikle MQTT API'sini kullanarak bir Kamu Topluluk Ağı İşleyicisine (Public Community Network Handler) bağlanır.

2.5. Opnet Modeler Simülasyon Aracı

Bir sistem oluşturulurken, o sistemin öncelikle modellenip simüle edilmesi, simülasyon ortamında denenmesi varsa hatalarının giderilmesi, yapılması gereken ilk aşamadır. Bu çalışmada da LoRaWAN ağının tüm düğümleriyle birlikte geliştirilerek modellenip simüle edilmesi, kablolu ve kablosuz sensör ağlarının en önemli olan simülasyon platformlarından olan Opnet (Optimized Network Engineering Tools) Modeler Simülasyon aracı (yeni adıyla Riverbed Modeler) kullanılmıştır. Bununla birlikte Opnet Modeler simülasyon aracının genel tanıtımı aşağıda verilmektedir.

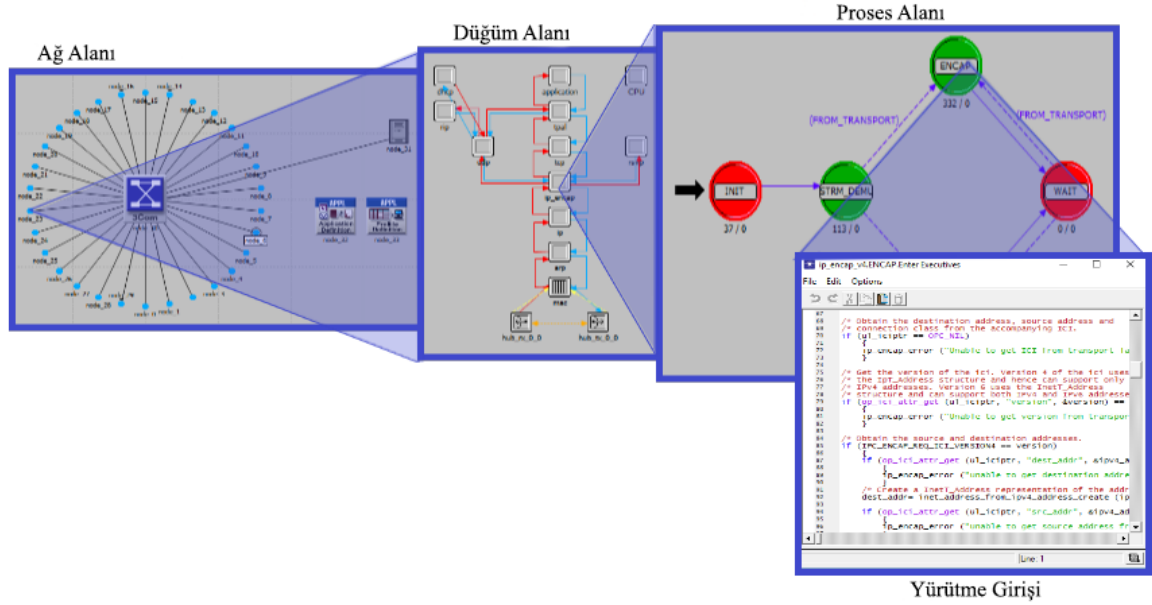
Opnet'in yazılım ortamı ağ araştırması ve geliştirmesi için uzman olduğundan “Modeler” olarak adlandırılmaktadır. Opnet Modeler haberleşme ağları, cihazları, protokolleri ve uygulamaları incelemek için esnek bir şekilde kullanılabilir. Ticari bir yazılım sağlayıcısı olmasından dolayı OPNET, kullanıcılar için nispeten daha güçlü görsel veya grafiksel destek sunar. Grafik düzenleyici arabirimi, uygulama katmanından fiziksel katmana kadar ağ topolojisi ve varlıkları oluşturmak için kullanılabilir. Nesne yönelimli programlama tekniği, grafik tasarımdan gerçek sistemlerin uygulanmasına kadar planlamanın oluşturulmasında kullanılır.

OPNET, modellenmiş bir sistemin davranışının özelliklerini yakalayan bir takım araç veya editörle model özelliklerini destekler. Model geliştiriciyi sezgisel bir arayüzle sunmak için, bu editörler gerekli modelleme bilgilerini gerçek ağ sistemlerinin yapısına paralel bir şekilde parçalara ayırır. Bu nedenle, model spesifikasyon editörleri esasen hiyerarşik bir biçimde düzenlenir. Proje Editörü'nde gerçekleştirilen model spesifikasyon, Düğüm Editörü'nde belirtilen öğelere dayanır; buna karşılık, Düğüm Editörü'nde çalışırken geliştirici, Süreç (Process) Editörü'nde tanımlanan modelleri kullanır. Kalan editörler, daha sonra süreç (Process) veya düğüm düzeyi modeller tarafından referans alınan, tipik olarak değer tabloları olan çeşitli veri modellerini tanımlamak için kullanılır [40,75].

Kısacası, Opnet Modeler'de bir sistemin modellenmesi, birçok editörde yapılan işlemlerin birleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Bir ağ içerisinde kullanılacak bağlantı hatları, veri ve komut paketleri, kullanılacak ağ elemanları, katmanlar ve protokoller farklı editörlerde hazırlanır. Bir düğüm modellenirken kullanılan bazı önemli editörler aşağıda kısaca açıklanmıştır;

Opnet Modeler Şekil 2.4 'de görüldüğü gibi herhangi bir ağı simüle edebilmek için ilk olarak hiyerarşik modellemenin en alt seviyesindeki editör olan süreç alanında (Process Domain/Editor), Düğüm Alanındaki (Node Domain/Editor) nesnelerin yapısının, işlevinin, parametrelerinin ve davranışlarının tanımlandığı, kontrol edildiği ve değiştirilebildiği alandır. Bu editör mantık sürecini

görsel olarak durum geçiş diyagramları (STD'ler) yoluyla tasvir etmeye olanak tanır. STD'lerde iki farklı türde durum mevcuttur; zorlanmış durum (forced state) ve zorlanmamış durum(unforced state).



Şekil 2.4. Opnet Modeler'in hiyerarşik modelleme yapısı

Eğer bir durum zorlanmış durum olarak seçilmişse yürütme girişi (Enter Executives) alanı yürütülecek ve ardından yürütme çıkışı (Exit Executives) alanı yürütülecek ve daha sonra başka bir duruma geçiş yapılacaktır. Fakat bir durum zorlanmamış durum olarak seçilirse yürütme girişi alanı yürütülecek ve ardından blokaj yapıp kontrolü simülasyon çekirdeğine bırakacaktır böylece yeni olayları yürütmesine imkan verecektir yani aynı durumda kalıp belirli bir olayın tetiklenmesini bekleyecektir. Belirli koşullar tetiklenirse, durumlar birbirleri arasında geçiş yapabilirler. Bazı işlemleri gerçekleştirmek için C/C++ kodları bir durum içerisinde ya yürütme girişi alanına ya da yürütme çıkışı alanına yazılmalıdır. İlgili durumun yürütme girişi alanına yazılan kodlar, ilgili duruma geçiş yapılır yapılmaz ilk olarak yürütülecek alandır. İlgili durumun yürütme çıkışı alanına yazılan kodlar ise yürütme girişi alanındaki kodlar yürütüldükten sonra yürütülecek olan kodların bulunduğu alandır [41,75].

Düğüm Düzenleyici (Node Editor/Domain), bir kullanıcının bir aygıtın veya düğümün iç yapısını oluşturabileceği ve düzenleyebileceği kullanıcı arayüz aracıdır. Bir düğüm bir bilgisayarı, anahtarı, yönlendiriciyi veya ağ bulutunu temsil edebilir. Bir düğüm birkaç modülden oluşur. Bu modüller genellikle mantıksal işlevlerle ayrılırlar ve birbirleriyle paket akışları (stream) ve istatistik akışları aracılığıyla iletişim kurabilirler. Paketler, paket akışları aracılığıyla bu modüller arasında geçiş yapabilir. Her modül, bu düğümün belirli bir işlevini temsil eder. Modüller, paketleri iletme, paketleri almak, işlem verileri, veri depolamak, rota paketleri vb. için kullanılabilir. Modüller

işlemci modülü, kuyruk modülü, alıcı-verici modülü, anten modülü ve harici sistem modülünü içerir. Bu modüller paket akışları ve istatistik akışları ile bağlanabilir [41,75].

Hiyerarşik modellemenin en yüksek modelleme katmanı olan Ağ Alanı'nın (Network Domain) rolü, bir iletişim ağının topolojisini tanımlamaktır. Haberleşen varlıklar düğümler olarak adlandırılır ve her bir düğümün özel yetenekleri onların “model”leri olarak tanımlanır. Düğüm modelleri, Düğüm Düzenleyicisi (Node Editor) kullanılarak geliştirilir. Tek bir ağ modeli içinde, aynı düğüm modeline dayanan birçok düğüm olabilir. Proje Editörü, ağ modeli geliştirme için coğrafi bir bağlam sağlar. Geniş alan ağlarının öğeleri için dünya veya ülke haritalarındaki yerleri seçebilir ve yerel alan ağları için boyutlandırılmış alanlar kullanılabilir. Ağ modellerini oluşturmak için kullanılan temel nesne, sabit haberleşme düğümüdür. Sabit düğümler isteğe bağlı konumlara atanabilir, ancak bir simülasyon sırasında konumları değişmez. OPNET radyo sürümleri, ağların sabit düğümler içermesine izin verir, ancak aynı zamanda mobil ve uydu düğümleri için yetenek ekleyebilir. Mobil düğümlere, bir simülasyon çalışması boyunca zamanlarının bir fonksiyonu olarak pozisyonlarını belirleyen önceden tanımlanmış yörüngeler atanabilir; benzer şekilde, uydu düğümlerine hareketlerini belirleyen yörüngeler atanır. Radyo versiyonunda, simülasyonlar üç tip düğümün tümünü içerebilir. Çoğu düğüm, işlevlerini bir ağ modelinde gerçekleştirmek için bazı veya tüm diğer düğümlerle iletişim kurma yeteneğini gerektirir. Birbirleriyle iletişim kuran düğümleri birbirine bağlamak için birkaç farklı tipte haberleşme bağlantı mimarisi sağlanır. OPNET çiftleri düğümleri bağlamak için simpleks (tek yönlü) ve dubleks (çift yönlü) noktadan noktaya bağlantılar ve rasgele geniş düğümler için yayın iletişimi sağlamak için bir veri yolu bağlantısı sağlar. Radyo versiyonu, sabit, uydu ve mobil düğümlerin radyo bağlantılarıyla birbirleriyle iletişim kurmasını sağlar. Açıkçası ağ alanı yani proje editörü ağ modellerinin geliştirildiği, alt ağların oluşturulduğu, bağlantı hatları, düğümler ve coğrafi içeriğin tanımlandığı alan ya da editördür. Bu editör temel benzetim ve analiz yeteneklerini de içerir. Yine bu editörde ağ düğümlerinin özellikleri, parametreleri değiştirilebilir ve ağ topolojileri tanımlanabilir, trafik üretilebilir ve simülasyon sonuçları elde edilerek grafiksel olarak gösterilebilir [40,41,75].

Yukarıda hiyerarşik modellemenin dışında kalan bazı önemli Opnet Modeller editörleri vardır. Bunlardan paket format editörü veri ve komut gibi bilgi paketlerinin tanımlandığı ve yapılarının değiştirilebildiği editördür. Paket içeriğindeki alanların adını, türünü, boyutunu ve varsayılan değerlerini belirten özellikleri vardır. Paket içeriğindeki alanlar integer, double, structure, information ve packet tipinde olabilir.

Bağlantı Editör (Link Editor), bir bağlantı modeli oluşturmanıza ve tanımlamanıza olanak tanır. Bir bağlantı modeli, düğümler arasındaki fiziksel bağlantıyı temsil eder. Bağlantı Editör'de veri hızı, bit hata oranı, kanal sayısı, yayılım gecikmesi, iletim gecikmesi, hata modeli, hata düzeltme modeli, desteklenen paket formatları vb. tanımlanabilir.

Arayüz Kontrol Bilgisi Editörü (ICI), bilgi taşıyabilen ve kesme tabanlı süreçler arası iletişimi kolaylaştıran bir OPNET iç yapısıdır. Bir süreç, diğer süreçlerle iletişim kurmak için kesmelerle ilişkili ICI nesnelere erişebilir.

PDF Editörü, bir veri dizisinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarını (PDF) oluşturmanıza, düzenlemenize ve görüntülemenize olanak tanır. Görüntülemek ve düzenlemek için bir veri dizisi PDF Editör'e yüklenebilir. Simülasyon istatistiksel sonuçları analiz için PDF Editör'e de aktarılabilir.

OPNET simülasyonunda, birçok istatistik türü vardır: küresel istatistik, düğüm istatistiği, bağlantı istatistiği, yol istatistikleri, vb. Bununla birlikte, üzerinde durulmak istenilen belirli bir istatistiğin seçilmesine olanak tanıyan Araştırma Editörü(Probe Editor) kullanılabilir. Yani istenilen istatistiklerin özelleştirilmesinde Araştırma Editörü kullanılır [41].

Özetle Opnet Modeler'de bir düğüm oluşturmak için öncelikle düğüm editörüyle düğümün modülleri tasarlanır ve bunlar arasında paket akışları sağlanır ve düğümler arasında haberleşme de kullanılacak paket formatları paket editörüyle tanımlanır, ardından oluşturulan her modül için süreç editöründe bir süreç tanımlanır ve gerekli fonksiyon blokları eklenir daha sonra proje editöründe çalışma ortamı seçilir, topoloji oluşturulur, kablolu ya da kablosuz link oluşturulur, ihtiyaç duyulan istatistiki bilgiler tutulur, parametreler girilir ve simülasyon yapılarak veriler toplanır.

3. LORA™ VE LORAWAN

Bu bölümde LoRa™ fiziksel katmanının kullandığı LoRa™ modülasyonu ve LoRaWAN ortama erişim kontrolü katmanının kullandığı sınıflar, paket formatları, bölgesel sınırlamalar, cihaz aktivasyonu ve güvenliği ile ilgili bilgiler detaylandırılmıştır.

3.1. LoRa™ Modülasyonu

LoRa, Uzun Menzilli (Long Range) anlamına gelmekte ve Semtech Firması'nın tescilli yayılı spektrum (spread spectrum) modülasyon tekniğini kullanır. Lora'nın en temel özelliği veri oranının düşmesi pahasına uzun menzilli iletişimi sağlayabilmesidir. LoRa'yı diğer modülasyon yöntemlerinden farklı kılan, alıcının sinyali demodüle edebilmesi için parazitlere karşı dayanıklılığının olması ve çok düşük, minimum bir SNR sağlayan benzersiz yayılma spektrum tekniğidir.

3.1.1. Shannon-Hartley Teoremi

Bilgi teorisinde, Shannon – Hartley teoremi, bilginin gürültü varlığında belirtilen bir bant genişliğinin bir iletişim kanalı üzerinden iletilebileceği maksimum oranı belirtir. Bu teorem Shannon'un bir haberleşme bağlantısı için kanal kapasitesini kurar ve gürültü girişimi varlığında belirli bir bant genişliği içinde iletilebilen maksimum veri oranını (bilgi) tanımlar [34]:

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

3.1 'deki denklem için bazı tanımlamalar aşağıdaki gibidir;

C : Kanal Kapasitesi (bit/s)

B : Kanal Bant Genişliği (Hz)

S : Ortalama Alınan Sinyal Gücü (Watts)

N : Ortalama Gürültü veya Girişim Gücü (Watts)

S/N : Doğrusal bir güç olarak ifade edilen Sinyal Gürültü Oranı (SNR)

Denklem 3.1, doğal logaritmaya dönüştürülüp yeniden düzenlenirse;

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

Yayılı Spektrum uygulamaları için sinyal gürültü oranı, sinyal gücü genellikle gürültü seviyesinin altında olduğu için küçüktür. $\frac{S}{N} < 1$ olduğu bir gürültü seviyesi varsayılırsa, denklem 3.2 aşağıdaki gibi yeniden yazılır;

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

yada

$$\frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'ten, sabit bir gürültü-sinyal oranındaki bir kanalda hatasız(error free) bilgiyi iletmek için, sadece iletilen sinyal bant genişliğinin artırılması gerektiği görülebilir [10].

3.1.2. Yayılı Spektrumun Temel Prensibi

Yukarıda belirtildiği gibi, sinyalin bant genişliğini artırarak, bir radyo kanalının sinyal-gürültü (ya da gürültü-sinyal) oranının bozulması telafi edilebilir.

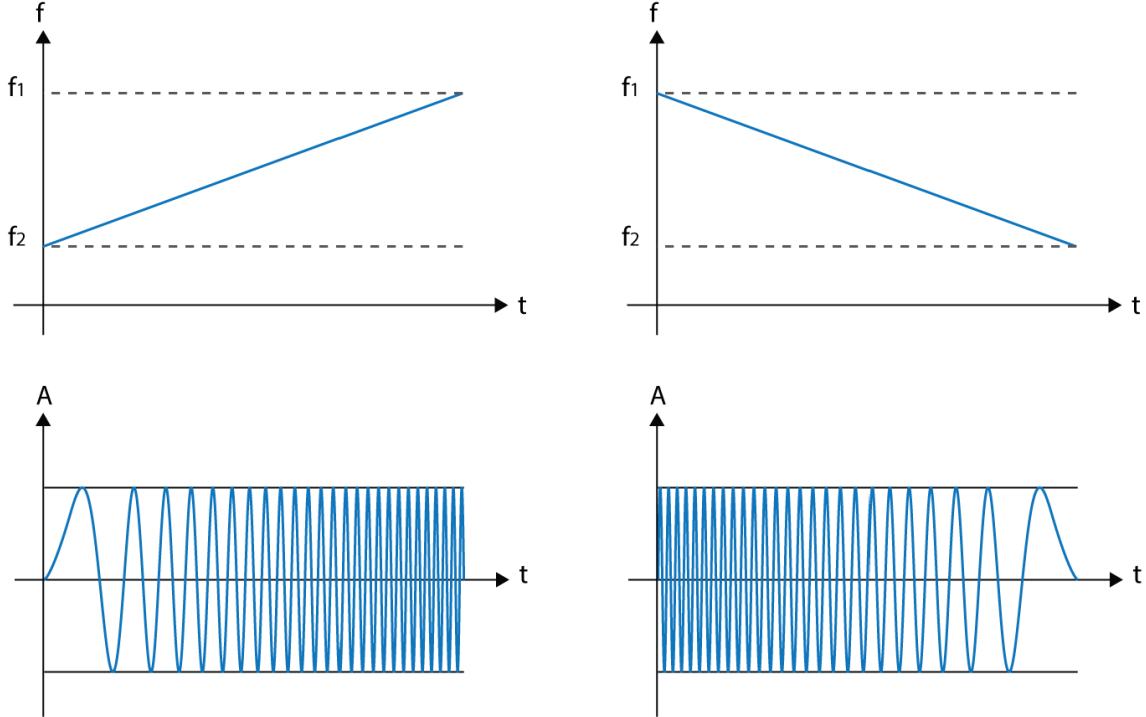
Yayılı Spektrum teknikleri, belirli bir bant genişliğiyle üretilen bir sinyalin frekans bölgesinde kasıtlı olarak yayıldığı ve daha geniş bir bant genişliğine sahip bir sinyale yol açtığı yöntemlerdir. LoRa™ modülasyonunda, spektrumun yayılması, frekansta sürekli olarak değişen bir chirp (Compressed High-Intensity Radiated Pulse) sinyali üretilerek elde edilir. Bu yöntemin bir avantajı, verici ve alıcı arasındaki zamanlama ve frekans kaymalarının eşdeğer olması ve alıcı tasarımının karmaşıklığını büyük ölçüde azaltmasıdır. Bu chirp'in frekans bant genişliği, sinyalin spektral bant genişliğine eşdeğerdir. İstenen veri sinyali daha yüksek bir veri oranında yontulur ve chirp sinyaline modüle edilir. [34]

3.1.3. LoRa Yayılı Spektrum

LoRa, bilgileri kodlamak için belirli bir süre boyunca frekansı artan veya azalan geniş bantlı doğrusal frekans modülasyonlu darbeleri kullanan ve ileri hata düzeltme (FEC) tekniğiyle bütünleştirilen Chirp Spread Spectrum (CSS) şemasına dayanmaktadır [42,43]. Yüksek bant genişliğine sahip ürünün kullanılması, radyo sinyallerini bant içi ve bant dışı girişimlere karşı dirençli kılarken, yeterince geniş bantlı chirp'lerin kullanılması, çok yollu sönmülemeye (fading) karşı dayanıklılığını arttırmayı sağlar [42].

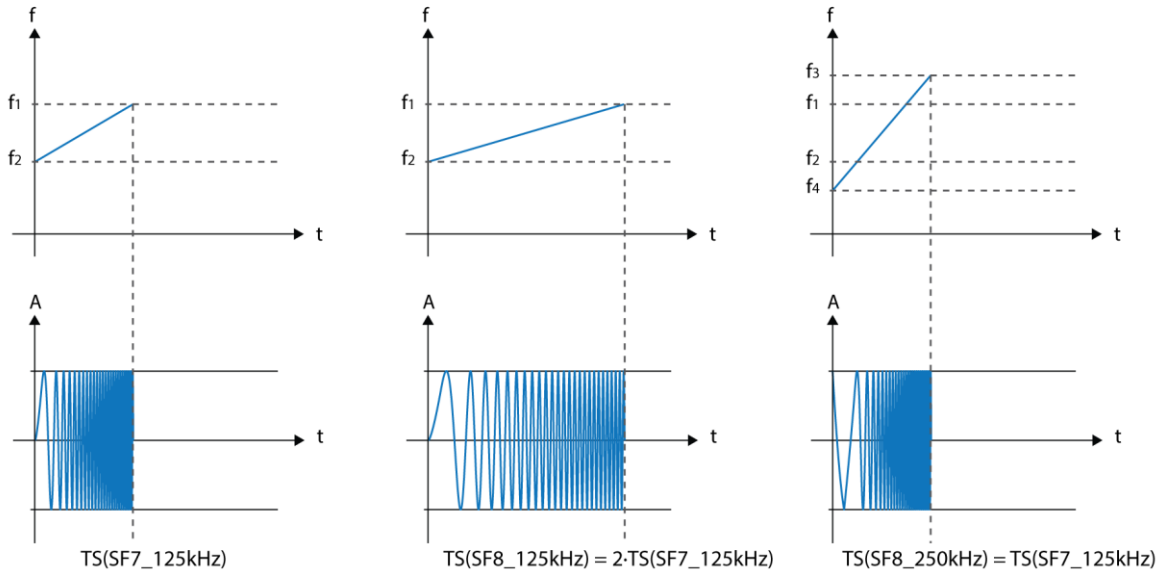
LoRa iletimleri, bir sembolü kodlamak için, zaman ve frekans bakımından farklı yerlerden chirp'leri parçalayarak/keserek çalışır. Önemli LoRa özelliklerinden biri, bir frac-N faz kilit halkası

(PLL) kullanarak stabil bir chirp oluşturma yeteneğidir[32]. Şekil 3.1'de yukarı ve aşağı doğrusal chirp dalga biçimi ve zaman içindeki frekans değişimini göstermektedir.



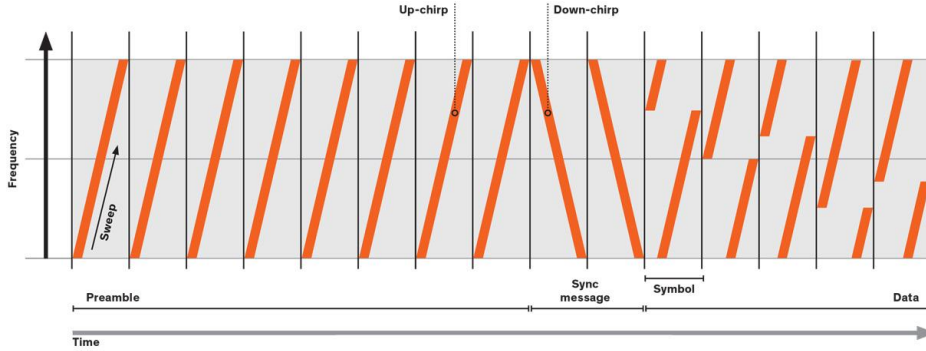
Şekil 3.1. Zaman içinde doğrusal olarak frekansta artan veya azalan sinüsoidal bir chirp dalga formatı. Sol: Yukarı chirp dalga formatı (Up Chirp). Sağ: Aşağı chirp dalga formatı (Down Chirp) [32].

Seçilen bant genişliğine ve yayılma faktörüne bağlı olarak, frekans taramasının süresi (sembol süresi) az çok zaman alacaktır. Seçilen yayılma faktörü'ndeki bir artış, sembolün süresini 2 katına çıkaracaktır, bu nedenle SF12'de gönderilen bir sembol, SF7'de gönderilen bir sembolden 32 kat daha uzun olacaktır. Bununla birlikte, bant genişliği zamanla ters orantılı olup, bant genişliğinin 2 katına çıkarılması, sembol süresini yarıya düşürecektir. Şekil 3.2 'de yayılma faktörü ve bant genişliği gibi parametrelerin, iletimin sembol süresini (TS'yi) nasıl belirlediğini göstermektedir. Bu şekilde 125 kHz'lik bir bant genişliğine sahip SF7 ile SF8 yayılım faktörleri arasındaki sembol süreleri dikkate alınırse yayılım faktöründeki bir birimlik artışın sembol süresini 2 katına çıkardığı ya da SF8 yayılım faktörünün 125 kHz ve 250 kHz'lik bant genişliği ile birlikte kullanıldığında sembol süresi dikkate alınırse bant genişliğinin 2 katına çıkması sembol süresini 2'ye bölmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 3.2. Sembol zamanı, Yayılma Faktörü ve seçilen bant genişliği arasındaki ilişki [32].

Bant genişliği, LoRa modülasyonunun en önemli parametresidir. Bir LoRa sembolü, tüm frekans bandını kapsayan 2^{SF} chip'lerden oluşur. Bir dizi yukarı chirp (Up-chirp) ile başlar. Bandın maksimum frekansına ulaşıldığında, frekans başa sarılır ve frekanstaki artış tekrar minimum frekanstan başlar.



Şekil 3.3. Bir mesajın chirp sinyalleri üzerine kodlanması [44].

Öte yandan, LoRa modülasyonu ile bir bilginin/mesajın aktarımı için bir sinyalin frekanstaki değişimi yani chirp'ler aracılığıyla sağlanır. Şekil 3.3'te, bir bilginin/mesajın chirp sinyalleri üzerine nasıl kodlandığını gösteren bir örnek verilmektedir. Gürültülü bir ortamda, alıcı modülü 8 tane önsöz (preamble) yukarı-chirp'i (Up-chirp) ve ardından 2 tane aşağı-chirp'i (Down-chirp) yakalayarak mesajı senkronize eder. Daha sonra, her bir frekansın belirli bir bit dizisini işaret ettiği,

belirli frekanslarda başlayan yukarı-chirp'ler (yani semboller) gelir. LoRa'nın chirp'leri, bu yöntemi parazitlere karşı daha dayanıklı hale getirmektedir.

LoRa'da, chip oranı (chip rate) sadece bant genişliğine bağlıdır: chip oranı bant genişliğine eşittir (bant genişliğinin Hertz'i için saniyede bir chip). Bunun modülasyon üzerinde birkaç sonucu vardır: yayılma faktöründen birinin artması, bir chirp'in frekans aralığını ikiye böler (2^{SF} chip tüm bant genişliğini kaplar gibi) ve bir sembolün süresini de iki ile çarpar. Ancak, her bir sembolde bir bit daha gönderileceğinden bit oranını (bit rate) ikiye bölmeyecektir. Dahası, belirli bir yayılma faktöründeki sembol oranı (sembol rate) ve bit oranı, frekans bant genişliği ile orantılıdır, bu nedenle bant genişliğinin iki katına çıkması, iletim oranını iki katına çıkarmaktadır.

LoRa modülasyonu için önemli olan bit oranı, sembol oranı ve çip (chip) oranı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi açıklanabilir [34];

Modülasyon bit oranı, R_b , yayılım faktörü ve bant genişliğine (BW) bağlı olmakla birlikte bu parametrelerin değişmesi ile birlikte bit oranı yani veri oranı değişmektedir. Bu oran kullanılan bant genişliği (Hz) ve yayılım faktörüne (SF) göre saniyede modüle ve demodüle edilebilecek bit sayısını belirtir. Aşağıdaki denklemlerde geçen yayılım faktörü, $SF \in \{7,8,9,10,11,12\}$ 'dir.

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} \text{ (bits/sec)} \quad (3.5)$$

Her bir sembol için sembol periyodu, T_s , kullanılan yayılım faktörü ve bant genişliği ile belirlenebilmektedir.

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \text{ (secs)} \quad (3.6)$$

Sembol oranı ise, R_s , sembol periyodunun (3.6 denklemi) çarpma işlemine göre tersi ile hesaplanmaktadır. Bu oran kullanılan bant genişliği ve yayılım faktörüne göre saniyede modüle ve demodüle edilebilecek sembol sayısını belirtir.

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ (symbols/sec)} \quad (3.7)$$

Çip oranı, R_c , sembol oranı ve yayılım faktörü ile ifade edilmektedir. 3.7'deki denklemde sembol oranı, açık bir şekilde, 3.8'deki denklemle yeniden düzenlenirse 3.9'daki denklem elde edilebilir. Bu denklemde de görüldüğü gibi çip oranı sadece bant genişliğine bağlıdır.

$$R_c = R_s * 2^{SF} \text{ (chips/sec)} \quad (3.8)$$

ya da

$$R_C = BW \text{ (chips/sec)} \quad (3.9)$$

LoRa, hata düzeltme kodu olarak ileri hata düzeltme kodu (FEC)'nu kullanmaktadır. Kod oranı, CR, denklem 3.10'da görülmektedir. Bu denklemde $n \in \{1,2,3,4\}$ 'dir. Kod oranı basit bir örnekle şu şekilde ifade edilebilir; iletilecek bir paketin 30 bit uzunluğunda olduğu varsayılırsa ve $n = 1$ ise kod oranı $\frac{4}{5}$ olmakta ve 30 bitlik paketin 24 biti gönderilmek istenen veri iken 6 biti hata düzeltme bitini ifade etmektedir.

$$\text{Code Rate} = \frac{4}{4 + n} \quad (3.10)$$

LoRa'da iletilecek pakette/veride hata düzeltme kodu kullanılması halinde bit oranı denklem 3.11 'deki gibi hesaplanabilir. Bu denklem ile yukarıdaki denklem 3.5'in farkı; denklem 3.5'te eğer hata düzeltme kodu kullanılıyorsa hata düzeltme bitlerinin içinde olduğu bit oranı verilmekteyken denklem 3.11'de hata düzeltme bitlerinin çıkarılarak asıl iletilmek istenen bit oranı verilmektedir.

$$R_b = SF * \frac{\text{Code Rate}}{\frac{2^{SF}}{BW}} \text{ (bits/sec)} \quad (3.11)$$

LoRa modülasyonunda bahsi geçen chirp ve çip (chip) gibi kavramlar birbirinden farklı anlamlara sahiptir; bir sembol 2^{SF} çip ile ifade edilirken bir chirp düşük frekanstan yüksek frekansa (up-chirp) veya yüksek frekanstan düşük frekansa (down-chirp) kadar olan rampalardır[45].

3.1.4. Bağlantı Maliyeti

Bir kablosuz sistemin veya ağın bağlantı bütçesi, bir yayılma kanalı vasıtasıyla vericiden hedef alıcıya gelen tüm kazanç ve kayıpların bir ölçüsüdür. Bu kazançlar ve kayıplar, anten ve eşleşen ağlar vb. gibi ilişkili sistem kazanımlarının ve kayıplarının yanı sıra yayılma kanalının kendi (ya modellenirken ya da ölçülen verileri varsa) kayıplarını da içerir.

Tipik olarak rasgele değişen çok yollu ve Doppler sönümlemesi gibi kanal mekanizmaları, beklenen ciddiyetine bağlı olarak ilave marj faktörü ile dikkate alınır.

Bir kablosuz ağ bağlantısının bağlantı maliyeti şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_{RX}(dBm) = P_{TX}(dBm) + G_{SYSTEM}(dB) - L_{SYSTEM}(dB) - L_{CHANNEL}(dB) - M(dB) \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'deki ifadeler aşağıdaki gibi açıklanabilir;

- P_{RX} : alıcı da alınması beklenen güçtür,
- P_{TX} : iletilen güçtür,
- G_{SYSTEM} : yönlü antenler vb. gibi sistemle ilgili olan kazanımlardır,
- L_{SYSTEM} : besleme hatları, antenler vb. gibi sistemle ilgili olan kayıplardır,
- $L_{CHANNEL}$: yayılma kanalından kaynaklanan kayıplardır; ya çok çeşitli kanal modelleri ya da deneysel veriler aracılığıyla hesaplanır.
- M : sönümleme marjıdır; ya deneysel verilerden ya da tekrar hesaplanarak elde edilir.

Alıcı tarafında doğru bir demodülasyon elde etmek için, vericiden gelen sinyalin, alıcı tarafında hem hassasiyet (sensitivity) hem de SNR gibi sınırlama kriterlerini sağlaması gerekir. Alıcı tarafında bu kriterlerin değeri ne kadar küçük olursa alıcının hassasiyeti o kadar artar. Alıcı için belirtilen SNR ve hassasiyet değerlerinin altında bir sinyal algılanırsa bu sinyal demodüle edilemez ve bağlantı sağlanamaz [46,47].

LoRa cihazındaki RF hassasiyeti yayılım faktörüne ve modüle edilen sinyalin bant genişliğine bağlıdır. Tablo 3.1'deki, SX1276 veri-sayfası [46]'e göre EU868 frekans bandı, 125 kHz bant genişliği ve farklı yayılım faktörleri için LoRa son cihazının alıcı hassasiyeti ve SNR değerleri görülmektedir. Bant genişliğinin artmasına paralel olarak hassasiyet azalmaktayken yayılım faktörünün artmasına paralel olarakta hassasiyet artmaktadır.

Tablo 3.1. SX1276 alıcı-vericisi için belirtilen alıcı hassasiyeti ve SNR değerleri

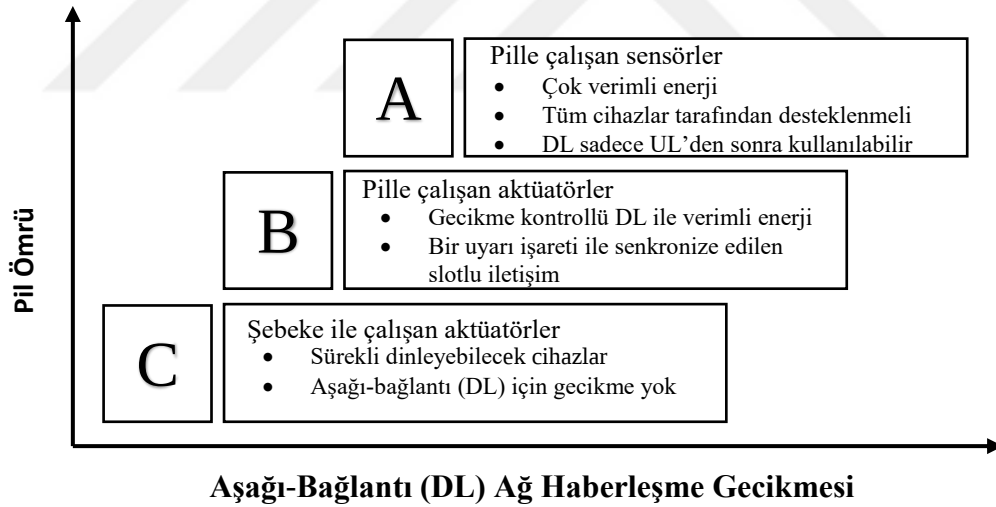
Yayılım Faktörü	Alıcı Hassasiyet (dBm)	SNR (dB)
SF7	-123	-7.5
SF8	-126	-10
SF9	-129	-12.5
SF10	-132	-15
SF11	-133	-17.5
SF12	-136	-20

3.2. LoRaWAN

Bu bölümde LoRaWAN alım pencerelerinin sınıflandırılması, paket formatları, bölgesel sınırlandırmaları, uç cihazların ağa katılım süreçleri, veri ve komut transferlerindeki kimlik doğrulaması ayrıntılı olarak incelenecektir.

3.2.1. LoRaWAN Sınıfları

Son cihazlar farklı uygulamalara hizmet eder ve farklı gereksinimlere sahiptir. Çeşitli son uygulama profillerini optimize etmek için LoRaWAN™ farklı cihaz sınıflarını kullanır. Cihaz sınıfları, batarya kullanım ömrüne karşı ağ, aşağı-bağlantı (DL) iletişim gecikmesini dengelemektedir. Bir kontrol veya aktüatör tipli uygulamada, aşağı-bağlantı iletişim gecikmesi önemli bir faktördür. Bir LoRa™ ağında, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi çift yönlü üç tane A, B ve C adlarında olmak üzere sınıflar bulunmaktadır [36,48]. Bu sınıflardaki bazı parametreler LoRa Birliği'nin Türkiye için olan bölgesel düzenlemesi EU863-870 MHz endüstriyel bilimsel ve tıbbi (ISM) radyo bandı kullanılarak detaylandırılmıştır.

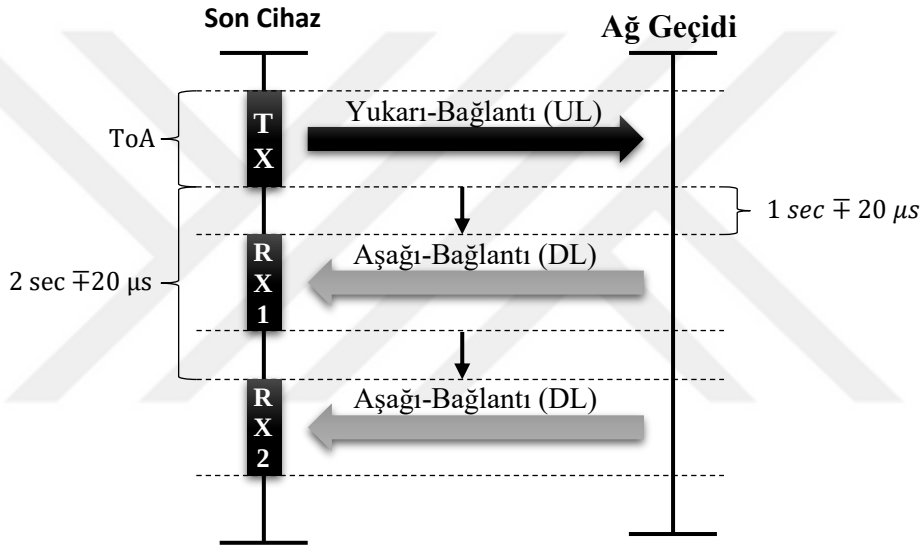


Şekil 3.4. Bir LoRa™ ağındaki sınıfların karşılaştırılması [35].

Bir LoRa™ ağı, temel bir LoRaWAN sınıfı (Sınıf A) ve isteğe bağlı özellikleri olan sınıflar (Sınıf B, Sınıf C) arasında ayırım yapmaktadır;

Sınıf A ve Alım Penceleri

A Sınıfı uç cihazları, her uç cihazın yukarı bağlantı (UL : Uplink) iletiminin ardından iki kısa aşağı bağlantı (DL :Downlink) alma penceresi izleyen çift yönlü iletişime izin verir. Son cihaz tarafından planlanan iletim yuvası, rastgele bir zaman bazında (ALOHA-tipi protokol) temel alan küçük bir değişiklikle kendi iletişim ihtiyaçlarına dayanmaktadır. Bu A Sınıfı işlem, son cihaz bir yukarı bağlantı (UL) iletimi gönderdikten kısa bir süre sonra sunucudan sadece aşağı bağlantı (DL) iletişimi gerektiren uygulamalar için en düşük güçlü son cihaz sistemidir. Sunucudan herhangi bir zamanda aşağı bağlantı (DL) yapılabilmesi için, bir sonraki programlanılan yukarı bağlantıya (UL) kadar beklemek zorunda kalacaktır [36].



Şekil 3.5. Sınıf A'ya göre son cihazın alım slotlarının zamanlaması

Ağ geçitleri enerjilerini şebekeden aldıkları için sürekli dinleme modunda çalışırlar ve sadece iletim yaptıklarında alım yapamazlar. Son cihaz bir yukarı-bağlantı paket aktarımı yaptığında menzili içerisinde kaç tane ağ geçidi varsa hepsi bu paketi yakalayıp merkezi sunucuya (NS) iletir. Bu durumda NS'ye aynı son cihazın aynı paketi birden fazla gelecek ve NS tarafında aynı son cihaz için aynı paketlerden sadece biri alınıp diğerleri yok edilecektir. NS'den son cihaza bir aşağı-bağlantı ile cevap verilmek istendiğinde alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) hangi ağ geçidinde yüksek ise sadece o ağ geçidine paket gönderilir.

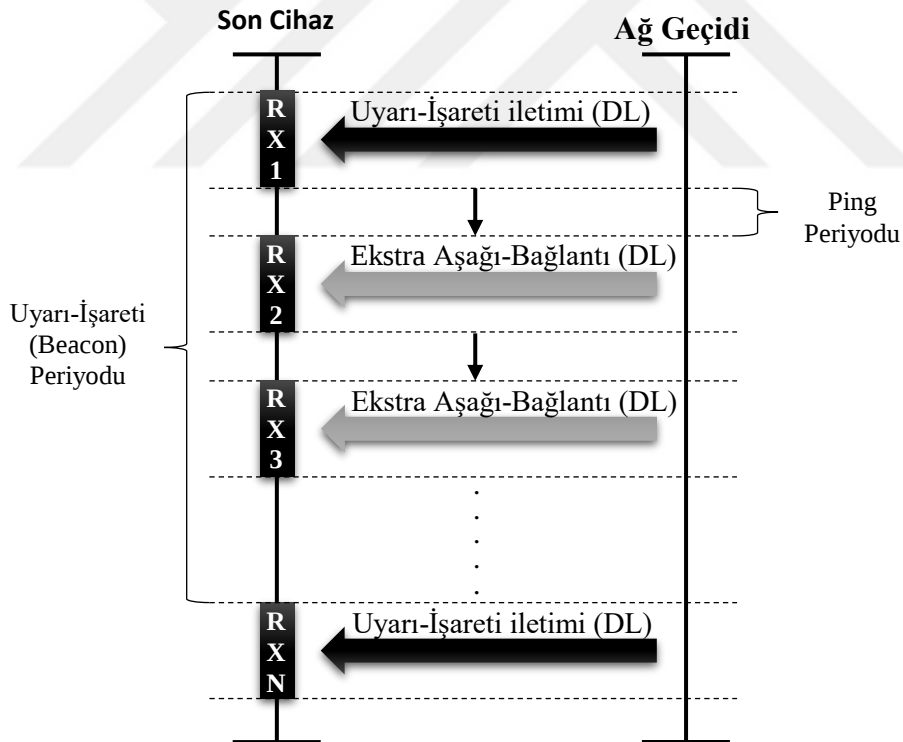
LoRaWAN Spesifikasyon 1.1 ve LoRaWAN Bölgesel Parametreler 1.1'e göre çizimi yapılan Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi son cihaz yukarı-bağlantı yaptıktan yaklaşık 1 sn sonra Rx_1 alım penceresini açmaktadır ve bu pencere bir aşağı-bağlantı paketinin gelmesini bekler. Eğer Rx_1 alım penceresi süresi içerisinde son cihaz tarafından bir paket yakalanırsa artık Rx_2 alım penceresi açılmaz. Eğer Rx_1 alım penceresi süresi içerisinde son cihaz tarafından bir paket yakalanmaz ise

Rx_2 alım penceresi açılır ve bu pencerenin süresi kadar bir aşağı-bağlantı paketinin yakalanması beklenir. Bu iki alım penceresinde herhangi bir aşağı-bağlantı paketi yakalanmaz -NS bir cevap gönderemez- ise bir sonraki yukarı-bağlantıya kadar beklenmesi gerekir.

Son cihazda yukarı-bağlantı iletimi hangi veri oranı (SF), frekans, bant-genişliği ve kod oranı (CR) ile yapılırsa Rx_1 alım penceresinde de aynı radyo parametreleri kullanılır. Tüm bu varsayılan parametreler bölgesel düzenlemelere göre LoRa Birliği tarafından [49]'da belirtilmiştir. Rx_2 alım penceresinde ise bu parametrelerden veri oranı ve frekans sabittir. Rx_2 alım penceresi için varsayılan parametreler 869.525 MHz ve DR0 (SF12, 125 kHz) olarak sabittir.

Sınıf B ve Alım Penceleri

B sınıfı cihazlar, A sınıfında belirtilen iki zaman dilimine/slotuna (Rx_1 ve Rx_2 'ye) ek olarak programlanılan zamanlarda ekstra alım pencerelerini açar. Son cihazın, alım penceresini programlanılan zamanda açması için, ağ geçidinden zaman senkronizeli bir uyarı-işareti (beacon) alır. Bu, sunucunun son cihazın ne zaman dinlediğini bilmesini sağlar.



Şekil 3.6. Sınıf B'ye göre son cihazın alım slotlarının zamanlaması

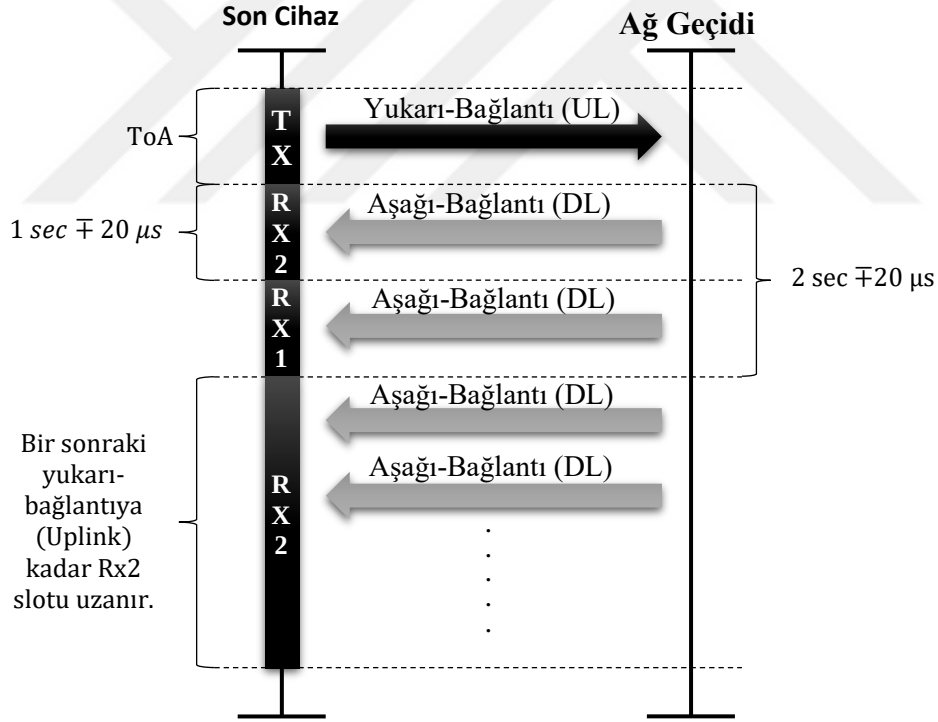
B Sınıfının amacı, A Sınıfının son cihazından rastgele yukarı bağlantı (uplink) iletimini izleyen alım pencerelerine ek olarak, öngörülebilir bir zamanda alım için bir son cihaza sahip olmaktır. B Sınıfı, ağ geçidinin ağdaki tüm son cihazları senkronize etmek için düzenli olarak bir uyarı-işareti (beacon) göndermesiyle sağlanır, böylece son cihaz periyodik bir zaman slotu

esnasında kısa bir ekstra alım penceresi -"ping slot"- açabilir. [48]'e göre çizimi yapılan Şekil 3.6'da da görüldüğü gibi Rx_1 ve Rx_N alım penceresi, uyarı-işareti (beacon) slotu iken Rx_2 'den Rx_{N-1} 'e kadar olan tüm alım pencereleri ping slotudur. Son cihazlar bu ping slotlarının süresi içerisinde herhangi bir aşağı-bağlantı (downlink) paketini alabilir.

B sınıfı'nın A sınıfından farkı; A sınıfında en fazla iki tane alım penceresi/slotu varken B sınıfında istenildiği kadar alım penceresi/ping slotu kullanılabilir. B sınıfında daha fazla alım slotu kullanılması A sınıfına göre daha fazla son cihazın enerji tüketimine de neden olmaktadır.

Sınıf C ve Alım Pencereleri

C sınıfı uç cihazlar neredeyse sürekli olarak açık olan alım pencerelerine sahiptir, sadece iletim sırasında kapalıdır. C sınıfını kullanan son cihazlar, A ve B sınıfını kullananlardan çok daha fazla enerji tüketimine sahiptirler. Bu sınıfı kullanan son cihazların besleme gücü, şebekeden karşılanmaktadır.



Şekil 3.7. Sınıf C'ye göre son cihazın alım slotlarının zamanlaması.

C Sınıfı son cihaz, Rx_2 alım penceresini olabildiğince sık dinleyecektir. Bu sınıfı kullanan son cihaz, A sınıfındaki Rx_1 ve Rx_2 alım pencerelerinin ikisi de kullanmaktadır. C sınıfının A sınıfı ile en büyük farkı; A sınıfındaki sırası ile açılan Rx_1 ve Rx_2 alım pencerelerinin süreleri bittiğinde son cihaz uyku moduna geçmekte iken, [48] , [49] ve [50]'ye göre çizilen Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, C sınıfındaki sırası ile açılan Rx_2 ve Rx_1 alım pencerelerinin süreleri bittiğinde tekraren açılan

Rx_2 alım penceresi yeni bir yukarı-bağlantı (uplink) yapılana kadar açık kalmaktadır. Dolayısıyla C sınıfını kullanan bir son cihaz uyku moduna hiç geçmemektedir.

3.2.2. LoRaWAN Paket Formatları

LoRaWAN protokolü, yukarı-bağlantı (uplink/UL) ve aşağı-bağlantı (downlink/DL) mesajları/paketleri olmak üzere temelde iki farklı mesaj türünden oluşmaktadır. Son cihazlar tarafından ağ geçidine (merkezi ağ sunucusuna) doğru gönderilen mesajlar yukarı-bağlantı mesajları olurken ağ geçitleri (merkezi ağ sunucusuna) tarafından son cihazlara doğru gönderilen mesajlara aşağı-bağlantı mesajları olmaktadır. Ayrıca aşağı-bağlantı ve yukarı-bağlantı mesajları, onaylı (confirmed) ve onaysız (unconfirmed) mesajlar olmak üzere iki tiptir. Onaylı bir mesaj iletildiğinde, ilgili cihaz (son cihaz ya da sunucu) mesajın kendisine ulaştığına dair bir geri bildirim mesajı iletirken onaysız bir mesaj iletildiğinde, ilgili cihaz bu mesajın alındığına dair bir geri bildirim mesajı iletmemektedir. LoRaWAN protokolündeki onaylı ve onaysız mesaj tiplerinin anlamları, IEEE 802.15.4 ve ZigBee gibi protokollerde mevcut olan ACK'lı ve ACK'sız mesajlara karşılık gelmekteyken kullanım biçimleri farklılaşmaktadır [48].

Fiziksel (PHY) Katmanın Mesaj Formatı

LoRa modem, açık (explicit) ve kapalı (implicit) olmak üzere iki tür paket formatı kullanır. Açık paket, pakette bir CRC'nin kullanılıp kullanılmadığı, kodlama oranı (CR) ve bayt sayısı hakkında bilgi içeren kısa bir başlık içerir. Paket formatı hem yukarı-bağlantı hem de aşağı bağlantı için aşağıdaki şekilde gösterilmiştir [46].

Yukarı-bağlantı (uplink) mesajları (Şekil 3.8), LoRa fiziksel başlığının (PHDR) ve bir başlık CRC'sinin (PHDR_CRC) dahil olduğu LoRa radyo paketinin açık modunu kullanır. Yükün (payload) bütünlüğü bir CRC tarafından korunmaktadır. PHDR, PHDR_CRC ve yük (payload) CRC alanları, radyo alıcısı tarafından eklenir.

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC
----------	------	----------	------------	-----

Şekil 3.8. Yukarı-bağlantı Fiziksel katman mesaj formatı [48].

Aşağı-bağlantı (downlink) mesajları (Şekil 3.9), LoRa fiziksel başlığının (PHDR) ve bu başlığın CRC'sinin (PHDR_CRC) dahil olduğu radyo paketinin açık modunu kullanır.

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload
----------	------	----------	------------

Şekil 3.9. Aşağı-bağlantı Fiziksel katman mesaj formatı [48].

Önsöz (preamble), alıcıyı gelen veri akışıyla senkronize etmek için kullanılır. Paket varsayılan olarak 12,25 sembol uzunluğunda bir dizi ile yapılandırılır (8 yapılandırılabilir sembol + 4,25 varsayılan sembol). Ağ geçitleri tarafından iletilen aşağı-bağlantı önsözü 8 sembol içerir. Alıcı taraf, önsözün algılanması ve senkronize edilmesi için 5 sembole ihtiyaç duyar. Bu nedenle, alım penceresi ile iletilen önsöz arasında 5 sembol üst üste gelmelidir/örtüşmelidir. Önsöz programlanabilir bir değişkendir, örneğin, yoğun uygulamalarda alıcı görev döngüsünün azaltılması amacıyla önsöz (preamble) uzunluğu uzatılabilir. [46,51]

Seçilen çalışma moduna bağlı olarak açık (explicit) mod ve kapalı (implicit) mod olmak üzere iki tip başlık mevcuttur. Açık başlık modu, varsayılan çalışma modudur ve bayt cinsinden yük (payload) uzunluğunu, ileri hata düzeltme (FEC) kod oranı ve yük için isteğe bağlı bir 16-bit CRC'nin varlığı gibi yük hakkında bilgi verir. Bu durumda, başlık maksimum hata düzeltme kodu (4/8) ile iletilir. Ayrıca, alıcının geçersiz başlıkları atmasına izin vermek için kendi CRC'sine de sahiptir [46].

Yük, kodlama oranı ve CRC varlığının sabitlendiği veya önceden bilindiği bazı senaryolarda, kapalı başlık modunu çağırarak iletim süresini azaltmak avantajlı olabilir. Bu modda başlık paketten kaldırılır. Bu durumda yük uzunluğu, hata kodlama oranı ve yük CRC'sinin varlığı, radyo bağlantısının her iki tarafında manuel olarak yapılandırılmalıdır[46].

MAC (PHYPayload) Katmanının Mesaj Formatı

Tüm LoRa yukarı-bağlantı (uplink) ve aşağı-bağlantı (downlink) mesajlarında (Tablo 3.2), tek oktetli bir MAC başlığı (MHDR) ile başlayan ve ardından bir MAC yükü (MACPayload) ile devam eden ve 4-oktetlik bir mesaj bütünlüğü kodu (MIC) ile biten bir PHY yükü (PHYPayload) bulunur.

Tablo 3.2. MAC (PHYPayload) katmanının mesaj formatı [48].

Octets: 1	7-M	4
MHDR	MACPayload	MIC

Tablo 3.2'de LoRaWAN protokolünün MAC katmanı için kullanılan mesaj formatı gösterilmektedir. Bu mesaj formatındaki MACPayload alanının uzunluğu veri oranına bağlı olarak değişmesinin yanısıra fiziksel katman tarafından da sınırlandırılmıştır. [48]'deki bölgesel düzenlemelere göre FOpts alanının yokluğunda Türkiye (Avrupa) için MACPayload alanının uzunluğu maksimum 250 oktet iken minimum 7 oktet olmaktadır.

MHDR (MAC Header) Alanı; MAC başlığı (Tablo 3.3), mesaj tipini (MType) ve LoRaWAN spesifikasyonlarından hangi ana versiyonu (Major) için çerçeve formatının kodlandığını belirler. RFU alanı, gelecek kullanımlar için rezerve edilmiştir.

Tablo 3.3. MHDR(MAC Header) alanının içeriği [48].

Bits: 7-5	4-2	1-0
MType	RFU	Major

LoRaWAN; katılım isteği, yeniden katılım isteği, katılım-kabul, onaysız veri yukarı / aşağı ve onaylı veri yukarı / aşağı ve özel mesajlar olmak üzere (Tablo 3.4'te görülen) 8 farklı MAC mesaj tipini birbirinden ayırmaktadır [48].

Tablo 3.4. MAC katmanının mesaj türleri

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

Katılım isteği, yeniden katılım isteği ve katılım-kabul mesajları, daha sonraki bölümlerde açıklanacak olan havadan etkinleştirme (OTAA) prosedürü için kullanılır.

Veri mesajları, hem MAC komutlarını hem de tek bir mesajda birleştirilebilen uygulama verilerini aktarmak için kullanılır. Onaylı bir veri mesajı alıcı tarafından onaylanmalıyken onaysız bir veri mesajı herhangi bir onay gerektirmez. Özel mesajlar, standart mesajlarla birlikte çalışamayan ve standart olmayan mesaj biçimlerini uygulamak için kullanılabilir ve yalnızca özel mesajlarla ilgili ortak bir anlayışa sahip cihazlar arasında kullanılmalıdır. Bir son cihaz ya da bir ağ sunucusu bilinmeyen bir özel mesaj aldığında onu sessizce düşürür.

MAC yükü (MACPayload) Alanı; Veri mesajlarının MAC yükü (Tablo 3.5), opsiyonel bir port alanı (FPort) ve opsiyonel bir çerçeve yükü alanı (FRMPayload) tarafından takip edilen bir çerçeve başlığı (FHDR) içerir.

Tablo 3.5. MAC yükü alanının içeriği [48].

Octets: 7-22	0-1	0-N
FHDR	FPort	FRMPayload

FHDR alanı, Tablo 3.6’da ifade edildiği gibi son cihazın (DevAddr) kısa cihaz adresini, bir çerçeve kontrol oktetini (FCtrl), 2 oktet’lik bir çerçeve sayıcısını (FCnt) ve 15 oktete kadar olan MAC komutlarını taşımak için kullanılan çerçeve seçeneği (FOpts) alanını içermektedir.

Tablo 3.6. Çerçeve başlığı (FHDR) alanının içeriği [48].

Octets: 4	1	2	0-15
DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts

Çerçeve yük alanı (FRMPayload) boş değilse, port alanı bulunmalıdır. FPort alanının değeri eğer 0 (sıfır) ise FRMPayload alanında yalnızca MAC komutları içerdiği anlamını taşır. FPort alanının 1’den 223’e (0x01..0xDF) kadar olan değerleri uygulamaya özeldir yani uygulama katmanında LoRaWAN uygulamalarını tanımlamak için kullanılabilir. FPort alanının 224. değeri LoRaWAN MAC katman test protokolüne adanmıştır. FPort alanının 225’den 255’e (0xE1..0xFF) kadar olan değerleri gelecekte standartlaşacak olan uygulama uzantıları için ayrılmıştır.

Tablo 3.5’te LoRaWAN protokolünün MAC katmanı için kullanılan MAC yükü (MACPayload) alanının içeriği gösterilmektedir. Bu mesaj formatındaki FRMPayload alanının uzunluğu veri oranına bağlı olarak değişmesinin yanısıra fiziksel katman tarafından da sınırlandırılmıştır. [48]’deki bölgesel düzenlemelere göre FOpts alanının yokluğunda Türkiye (Avrupa) için FRMPayload alanının uzunluğu maksimum N = 242 oktetir.

Tablo 3.6’daki çerçeve kontrol (FCtrl) alanı aşağı-bağlantı (Tablo 3.7) ve yukarı-bağlantı (Tablo 3.8) için iki farklı çerçeve tipine sahiptir.

Tablo 3.7. Aşağı-bağlantı (downlink) çerçeveleri için çerçeve kontrol (FCtrl) alanının içeriği [48].

Bit: 7	6	5	4	3-0
ADR	RFU	ACK	FPending	FOptsLen

Tablo 3.8. Yukarı-bağlantı (uplink) çerçeveleri için çerçeve kontrol (FCtrl) alanının içeriği [48].

Bit: 7	6	5	4	3-0
ADR	ADRACKReq	ACK	ClassB	FOptsLen

LoRa ağı, uç cihazların olası veri hızlarından herhangi birini ayrı ayrı kullanmasına izin vermektedir. Bu özellik LoRaWAN tarafından son cihazların veri oranını uyarlamak ve optimize etmesi için kullanılır. Buna Uyarlamalı Veri Hızı (ADR) denir ve ağın mümkün olan en hızlı veri oranını optimize etmesi sağlanır. ADR biti ayarlanmışsa, ağ son cihazın veri hızını uygun MAC komutları ile kontrol edecektir. ADR biti ayarlanmadığında, ağ, alınan sinyal kalitesinden bağımsız

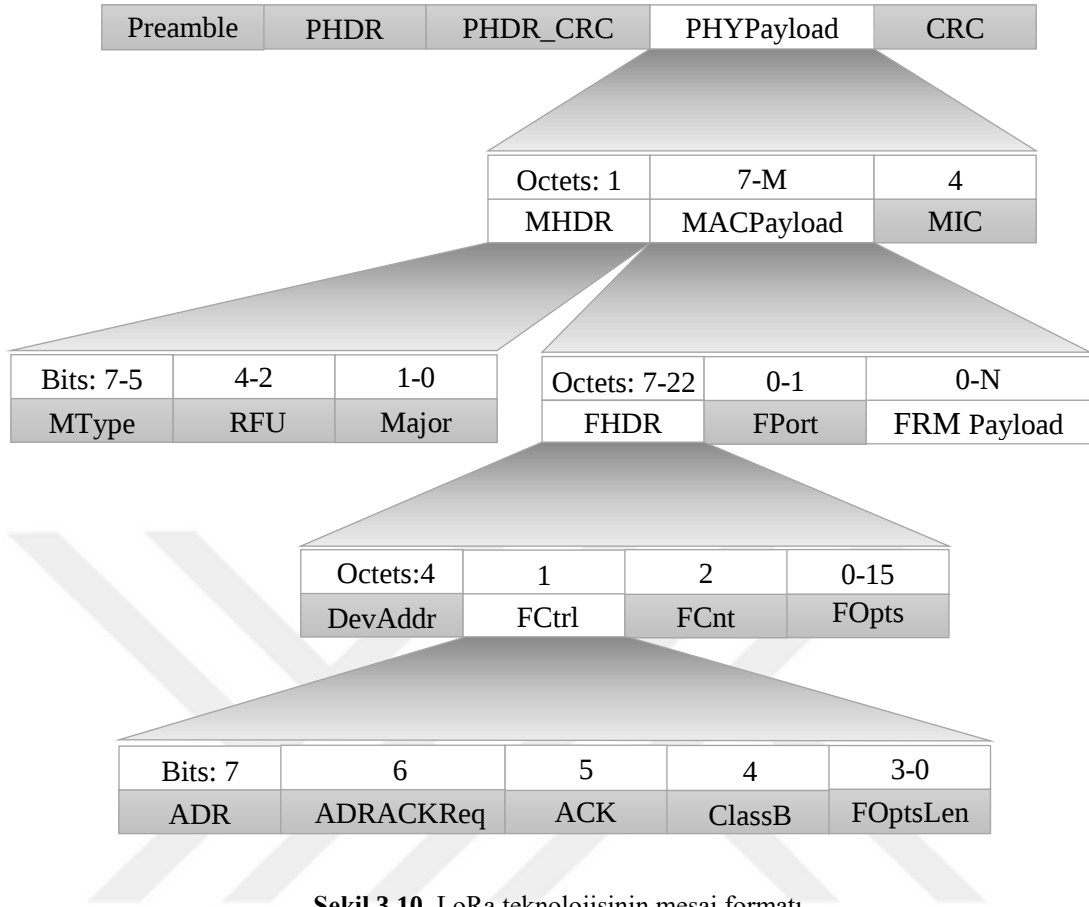
olarak veri hızını ve son cihazın iletim gücünü kontrol etmeye çalışmaz. ADR biti, son cihaz veya talep üzerine ağ tarafından ayarlanabilir veya ayarlanmayabilir. Bununla birlikte, mümkün olduğunda, son cihazın pil ömrünü artırmak ve ağ kapasitesini en üst seviyeye çıkarmak için ADR şeması etkinleştirilmelidir. ADR şeması son cihazlara belirli metriklere göre en uygun veri oranı ataması yapan bir algoritmadır ve genellikle merkezi sunucu tarafında bulunur.

Onaylı bir veri mesajı alırken, alıcı onay biti (ACK) ayarlanan bir veri çerçevesi ile cevap verecektir. Gönderici bir son cihaz ise, ağ, gönderme işleminden sonra son cihaz tarafından açılan alıcı pencerelerinden birini kullanarak onayı gönderir. Gönderen bir ağ geçidiyse, son cihaz kendi takdirine göre bir onay iletir. Onaylar sadece en son alınan mesaja cevaben gönderilir ve asla tekrar iletilmez.

Çerçeve bekleme biti (FPending) yalnızca aşağı bağlantı (downlink) iletişimde kullanılır, bu da ağ geçidinde gönderilmeyi bekleyen daha fazla veriye sahip olduğunu gösterir ve bu nedenle son cihazdan başka bir yukarı bağlantı (uplink) mesajı –bu uplink mesajı veri yükü ve mac komutu olmayan boş bir çerçeve olabilir- göndererek en kısa sürede başka bir alım penceresi açmasını ister.

FCtrl'deki çerçeve seçenekleri uzunluk alanı (FOptsLen), çerçevede bulunan çerçeve seçenekleri alanının (FOpts) gerçek uzunluğunu belirtir. FOpts alanı, veri çerçeveleri üzerine bindirilen maksimum 15 oktet uzunluğundaki MAC komutlarını taşır. FOptsLen alanının değeri 0 (sıfır) ise, FOpts alanı yoktur. FOptsLen alanı 0'dan farklıysa, yani FOpts alanında MAC komutları varsa, port 0 (sıfır) bağlantı noktası kullanılamaz.

Bir yukarı bağlantıda (uplink) 1 olarak ayarlanan B Sınıfı biti (ClassB), ağ sunucusuna (NS), cihazın B Sınıfı moduna geçtiğini ve artık programlanmış aşağı bağlantı (downlink) pingleri almaya hazır olduğunu bildirir. Şekil 3.10'da temel LoRaWA ağlarında kullanılan mesaj formatlarını göstermektedir.



Şekil 3.10. LoRa teknolojisinin mesaj formatı

MAC Komutları

Ağ yönetimi için, yalnızca bir son cihazdaki MAC katmanını ve Ağ Sunucusu arasında bir dizi MAC komutu değiş tokuş edilebilir. MAC katmanını komutları, uygulama veya uygulama sunucusu veya son cihazda çalışan uygulama tarafından asla görülemez.

Tek bir veri çerçevesi, FOpts alanında sırt sırta bindirilerek veya ayrı bir veri çerçevesi olarak gönderilmek istenirse FPort alanı 0 'a (sıfır) ayarlanarak FRMPayload alanına, herhangi bir MAC komut dizisi eklenerek gönderilebilir. Sırt sırta bindirilen MAC komutları her zaman şifreli olarak gönderilir ve 15 oktet geçmemelidir. FRMPayload olarak gönderilen MAC komutları her zaman şifrelenir ve maksimum FRMPayload uzunluğunu geçmemelidir. Tüm komutların tam listesi ve tanımları [48]'de yani LoRaWAN spesifikasyon 1.1 'de bulunabilir.

Döngüsel Artıklık Kontrolü (CRC)

LoRa modem, parazit nedeniyle bozulan bilgi parçalarının (bitlerinin) kurtarılmasını sağlayan bir İleri Hata Düzeltme (FEC) biçimi kullanır. Bu işlem, iletilen paketteki verilere fazladan küçük bir kodlama ek yükünü gerektirir [47].

FEC, sistemin bit hata oranını azaltarak alıcının hassasiyetini artırmak için yaygın olarak kullanılır. FEC, bit başına enerjiyi etkin bir şekilde artırır ve cihazın bit hatalarını düzeltmesini sağlar. İletilen bit dizisine fazladan ekstra bitler eklendiğinde, gönderilmek istenen veri azalır, ancak bit-hata oranı zayıf sinyallerle daha düşüktür, alıcının hassasiyeti artar [52].

Bununla birlikte, FEC'in gerçek performans kazancı, girişim/parazit patlamaları varlığında görülebilir. Radyo bağlantısının bu tür girişime maruz kalması olası ise, FEC kullanımı değerlendirilmelidir [47].

Tablo 3.9'da kodlama oranındaki artışın, SF = 10 'da 125 kHz'lik sabit bir bant genişliği için havadaki zamanı nasıl etkilediğini göstermektedir.

Tablo 3.9. Kodlama oranının hava üzerindeki zamana etkisi [47].

Kodlama Oranı (CR)	Havadaki Zaman (ToA)
4/5	247.81
4/6	264.19
4/7	280.58
4/8	296.96

3.2.3. Lorawan Bölgesel Sınırlamaları

LoRaWAN lisanssız frekanslarda çalıştığından, faaliyet gösterdiği bölgeye bağlı olarak farklı düzenlemelere sahiptir [49]. Bu bölüm, Avrupa için 868 MHz'lik (EU863-870) endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (ISM) bandın sınırlamalarını açıklamaktadır.

Kanal Planı ve Alt Bantlar

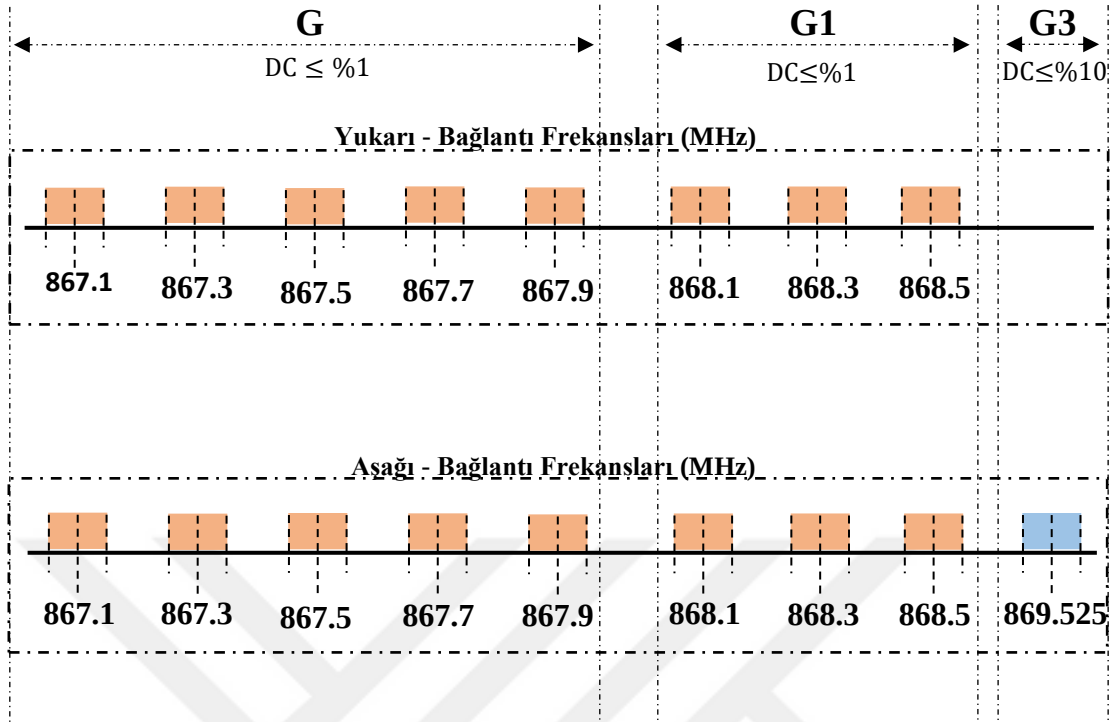
LoRaWAN, Avrupa'da 868-870 MHz ISM bandı kullanılmaktadır. Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI), 863-870 MHz bandını 5 alt banda bölmüştür: G, G1, G2, G3 ve G4. Her bir alt bandın eşdeğer izotropik yayılım gücü (EIRP), görev döngüsü ve kanal bant genişliği açısından farklı kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu bandı kullanacak herhangi bir LoRa cihazı, istisnasız olarak bu sınırlamalara uymalıdır.

Tablo 3.10. EU863-870 MHz alt-bantları ve sınırlamaları [53].

Bant Türü	Frekans Aralığı	Sınırlamaları	Bant Genişliği
G	863.0 – 868.0	$EIRP < 25 \text{ mW} - DC \leq \%1$	5 MHz
G1	868.0 – 868.6	$EIRP < 25 \text{ mW} - DC \leq \%1$	600 kHz
G2	868.7 – 869.2	$EIRP < 25 \text{ mW} - DC \leq \%0.1$	500 kHz
G3	869.4 – 869.65	$EIRP < 500 \text{ mW} - DC \leq \%10$	250 kHz
G4	869.7 – 870.0	$EIRP < 25 \text{ mW} - DC \leq \%1$	300 kHz

Tablo 3.10'da her bir alt-bant için bir frekans aralığı, maksimum iletim gücü, bant genişliği ve görev döngüsü (DC: Duty Cycle) sınırlamaları gösterilmektedir [53,54]. Bir LoRa cihazı, şartnamelere bağlı kalabilmesi için kanal planının alt bantları ve telsizin çalışma kuralları gibi sınırlamaları bilmesi gereklidir.

LoRaWAN bölgesel standartları [49], Avrupa bölgesinde kullanılacak her cihazın için sürekli kanal planında olması gereken ve her ağ geçidinin dinlemesi gereken en az 3 tane zorunlu kanal belirler. Bu kanallar, Şekil 3.11'de G1 bandında bulunan 868.1, 868.3 ve 868.5 MHz'lik kanal frekanslarıdır [55]. Ayrıca bu kanallar ile herhangi bir cihaz, kanal planını bilmediği bir ağa bağlantı kurmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.11. EU863-870 MHz ISM Bandına göre kanal listesi [55].

G3 bandında yer alan 869.525 MHz kanalı Rx_2 alım penceresinin kullanımı için varsayılan olarak tahsis edilmiştir. İlave olarak, Rx_2 alım penceresi, sabit bir taşıyıcı frekansı (869.525 MHz, BW: 125 kHz) ve veri oranı (SF12) kullanmaktadır.

G1 bandında yer alan kanallar ise ihtiyaca uygun olarak opsiyonel bir şekilde kullanılabilir.

EU868MHz son cihazları, 863 ila 870 MHz frekans bandında çalışabilir ve en az 16 kanalın parametrelerini saklamak için bir kanal veri yapısına sahiptir.

Görev Döngüsü (DC)

Görev döngüsü, bir cihazın radyo frekanslarına erişimini sınırlayan bir mekanizmadır. Bir başka deyişle görev döngüsü, her bir cihazın mesaj aktarımı için ilgili radyo kanalına erişim süresini sınırlamaktadır. Bu sınırlamayı hesaplamak için gerekli olan en önemli parametre Havada Geçen Zaman (ToA)'dır. Havada Geçen Zaman (ToA), bir düğümün vericisinden çıkan sinyalin başka bir düğümün alıcısının bu sinyali almasına kadar geçen süredir [56,58]. Bu süre denklem 3.13, 3.14 ve nihai olarak 3.15'te ifade edilmiştir [59].

$$t_{ToA} = t_{preamble} + t_{packet} \quad (3.13)$$

$$t_{ToA} = T_{symbol} * (L_{preamble} + L_{PHDR} + L_{PHDR_{CRC}} + L_{PHY_{Payload}} + L_{PHY_{CRC}}) \quad (3.14)$$

$$t_{ToA} = \frac{2^{SF}}{BW} \left[NP + 4.25 + \left(SW + \max \left(\text{round}^1 \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} \right) * (CR + 4), 0 \right) \right) \right] \quad (3.15)$$

3.15'teki denklem için bazı tanımlanmalar aşağıdaki gibidir;

NP : Önsöz (Preamble) Sembol Sayısı (8 symbol),

PL : PHY_Payload'ın Uzunluğu (Byte) = MHDR+MACPayload+MIC,

SF : Spread Faktör (7,8...12),

BW : Band Genişliği (Hz),

CR : Kodlama Oranı (1,2...4),

DE : Veri Oranı Optimizasyonun Kullanımı (0: kullanılmaz, 1: kullanılır),

IH : PHY Başlığının Kullanımı (0: kullanılmaz, 1: kullanılır),

SW : Senkronizasyon Kelimesinin Uzunluğu (8 bits),

CRC : $\begin{cases} 1, \text{UL paketi ise} \\ 2, \text{DL paketi ise} \end{cases}$

Tipik bir görev döngüsü sınırlaması, %1'dir; bir cihaz bir saniye boyunca mesaj aktarımı yaparsa, sonraki 99 saniye boyunca mesaj aktarımı yapamaması anlamını taşımaktadır [56]. [57] 'e göre de bir cihaz hangi frekans bandında iletim yaptıysa o frekans bandını belirli bir süre boyunca (periyod) kullanamaz.

$$t_{off} = \frac{t_{ToA}}{\text{Görev Döngüsü}} - t_{ToA} \quad (3.16)$$

3.16 'daki denklemde, t_{off} , mevcut alt bantta mesaj aktarımı yapılamayan süre (sn), t_{ToA} , mevcut alt bantta mesaj aktarımı yapılabilen süre (sn), *Görev Döngüsü* , alt bandın görev döngüsü sınırlaması (%) olarak tanımlanabilir.

Bir görev döngüsü belirli bir alt banda bağlıdır ve Avrupa'daki her bir alt bant görev döngüsü ile sınırlıdır. Tablo 3.10'daki bantları kullanan tüm cihazlar bu sınırlara uymalıdır ve ağ geçitleri de bir istisna değildir. Ağ geçidi çok sayıda aşağı bağlantı göndermek zorunda kalırsa, görev döngüsü rezervi tükenebilir ve aşağı bağlantı veya onay mesajı gönderemez.

¹ Round fonksiyonu parametre olarak aldığı sayının ondalıklı kısmı eğer 0.5'e eğit veya büyük ise sayıyı bir üst tam sayıya, eğer ondalıklı kısım 0.5'ten küçükse sayıyı bir alt tam sayıya yuvarlar.

Veri Oranı ve Bant Genişliği

Mevcut veri oranı ve bant genişliği, radyo düzenlemelerine bağlı olarak değişebilir. LoRaWAN bölgesel parametreleri [49], Avrupa'da kullanılabilecek 8 farklı veri oranı tanımlar. Daha öncede değinildiği gibi, LoRa modülasyonu, gerçek veri aktarım oranını oluşturan değişken bir yayılım faktörüne ve bant genişliğine sahiptir. Bölgesel parametreler [49], bu iki karakteristiği birleştirir ve daha sonra Tablo 3.11'de görüldüğü gibi bunları veri oranları olarak adlandırır. Bu tablo, Avrupa'da LoRaWAN için mevcut tüm veri oranlarına sahiptir. 6 ve 7 dışındaki tüm veri oranları, 125 kHz bant genişliği ve veri aktarım oranını değiştirmek için de sadece değişken yayılma faktörü kullanılmaktadır. Veri oranlarından 6 ve 7 ise özeldir. Veri oranı 6, tüm alt bantlarda bulunmayan 250 kHz'lik bir bant genişliğini gerektirmektedir. Veri oranı 7 ise, LoRa modülasyonunu hiç kullanmaz. Bunun yerine, yüksek hızlı veri aktarımı için Frekans Kaymalı Anahtarlama (FSK) modülasyonunu kullanır. LoRa modülasyonu ve FSK iki farklı modülasyon türü olduğundan, alıcı, gelen FSK iletimini doğru bir şekilde beklemek üzere yapılandırılmalıdır.

Tablo 3.11. Avrupa bölgesi için LoRaWAN tarafından tanımlanan veri oranları [49].

Veri Oranı (DRx)	Yapılandırma	Fiziksel Bit Oranı (bit/s)
0	LoRa : SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa : SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa : SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa : SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa : SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa : SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa : SF7 / 250 kHz	11000
7	FSK : 50 kbps	50000
8 – 14	RFU	
15	LoRaWAN ² 'da tanımlanmıştır.	

Veri oranları, x'in 0'dan 7'ye kadar bir sayı olduğu bir sözdizimi olan DRx ile gösterilir. LoRaWAN 1.1 spesifikasyonu, gerçek veri oranına ve kullanılan yayılma faktörü ve bant genişliğine atıfta bulunurken bu sözdizimini kullanmaktadır.

² LoRaWAN 1.1 Spesifikasyonunda yer alan LinkADRReq komutunda tanımlanmıştır.

Maksimum Veri Yüğü Boyutu

LoRaWAN 1.1 bölgesel sınırlamaları, maksimum taşıma yüğü boyutunu da yönetmektedir. Maksimum taşıma kapasitesi, kullanılan veri oranına bağılı olmakla birlikte daha yüksek veri oranları (Örn.: DR6 = SF7), daha büyük mesajların iletilmesini sağlar.

Maksimum MACPayload alanının uzunluğu (M) aşağıdaki Tablo 3.12’de verilmiştir. MACPayload alanı, bir tekrarlayıcı kapsülleme katmanı kullanılıp kullanılmamasına ve kullanılan modülasyon oranına bağılı olarak PHY katmanının sınırlamaları da dikkate alınarak türetilir. Opsiyonel FOpt kontrol alanının (N) yokluğunda maksimum uygulama yüğü uzunluğu da sadece bilgi amaçlı verilmiştir. FOpt alanı boş değİLse, N değeri daha küçük olabilir :

Tablo 3.12. EU863-870 maksimum taşıma yüğü boyutu (tekrarlayıcı) [49].

Veri Oranı	M	N
0	59	51
1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	230	222
5	230	222
6	230	222
7	230	222
8 – 15	Tanımlanmamıştır.	

Son cihaz hiç bir tekrarlayıcı ile çalışmazsa, opsiyonel FOpt kontrol alanının yokluğunda maksimum uygulama yüğü uzunluğu Tablo 3.13’te gösterilmiştir.

Tablo 3.13. EU863-870 maksimum taşıma yüğü boyutu (tekrarlayıcısız) [49].

Veri Oranı	M	N
0	59	51
1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	250	242
5	250	242
6	250	242
7	250	242
8 – 15	Tanımlanmamıştır.	

3.2.4. Cihaz Aktivasyonu ve Güvenlik

Bir uç cihaz ağ sunucusuyla iletişim kurmadan önce, uç cihaz etkinleştirilmeli ve katılma prosedürünü geçmelidir. Bu mekanizma, tanınmayan uç cihazlardan bir LoRaWA ağ sunucusuna erişimi kontrol etmekte ve bu cihazların haberleşmeye katılmalarını engellemektedir. LoRaWAN spesifikasyonunda, bir uç düğüm, LoRaWA ağına katılım için Hava Yoluyla Aktivasyon (OTAA) veya Kişiselleştirme ile Aktivasyon (ABP) yöntemlerinden herhangi birini kullanır. Bu metotlar arasındaki en önemli fark ABP'de uç cihaz herhangi bir katılım işlemine tabi tutulmadan oturum anahtarlarını, haberleşmeye başlamadan önce kendi üzerinde bulundururken OTAA metodunda bu anahtarlar ağına katılım yapılırken otomatik olarak türetilir. Bu iki metot aşağıda açıklanmıştır[48].

Kişiselleştirme ile Aktivasyon (ABP)

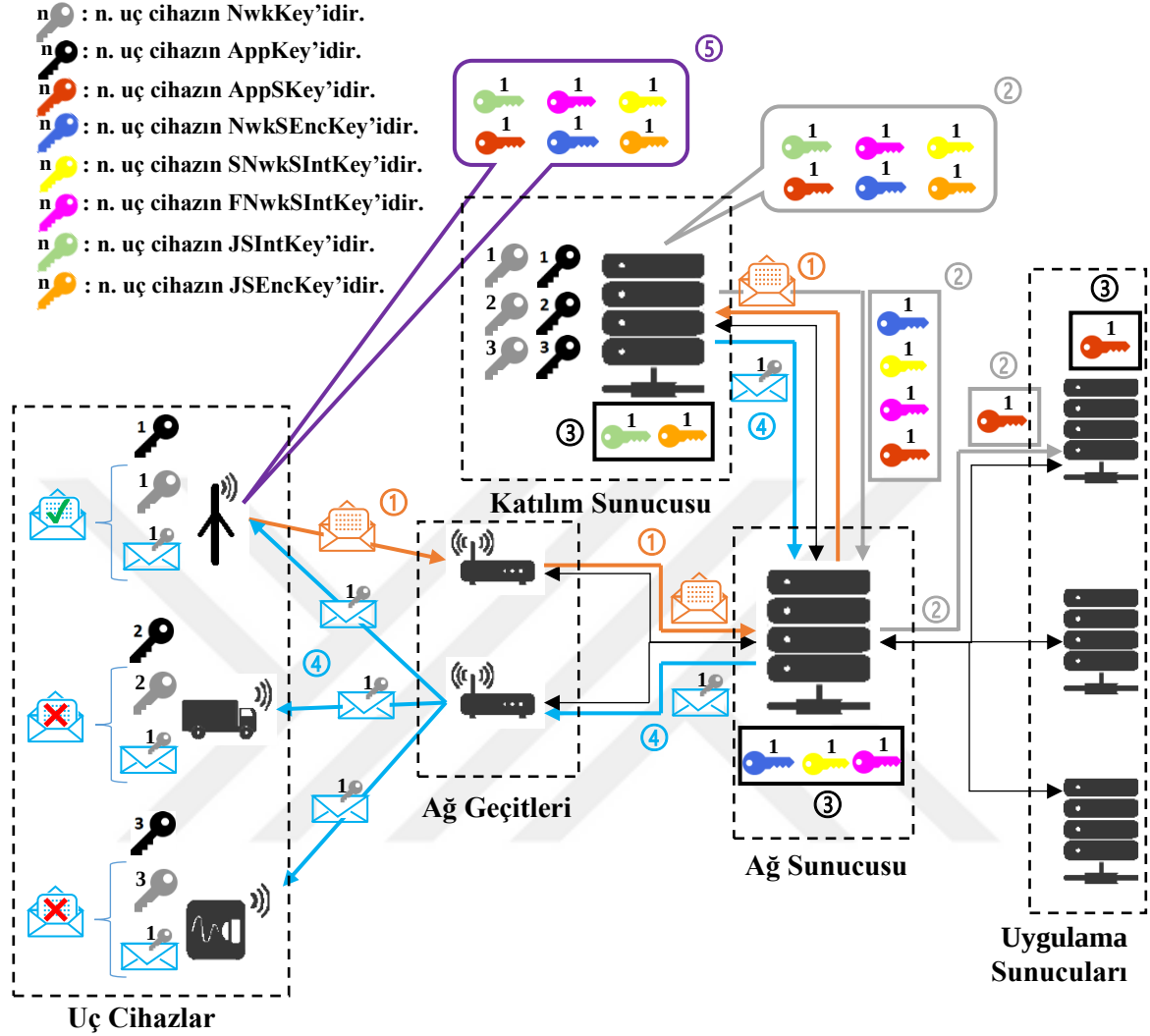
ABP, bir uç cihazın belirli koşullar altında bir katılma prosedürü gerçekleştirmeden belirli bir LoRaWA ağına ait olabileceği metottur. Bir uç cihazı kişiselleştirme yoluyla katılım yapmasını sağlamak için, DevAddr ve FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey ve AppSKey gibi dört oturum anahtarının, katılım işlemi sırasında doğrudan DevEUI, JoinEUI, AppKey ve NwkKey'den türetilmesi yerine doğrudan cihaza depolanması anlamına gelir. Uç cihaz, başlatıldığı anda belirli bir LoRa ağına katılmak için gerekli bilgilerle donatılmıştır [48].

Her uç cihaz, benzersiz bir FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey ve AppSKey anahtarlarına sahiptir. Bir uç cihazın bu anahtarlarını tehlikeye sokmak, diğer cihazların iletişim güvenliğinden ödün vermez. Çünkü bu anahtarlar her bir uç cihaza özeldir. Dolayısıyla bu anahtarları oluşturma işlemi, hiçbir şekilde herkesin elde edemeyeceği şekilde olmalıdır [48].

Hava Yolu ile Aktivasyon (OTAA)

OTAA metodunda, bir uç cihaz, ağ sunucusu ile veri alışverişi yapmadan önce bir katılım prosedürünü takip etmesi gerekir. Bir uç cihaz, oturum bağlam bilgisini her kaybettiğinde yeni bir katılım prosedüründen geçmelidir.

Yukarıda ABP alt bölümünde de değinildiği gibi OTAA metodunda katılım prosedürü, uç cihazın katılım prosedürüne başlamadan önce DevEUI, JoinEUI, NwkKey ve AppKey gibi bilgilerle kişiselleştirilmesini gerektirir. Bu bilgiler sağlandıktan sonra uç cihaz artık hava yoluyla aktivasyona hazırdır. OTAA metoduna göre katılım prosedürü, bir uç cihaz ile sunucu arasında “Katılma isteği”/”Join Request” ve “Katılma kabul”/”Join Accept” gibi mesajlarla haberleşmesinden elde edilen uç cihaz adresi (DevAddr) ve AppSKey, JSIntKey, JSEncKey, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey anahtarlarıyla sonlanır. Bu anahtarlar elde edildikten sonra uç cihaz ile sunucular arasında veri ve komut aktarımı gerçekleştirilebilir. Aşağıda LoRaWAN Spesifikasyon 1.1'e göre OTA aktivasyonun gerçekleştirilme aşamaları adım adım açıklanmıştır.



Şekil 3.12. OTA aktivasyon sürecinde uçtan uca kimlik doğrulama ve anahtar yönetimi

AppKey ve NwkKey anahtarları her bir uç cihaz için eşsizdir. Dolayısıyla bu anahtardan türetilen AppSKey, JSIntKey, JSEncKey, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey anahtarları da cihaz için eşsizdir. Öte yandan AppKey ve NwkKey anahtarı aktivasyondan önce uç cihaz ve katılım sunucusunda depolanmalıdır. Şekil 3.12'deki adımlar [48,60,61];

- Birinci (①) adımda uç cihazlar tarafından şifresiz olarak katılım isteği mesajı ağ geçidi üzerinden ağ sunucusuna ardından katılım sunucusuna iletilir.
- İkinci (②) adımda katılım sunucu tarafından ilgili cihazın katılma isteğine olumlu cevap verirse; AppKey, NwkKey anahtarları kullanılarak bu cihaza özel AppSKey, JSIntKey, JSEncKey, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey türetimi gerçekleştirilir. Türetilen anahtarlardan JSIntKey, JSEncKey katılım sunucusu üzerinde depolanırken

FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey anahtarları ağ sunucusuna ve AppSKey anahtarı da uygulama sunucusuna depolanmak üzere güvenli bir protokol (IPsec VPN, Https vb.) vasıtasıyla iletilir.

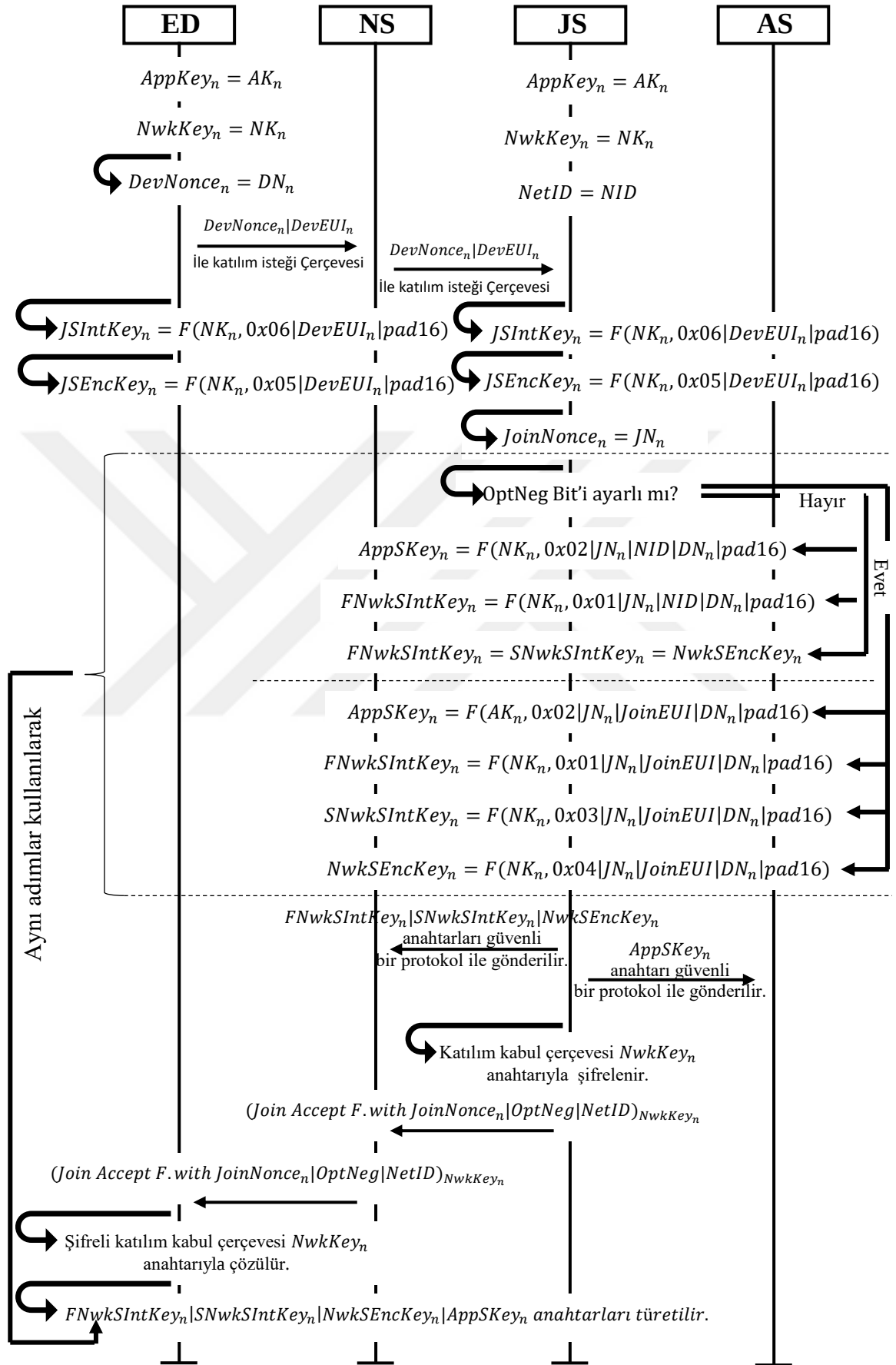
- Üçüncü (③) adım ilgili anahtarların ilgili sunucularda depolandığını ifade etmektedir.
- Dördüncü (④) adımda yine katılım sunucusu tarafından ilgili cihazın katılma isteğine olumlu cevap verilirse katılım cevabı NwkKey anahtarı ile AES-128 bitlik şifreleme algoritması ile şifrelenip ağ geçidi üzerinden tüm cihazlara yayınlanır ancak şifrelemede kullanılan NwkKey hangi uç cihazda var ise o katılım cevabını alacaktır. Böylelikle uç cihazların katılım esnasındaki kimlik doğrulaması da NwkKey anahtarıyla yapılmaktadır.
- Beşinci (⑤) adımda katılım isteğini alan uç cihaz AppSKey, JSIntKey, JSEncKey, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey anahtarlarını türetmektedir.

Tüm bu yukarıdaki adımlardan sonra uç cihaz komut ve veri mesajlarını artık yeni türetilen bu anahtarlar vasıtasıyla yapabilecektir. Uç cihaz ağ sunucusu ile mesajlaşırken FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey anahtarını, uygulama sunucusu ile mesajlaşırken de AppSKey anahtarını ve katılım sunucusu ile ilk katılımdan sonraki yeniden katılma isteği mesajlarında ise JSIntKey, JSEncKey anahtarlarını kullanır.

Uç cihaz, uygulama sunucusu ve ağ sunucusu ile haberleşirken kullandığı oturum anahtarları her bir katılım isteğinde farklı türetilirken, katılım sunucusu ile haberleşirken kullandığı oturum anahtarları uç cihazın ömrü boyunca tek bir kez türetilir. Uç cihazın uygulama sunucusu ve ağ sunucusu ile haberleşirken kullandığı oturum anahtarları aynı ağ içerisinde; her bir katılım isteğinde farklı olarak üretilen joinNonce ve DevNonce (farklı ağlar için NetId değeri de kullanılır) değerleri sayesinde her bir katılım da farklı olarak oturum anahtarları türetilmesini sağlarken uç cihazın katılım sunucusu ile haberleşirken kullandığı oturum anahtarları bu şekilde değişken yani dinamik değerlere sahip değildir.

Herhangi bir katılımdan sonra ise bu oturum anahtarları uç cihazların uçtan uca kimlik doğrulamasını sağlamaktadır. Mesaj bütünlüğünü sağlamak için ise MAC mesaj formatında MIC alanı mevcuttur. Bu alan ile MAC çerçevelerinin alıcıya çerçevedeki bilgilerin herhangi bir değişikliğe uğramadan alındığı garanti edilir. MIC alanı hesaplanırken uç düğüme özgü anahtarlar ([48]'de belirtildiği gibi.) kullanılır.

Bu OTA aktivasyon süreci daha ayrıntılı olarak Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13. OTA aktivasyonun prosedürünün akış diyagramı

[48]' e göre çizilen Şekil 3.13'te görülen NwkKey ve AppKey, herhangi bir ağa katılım yapılmadan önce son cihaza atanan ve son cihaza özgü olan AES-128 kök anahtarlarıdır. Son cihaz OTAA metoduyla bir ağa katıldığı zaman, NwkKey anahtarı FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey oturum anahtarlarını türetmek için kullanılır ve AppKey anahtarı da AppSKey oturum anahtarını türetmek için kullanılır. NetID, bir ağ tanımlayıcısı iken DevNonce, uç cihaz ilk çalışmaya başladığında 0'dan başlayan ve her katılma isteğinde bir arttırılan sayaçtır. JoinNonce, Katılım Sunucusu (JS) tarafından sağlanan ve son cihaz tarafından FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey ve AppSKey oturum anahtarlarını türetmek için kullanılan cihaza özgü bir sayaç değeridir (kendisini asla tekrarlamaz). JoinNonce sayacı her katılma-kabul (Join-accept) mesajı ile bir arttırılır. DevEUI, IEEE EUI64 adres alanındaki son cihazı benzersiz bir şekilde tanımlayan küresel bir son cihaz kimliğidir. JoinEUI, IEEE EUI64 adres alanındaki küresel bir uygulama kimliği olup katılma prosedürünün ve oturum anahtarlarının türetilmesinin yürütülmesinde yardımcı olabilecek katılım sunucusunu (Join Server'ı) benzersiz bir şekilde tanımlamaktadır. Yeniden katılım isteği (Rejoin-Request) tip 1 mesajlarında MIC alanı için ve katılma-kabul (Join-Accept) cevaplarında kullanılır. JSEncKey, yeniden katılım-isteği (Rejoin-Request) mesajı tarafından tetiklenen katılma-kabul (Join-Accept) mesajını şifrelemek için kullanılır. AppSKey, son aygıtta özgü bir uygulama oturumu anahtarıdır. Uygulamaya özgü veri mesajlarının yük taşıma alanını şifrelemek ve şifresini çözmek için hem uygulama sunucusu hem de son cihaz tarafından kullanılır. FNwkSIntKey, son aygıtta özel bir ağ oturum anahtarıdır. Son cihaz tarafından, veri bütünlüğünü sağlamak için tüm yukarı-bağlantı (uplink) veri mesajlarının MIC (Mesaj Bütünlüğü Kodu) veya MIC'in bir kısmını hesaplamak için kullanılır. SNwkSIntKey, son aygıtta özgü bir ağ oturum anahtarıdır. Son cihaz tarafından veri bütünlüğünü sağlamak ve yukarı-bağlantı (uplink) mesajlarının MIC'in yarısını hesaplamak için tüm aşağı-bağlantı (downlink) veri mesajlarının MIC'ini doğrulamak için kullanılır. NwkSEncKey, son aygıtta özgü bir ağ oturum anahtarıdır. Port 0 veya FOpt alanında veri yükü olarak iletilen aşağı ve yukarı bağlantı (uplink and downlink) MAC komutlarını şifrelemek ve şifresini çözmek için kullanılır. OptNeg biti ; katılım kabul mesajında DLSetting alanının içerisindeki bir bitlik boyuta sahip bir alandır. Bu alanın 0 (TRUE) yada 1 (FALSE) olmasına göre Şekil 4.16'daki algoritmalar koşturulur. F ; 128 bitlik AES şifreleme algoritmasını temsil etmektedir. Son olarak pad16; verinin uzunluğunu 16'nın katı yapmak için veriyi sıfır ekleneceğini belirtir.

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde LoRaWA ağının PDR, RSSI ve SNR gibi performans ölçütlerine göre testinin yapılması için hem bir fiziksel uygulama hem de Opnet Modeler simülasyon ortamında bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Fiziksel uygulamada uç cihaz, ağ geçidi, nesnelerin ağı (TTN) ve uygulama sunucusunun kurulumu ve geliştirilmesi yapılırken simülasyon uygulamasında uç cihaz, ağ geçidi, ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucusunun geliştirilmesi yapılarak modellenip simüle edilmeye hazır hale getirilmiştir.

Her iki uygulama için aynı senaryolar kullanılmıştır. Genel olarak senaryolarda ağ geçidi sürekli sabit bir konumda tutulurken son cihazlar da her bir konumda ölçüm sonuçları alınana kadar sabit konumda tutularak performansın ağ geçidi ve son cihaz arasındaki mesafesine bağlı etkisi gözlemlenmiştir.

Aşağıdaki alt bölümlerde hem fiziksel hemde simülasyon uygulaması detaylandırılmıştır.

4.1. Simülasyon Uygulaması

Bu alt bölümde Opnet Modeler’de bir LoRaWA ağı ve dolayısıyla bu ağ da bulunan uç cihaz, ağ geçidi, merkezi ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucusu gibi cihazların düğüm modellenmesi, LoRaWAN Bölgesel Parametreler 1.1 ve LoRaWAN Spesifikasyon 1.1 protokol standartlarına uygun olarak simülasyonu süreci ele alınmıştır ve simülasyon yapılan ortam hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1.1. LoRa Modülasyonun Modellenmesi

Bu alt bölümde fiziksel katmanda yer alan LoRa modülasyonun Opnet Modeler simülasyon aracında modellenmesi ele alınmıştır.

Bir modülasyon tekniğini başka bir modülasyon tekniğiyle karşılaştırmak için ya da OPNET Modeler gibi bir simülasyon aracında belirli bir modülasyonu tekniğini kullanmak için BER ile E_b/N_0 grafiğinin çizilmesi gerekir. Çünkü modülasyonla ilgili yapılan modellemelerde modülasyonun işlevinden ziyade sonuçlarını baz almaktadır. E_b , bit başına alınan enerji (Joules) iken N_0 , gürültü gücünün spektral yoğunluğu (watts/hertz) ve BER ise bit hata oranıdır.

Bir modülasyonun BER ile E_b/N_0 grafiğinin çizilebilmesi için fonksiyonlarının bilinmesi gereklidir. Aşağıda LoRa modülasyonun temelde kullandığı chirp yayılı spektrum (CSS) modülasyonuna ait BER (Bit hata oranı, P_e : *Probability of bit error*) fonksiyonu verilmiştir[67];

$$P_{e,CSS} = Q\left(\frac{\log_{12} SF E_b}{\sqrt{2} N_0}\right) \quad (4.1)$$

Burada kullanılan $Q(x)$ fonksiyonunun x değişkeni kullanılan modülasyona özeldir. Yani CSS modülasyonu için aşağıdaki gibidir;

$$x = \frac{\log_{12} SF E_b}{\sqrt{2} N_0} \quad (4.2)$$

CSS modülasyonun BER ile E_b/N_0 grafiğinin çizilebilmesi için ayrıca Denklem 4.1’de BER fonksiyonunda geçen $Q(x)$ fonksiyonunda bilinmesi gereklidir. Bu denklemde aşağıda verilmektedir [68];

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (4.3)$$

Ek olarak, $Q(x)$ fonksiyonunda geçen E_b/N_0 denklemi de aşağıda verilmektedir [69];

$$\frac{E_b}{N_0} (dB) = SNR (dB) + 10 * \log\left(\frac{BW}{R_b}\right) (dB) \quad (4.4)$$

E_b/N_0 değerini elde etmek için SNR, BW ve R_b bilgilerinin tablosu aşağıdaki gibidir;

Tablo 4.1. LoRa demodülatörünün SNR değerleri

Yayılma Faktörü (SF)	Bant Genişliği (Hz)	Bit Oranı (Bit Rate) (bits/sec)	SNR (dB)
7	125000	6835,9375000	-7.5
8	125000	3906,2500000	-10.0
9	125000	2197,2656250	-12.5
10	125000	1220,7031250	-15.0
11	125000	671,38671875	-17.5
12	125000	366,21093750	-20.0

125 kHz’lik bir bant genişliğine sahip bir LoRaWA ağında denklem (4.4)’ü ve Tablo 4.1 ‘i kullanarak farklı SF’lere göre E_b/N_0 değerlerini hesapladığımızda hepsinde yaklaşık olarak ~ 6 dB çıkmaktadır. Bu değer E_b/N_0 için bir eşik değeri ($E_b/N_0_{Eşik} = \sim 6$ dB) belirtmektedir. E_b/N_0 değeri bu değere eşit veya daha büyük olması ($E_b/N_0 \geq E_b/N_0_{Eşik}$) durumunda BER değerinin sıfır olması anlamına gelir ki bu da bit başına düşen hata sayısının olmadığı anlamındadır. E_b/N_0 değerinin bu eşik E_b/N_0 değerinden küçük olması ($E_b/N_0 < E_b/N_0_{Eşik}$) durumunda ise BER değerinin artması ve dolayısıyla bit başına düşen hata oranının artması anlamına gelir.

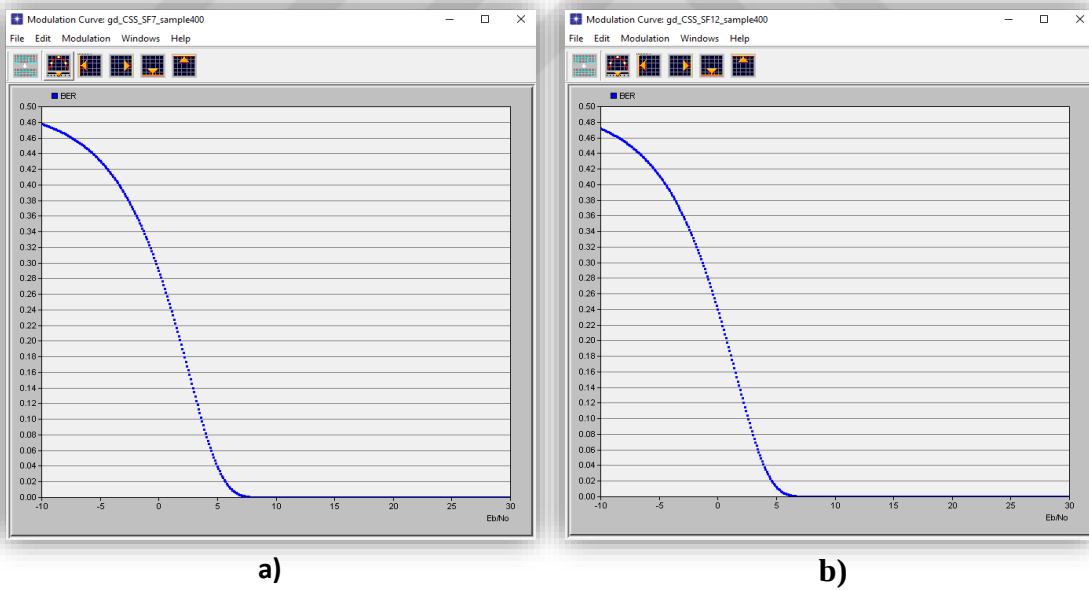
$Q(x)$ fonksiyonuyla BER ile E_b/N_0 eğrisini çizebilmek için E_b/N_0 değerlerinin değiştiği bir aralığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada E_b/N_0 aralığını $[-10,30]$ olarak tanımlanmıştır (denklem 4.5) ;

$$E_b/N_{0dB} = -10:1:30; \quad (4.5)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 10^{\frac{E_b/N_{0dB}}{10}} \quad (4.6)$$

ve bu aralıktaki değerleri doğrusallaştırma denkleminde (denklem 4.6) geçirilip elde edilen değerler tek tek denklem (4.1) 'deki fonksiyonda işleme konularak modülasyon eğrisi oluşturulmuştur.

Opnet Modeler'de normalde bir modülasyon eğrisi çizebilmek için Modülasyon Eğrisi Editörü (Modulation Curve Editor) kullanılmaktadır. Bu editör modülasyon eğrisinin otomatik yani bir fonksiyonla oluşturulmasına izin vermemektedir. Bu nokta da otomatik eğri oluşturma Opnet Modeler'de tersine mühendislik kullanılarak Harici Model Erişimi (EMA) ile sağlanmaktadır.



Şekil 4.1. CSS modülasyonu için BER ile E_b/N_0 grafiğinin OPNET Modeler'deki gösterimi

Opnet Modeler simülasyon aracında CSS modülasyonunu modellemek için hem Matlab hem de Harici Model Erişimi (EMA) kullanılmıştır. Matlab ile 4.1'deki denklem ile BER grafikleri ve bu grafiklerin değerleri elde edilmiştir. Bu grafik değerlerinden de Opnet Modeler araçları

kullanılmaksızın Opnet Modeler'e harici bir model ekleme tekniği olan EMA kullanılarak CSS modülasyon eğrileri oluşturulmuştur.

LoRa fiziksel katmanı için kullanılacak olan CSS modülasyonunun BER ile E_b/N_0 grafiği de Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1-a'da SF7 'ye göre çizilen modülasyon eğrisi görülürken Şekil 4.1-b 'de de SF12 'ye göre çizilen modülasyon eğrisi görülmektedir. Şekil 4.1-a ve b' de E_b/N_0 $E_{şik} = \sim 6 \text{ dB}$ olduğu açıkça görülürken farklı yayılım faktörlerinin (örn.: SF7 ve SF12 gibi) modülasyon eğrisi aynı karakteristiğe sahiptir ancak BER ve E_b/N_0 değerleri birbirinden çok küçükte olsa farklıdır.

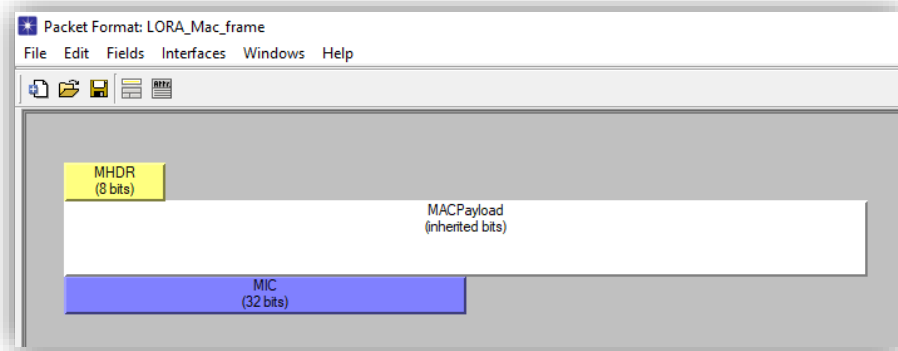
Örnek olması bakımından sadece SF7 ve SF12 'ye göre çizilen modülasyon eğrileri verilmesine rağmen bu çalışma için SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 ve SF12 'nin tümüne göre çizimler yapıp kullanılmıştır.

4.1.2. Çerçeve Formatlarının Modellenmesi

Bu alt bölümde LoRaWAN Spesifikasyon 1.1 'e göre Opnet Modeler Simülasyon Aracı'nda oluşturulan çerçeve formatlarına değinilmiştir. Modellenen tüm mesaj formatları 3.2.2 LoRaWAN Paket Formatları alt bölümünde yer alan formatların birebir aynısını teşkil etmektedir.

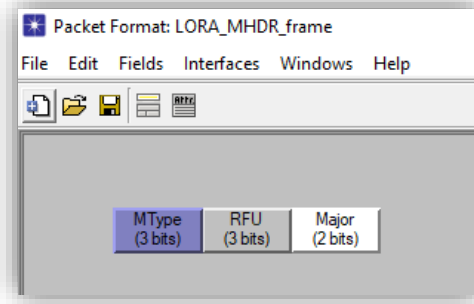
PHYPayload alanı tüm yukarı-bağlantı (uplink) ve aşağı-bağlantı (downlink) mesajlarında, tek oktetli bir MAC başlığı (MHDR) alanı, minimum 7 oktet ile maksimum 250 oktet arasında boyuta sahip olan bir MAC yükü (MACPayload) alanı, 4-oktetlik bir mesaj bütünlüğü kodu (MIC) alanını barındırmaktadır.

Şekil 4.2 'de görülen MACPayload alanının boyutu dinamik olarak değiştiği için "inherited bits" biçiminde ayarlanmıştır.

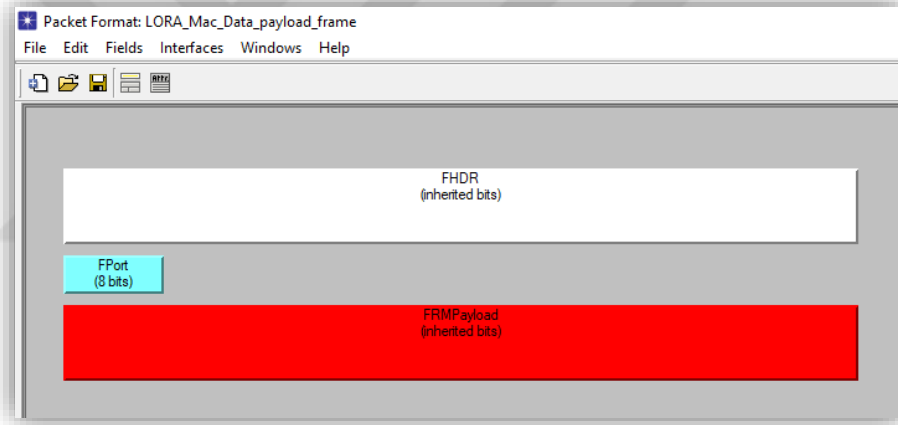


Şekil 4.2. MAC (PHYPayload) katmanının mesaj formatı

MHDR alanı (Şekil 4.3), 3 bitlik mesaj tipini (MType) alanı ve LoRaWAN spesifikasyonlarından hangi ana versiyonu için çerçeve formatının kodlandığını belirten 2 bitlik bir Major alanı ve gelecek kullanımlar için rezerve edilen 3 bitlik bir RFU alanından oluşur.



Şekil 4.3. MHDR alanının formatı

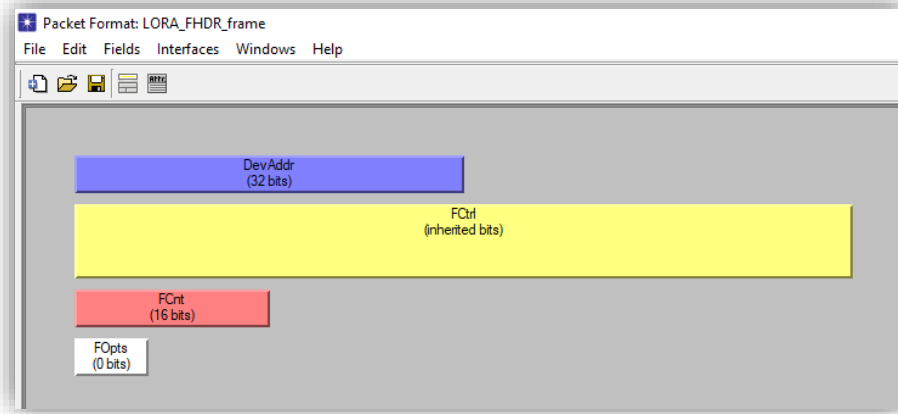


Şekil 4.4. MACPayload Alanının formatı

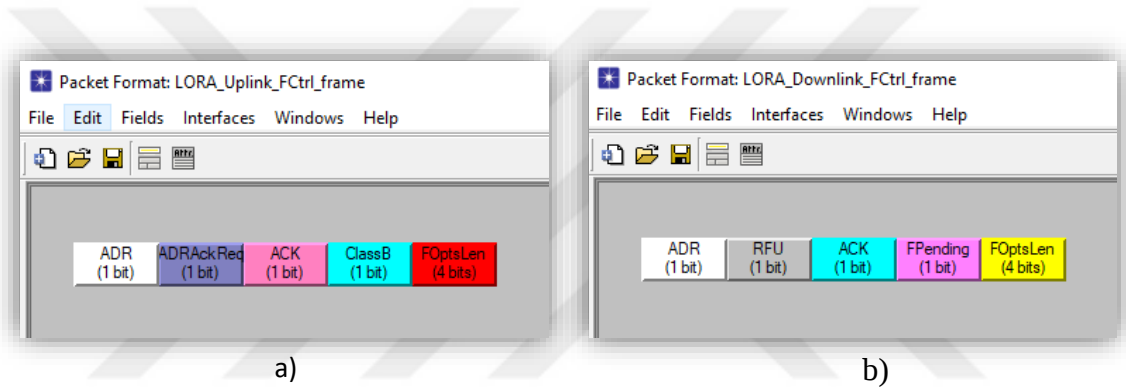
MACPayload alanı (Şekil 4.4), 1 oktetlik opsiyonel bir port alanı (FPort) ve boyutu 0 ila 242 oktet arasında değişen opsiyonel bir çerçeve yükü alanı (FRMPayload) alanı ve boyutu 7 ile 22 oktet arasında değişen bir çerçeve başlığı (FHDR) içerir.

FHDR alanı, Şekil 4.5'te görüldüğü gibi 4 oktetlik son cihazın (DevAddr) kısa adresini tutan alanı, 1 oktetlik çerçeve kontrol (FCtrl) alanını, 2 oktet'lik bir çerçeve sayıcısını (FCnt) ve 0'dan 15 oktete kadar olan MAC komutlarını taşımak için kullanılan çerçeve seçeneği (FOpts) alanını içermektedir.

Çerçeve yük alanı (FRMPayload) boş değilse, port alanı bulunmalıdır. FPort alanının değeri eğer 0 (sıfır) ise FRMPayload alanında yalnızca MAC komutları içerdiği anlamını taşır. FPort alanının 1'den 223'e (0x01..0xDF) kadar olan değerleri uygulamaya özeldir yani uygulama katmanında LoRaWAN uygulamalarını tanımlamak için kullanılabilir.

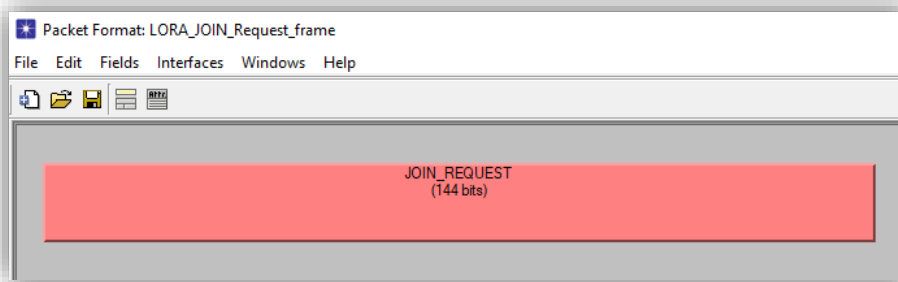


Şekil 4.5. FHDR alanının formatı

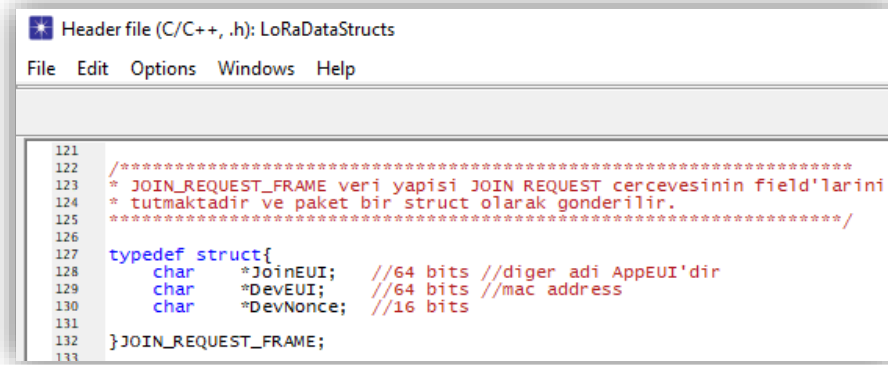


Şekil 4.6. UL ve DL çerçeveleri için çerçeve kontrol (FCtrl) alanının formatı

Şekil 4.6’da görülen FCtrl alanı, yukarı-bağlantı çerçeve kontrol alanı ve aşağı-bağlantı çerçeve kontrol alanı olmak üzere iki ayrılmaktadır. Şekil 4.6-a’ da görülen yukarı-bağlantı (UL) çerçeve kontrol alanı ve Şekil 4.6-b ‘de görülen aşağı-bağlantı çerçeve kontrol alanı arasındaki fark ADRAckReq, RFU, Class B ve FPending alanları birinde bulunurken diğerinde bulunmamasıdır.



Şekil 4.7. Katılım isteği mesaj formatı

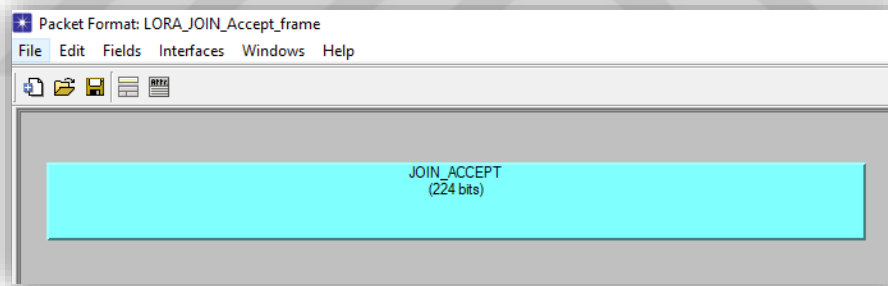


```
Header file (C/C++, .h): LoRaDataStructs
File Edit Options Windows Help

121
122 /*****
123  * JOIN_REQUEST_FRAME veri yapisi JOIN REQUEST cercevesinin field'larini
124  * tutmaktadir ve paket bir struct olarak gonderilir.
125  *****/
126
127 typedef struct{
128     char *JoinEUI; //64 bits //diger adi AppEUI'dir
129     char *DevEUI; //64 bits //mac address
130     char *DevNonce; //16 bits
131 }JOIN_REQUEST_FRAME;
132
133
```

Şekil 4.8. Veri yapısı olarak katılım isteği mesaj formatı

Şekil 4.7 'de görülen katılım isteği mesaj formatı ve Şekil 4.9 'da görülen katılım cevabı mesaj formatı, paket format editöründe “structure” şeklinde tanımlanmıştır. Şekil 4.7 'deki katılım isteği mesaj formatının içerisine Şekil 4.8 'deki JoinEUI, DevEUI ve DevNonce gibi alanların olduğu bir veri yapısı gömülmüştür. Bu veri yapısında alanların hepsi karakter katarı biçiminde bir değişkende tutulmasının nedeni büyük boyutlu değişken verilerinin işlenmesini kolaylaştırmaktır.



Şekil 4.9. Katılım cevabı mesaj formatı

Şekil 4.9 'daki katılım cevabı mesaj formatının içerisine de Şekil 4.10 'daki JoinNonce, NetID, DevAddr, DLSetting, RxDelay ve CFList gibi alanların bulunduğu bir veri yapısı gömülmüştür. DLSetting ve CFList iç içe veri yapısı şeklinde oluşturulmuştur. Burada da dikkat edilirse değişkenler kendisine tanımlanan veri boyutlarından daha büyük değişken tiplerine sahiptir. Yukarıda da değinildiği gibi bunun sebebi bu yazılımlar (veri yapıları) bir simülasyon aracında yani bir kişisel bilgisayarda çalıştığı için herhangi bir bellek, CPU ve batarya gibi kaynaklar yeterli olmakta ve kodlama yaparken kolaylık sağlamaktadır. Eğer gerçek LoRa düğümleri için bu tür yazılımlar yapılacaksa kaynaklar çok sınırlı olduğundan bu tür konulara çok dikkat edilmelidir.

```

Header file (C/C++, .h): LoRaDataStructs
File Edit Options Windows Help

245
246 typedef struct{
247     unsigned int    OptNeg;           //1 bit
248     unsigned int    Rx1DrOffset;      //3 bits
249     unsigned int    Rx2DataRate;      //4 bits
250
251 }DLSettings;
252
253
254 typedef struct{
255     unsigned int    CFListType;        //1 bit
256     unsigned int    FreqCh3;          //3 bits
257     unsigned int    FreqCh4;          //3 bits
258     unsigned int    FreqCh5;          //3 bits
259     unsigned int    FreqCh6;          //3 bits
260     unsigned int    FreqCh7;          //3 bits
261
262 }CFLists; //lorawan bölgesel parametrelerde var.
263
264 typedef struct{
265     char            *JoinNonce;        //24 bits //diger adi AppNonce'dir.
266     char            *NetID;           //24 bits
267     char            *DevAddr;         //32 bits
268     DLSettings      *DLSetting;        //8 bits
269     int             RxDelay;           //8 bits
270     CFLists          *CFList;          //0 or 128 bits
271
272 }JOIN_ACCEPT_FRAME;
273

```

Şekil 4.10. Veri yapısı olarak katılım cevabı mesaj formatı

Şekil 4.11 ‘teki komut yapısı ile uç cihaza bağlı olan aktivatörün çalışıp çalışmayacağını bildirilmektedir. Aktivatörün çalışmasını aktif hale getirmek için “actStatus” değişkeninin değeri “True” olmalı veya pasif hale getirmek için bu değer “False” olmalıdır.

```

Header file (C/C++, .h): LoRaDataStructs
File Edit Options Windows Help

70
71 typedef struct{
72     Boolean          actStatus;        //Aktivator ON olması için TRUE
73
74 }ACTUATOR_COMMAND_PACKET;
75

```

Şekil 4.11. Veri yapısı olarak aktivator komutu mesaj formatı

```

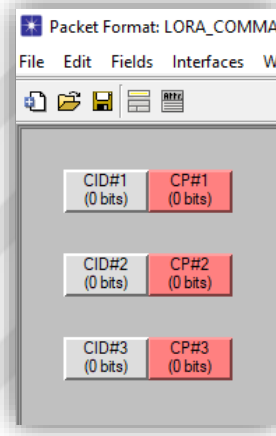
Header file (C/C++, .h): LoRaDataStructs
File Edit Options Windows Help

8
9 typedef struct{
10     short            data[3];          //data[0] : humidity, data[1]: temperature,
11
12 }Sensor_Data_Struct;
13

```

Şekil 4.12. Nem, sıcaklık ve ışık verilerinin tutulduğu veri yapısı

Şekil 4.12 'te uç cihaz tarafından üretilen veriler Şekil 4.4'deki MACPayload alanının FRMPayload alt alanına gömülerek transferi gerçekleştirilir. Dikkat edilirse Şekil 4.12 'deki veri yapısında 2 şer byte'lık nem, sıcaklık ve ışık gibi veriler tutulmaktadır. Bu üç veri elde edilir edilmez hemen mesajla aktarımı gerçekleştirilmemektedir. LoRaWAN protokolünün en önemli özelliği verileri, hatta komut var ise komutları da aynı paket içerisinde gönderebilme özelliğine sahiptir. Seçilen veri oranına (SF'ye) bağlı olarak maksimum yük (payload) alanı boyutu değiştiği için birden fazla veri ve komut aynı paket içerisinde maksimum paket boyutu da göz önüne alınarak aynı pakete gömülüp transferi gerçekleştirilir. Bu sayede verici modülü (Tx) çok fazla aktif olmadığı için enerjiden tasarruf edilmektedir.



Şekil 4.13. Komutlar için mesaj formatı

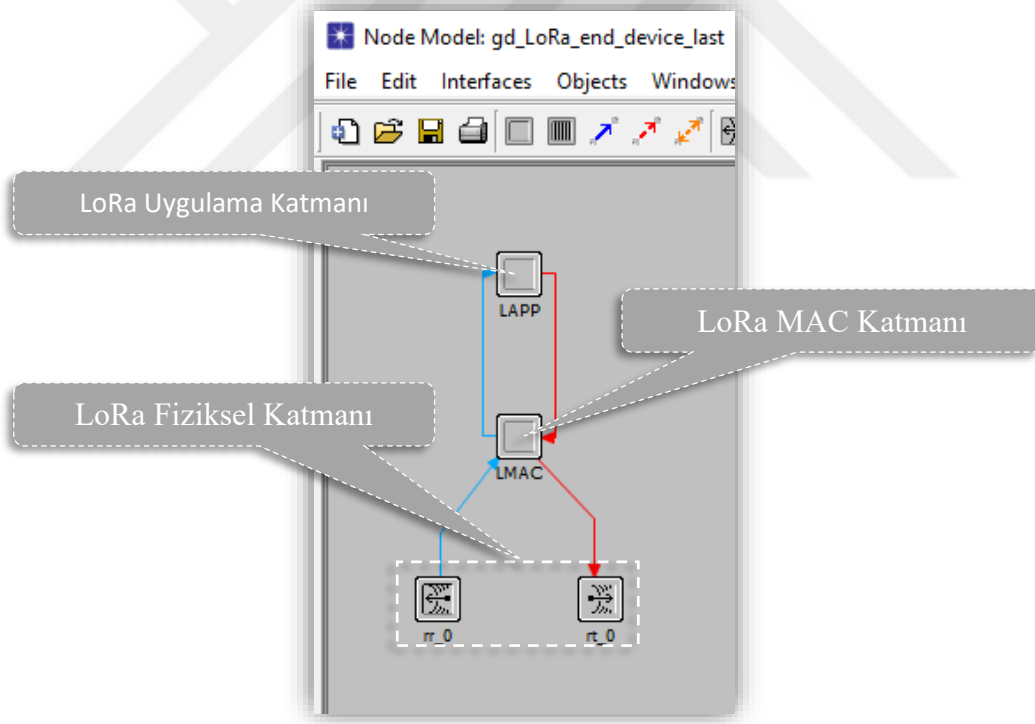
Şekil 4.13'te komutlar için kullanılan mesaj formatı gösterilmektedir. Bu mesaj formatına göre bir komut için iki tane alan bulunmaktadır; "CID#1" ve "CP#1" gibi. Bu alanlardan "CID#1" alanı ile hangi komut kullanılacaksa onun tanımlayıcısı (Id'si) ve "CP#1" alanı ile de komutun içeriği yani yük alanının kullanılacağını belirtmektedir.

Yukarıdaki mesaj türleri Opnet Modeller simülasyon aracında Paket Format Editörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu mesaj türlerinden bazılarının boyutları simülasyon esnasında sabit tutulurken bazılarının ise dinamik olarak değiştirilmiştir. Örneğin Şekil 4.4'te FPort alanı "8 bits" diye belirlenen bu alan simülasyon esnasında çalışan algoritma tarafından değiştirilmeyen boyut iken Şekil 4.4'te FRMPayload alanı "inherited bits" diye belirlenen bu alanın boyutu simülasyon esnasında çalışan algoritma tarafından veri oranı (SF) ve elde edilen veri ve komutlara göre dinamik olarak değiştirilen boyutlardır.

4.1.3. Düğümlerin Modellenmesi

Bu alt bölümde Opnet Modeler’de oluşturulan düğümlerin modüllerine ve bu modüllerin birbiriyle olan ilişkilerine değinilecektir. Özellikle LoRaWAN tarafında modellenen düğümlerin (uç cihaz ve ağ geçidi) fiziksel katmanı, MAC katmanı (LMAC) ve uygulama (LAPP) katmanına ve temelinde ip protokolü olan sunucuların her birinin benzetimi yapılmıştır.

şekil 4.14-15-17 ‘de görülen uç cihaz düğüm modelinde kırmızı ve açık mavi okların bağlı olduğu kare şeklinde görülen yapılar işlemci (processor) ya da modül denilirken oklara da akış (stream) denilmektedir. Bu akışların modüllere bağlandığı yere ise SAP noktası denilmektedir. 802.15.4 ve Zigbee protokollerinde SAP noktaları; veri SAP noktası ve yönetim SAP noktası olmak üzere temelde iki tiptir [70]. LoRaWAN protokolünde (LoRaWAN Spesifikasyon 1.1 veya 1.0 ‘da) ise SAP noktaları ve primitifleriyle ilgili herhangi bir standart bulunmadığı için bu çalışmada tek bir SAP noktası kabul edilip veri primitifleri ve yönetim primitifleri bu SAP noktası ile aktarılmakta ve ayırıştırması/koşturulması da kodlanan algoritma tarafından sağlanmaktadır.

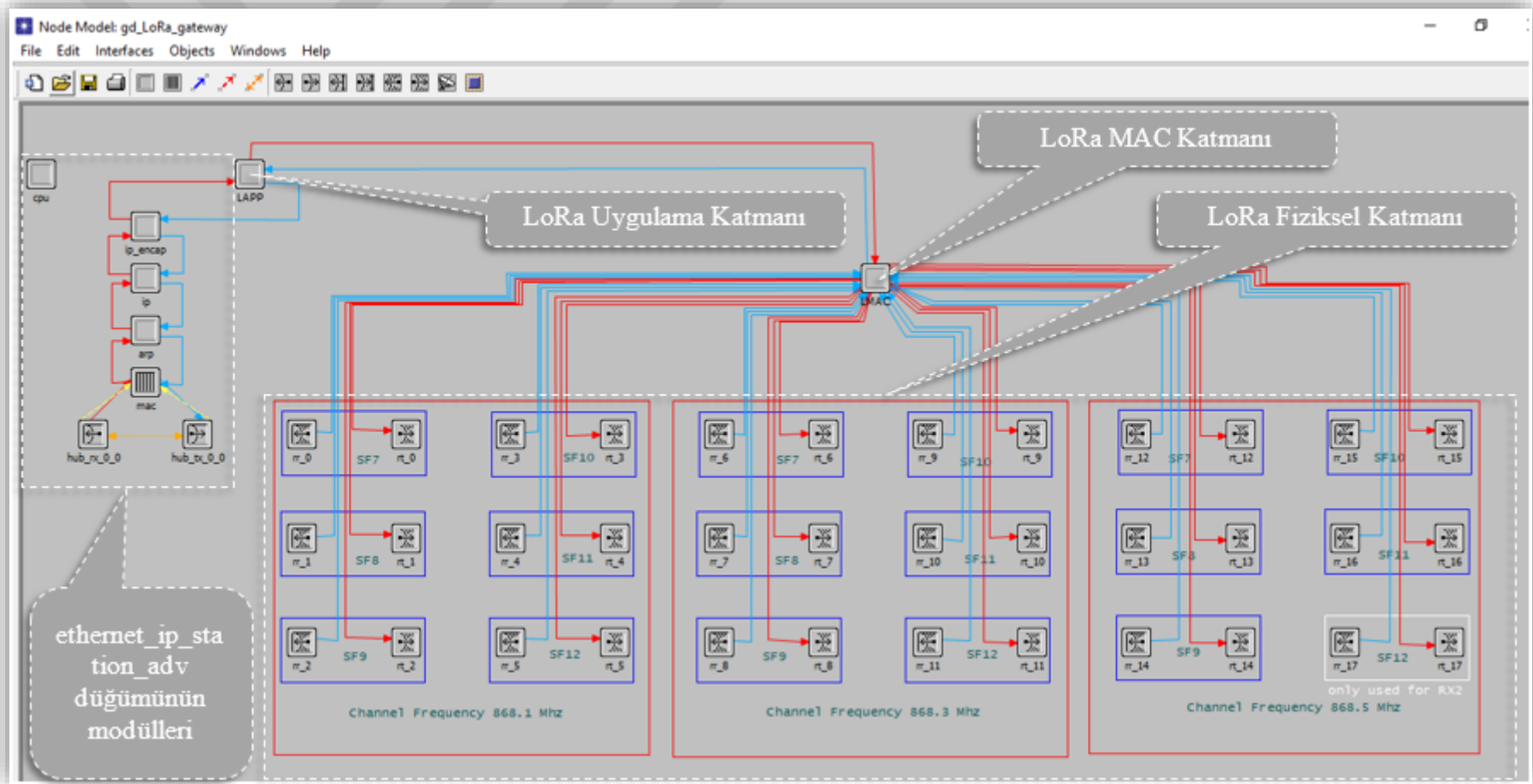


şekil 4.14. Uç cihazın düğüm modeli

şekil 4.14’te görülen uç cihaz için modellenen düğüm yapısında en üst katmanda uygulama katmanı (LAPP), orta katmanda MAC katmanı (LMAC) ve en alt katmanda ise fiziksel katman (rr_0 ve rt_0) bulunmaktadır. Uygulama katmanı aktivator ve sensörleri yönetirken MAC katmanı kablosuz ortama erişimin nasıl olacağını belirler. Fiziksel katmanda ise yer alan iki tane modül

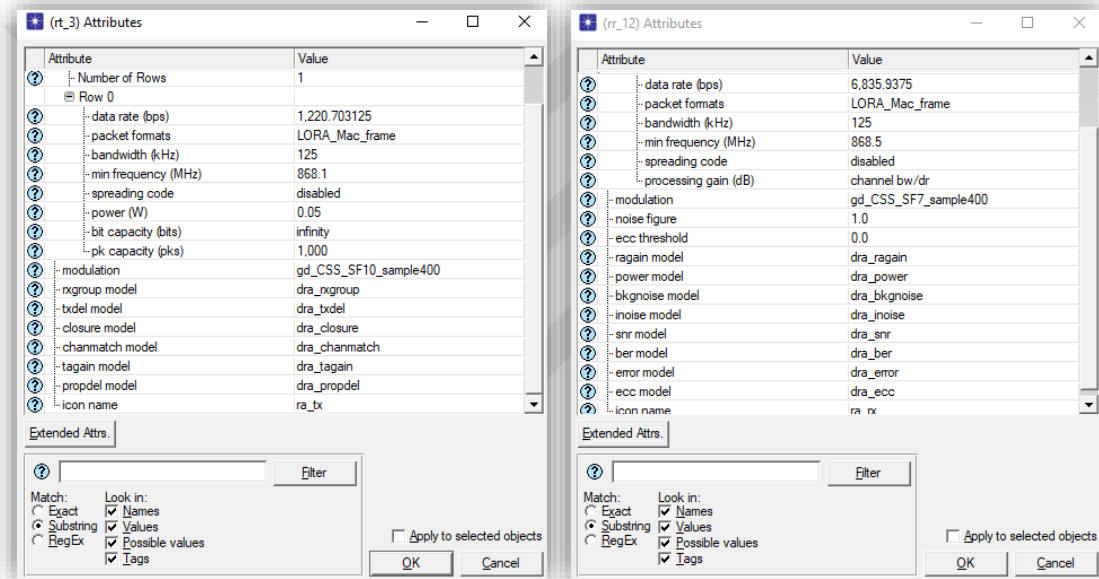
vardır; alıcı (rr_0) ve gönderici (rt_0). Alıcı ve gönderici modülleri kablosuz ortamı kullanarak çerçeve almayı ya da göndermeyi sağlar. Gönderici modülü kırmızı akışın bağlı olduğu SAP noktasından herhangi bir paket gelmesi durumunda, o paketi kablosuz ortama modüle edilmiş sinyal olarak aktarır. Alıcı modül ise sürekli kablosuz ortamdaki sinyalleri dinleme modunda çalışır tabi bu süreklilik veya süresizlik doğrudan MAC katmanıyla ilişkilidir. Dolayısıyla LoRaWAN Spesifikasyon 1.1 [48] ve LoRaWAN Bölgesel Parametreler 1.1 'e [49] uygun olarak alıcı veya gönderici modülü aktif veya pasif olmaktadır.

LoRa ağ geçidinin görevi LoRaWA ve internet ağını senkronize bir şekilde birbirleriyle bağlamaktır. Bir başka deyişle, LoRaWA veya internet ağından gelen ve giden paketlerin protokol dönüşümünü IP veya LoRaWAN protokolüne göre yapmaktadır. Şekil 4.15'te görülen ağ geçidi için modellenen düğüm yapısında iki farklı ağı birbirine bağlayacak olan modüller bulunmaktadır. Bu şekilde de görüldüğü gibi paketlerin IP protokolüne dönüşümü için Opnet Modeler'de hazır düğüm olarak bulunan "*ethernet_ip_station_adv*" düğümünün bazı modülleri (cpu, ip_encap, ip, arp, mac hub_rx_0_0 ve hub_tx_0_0) kullanılırken paketlerin LoRaWAN protokolüne dönüşümü için kendi tasarımı olan uygulama katmanı (LAPP), Mac katmanı (LMAC) ve fiziksel katman (rr_0 ve rt_0 vb. gibi) geliştirilmiştir. Uygulama katmanı protokol dönüşümünü gerçekleştirirken Mac katmanı kablosuz ortama erişimi yönetmektedir. Fiziksel katmanda ise uç cihazın fiziksel katmanında olduğu gibi temelde iki tane farklı modül bulunmaktadır; alıcı (rr_0, rr_3, rr_11 vb. gibi) ve gönderici (rt_0, rt_5, rt_13 vb. gibi). Alıcı ve gönderici modülleri kablosuz ortamı kullanarak çerçeve almayı ya da göndermeyi sağlar. Bu modüllerin görevleri uç cihaz fiziksel katmandaki alıcı ve gönderici modüllerininkilerle aynıdır. Ağ geçidinde alıcı ve gönderici modüllerinin sayısının fazla olması LoRa ağ geçidinin özelliğinden kaynaklıdır. [71] 'de ağ geçidinde kullanılan SX1308 dijital sinyal işleme motoru yada yoğunlaştırıcısı, aynı anda çoklu modülasyon, çoklu radyo kanalı ve çoklu veri oranı (SF) alabilen tamamen dijital bir yarı çift yönlü radyo modemi olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla ağ geçidi, farklı yayılım faktörleri (SF7...SF12) ortogonal olduğu için aynı anda aynı kanal içerisinde farklı SF'li paketleri/sinyalleri alabilmektedir.



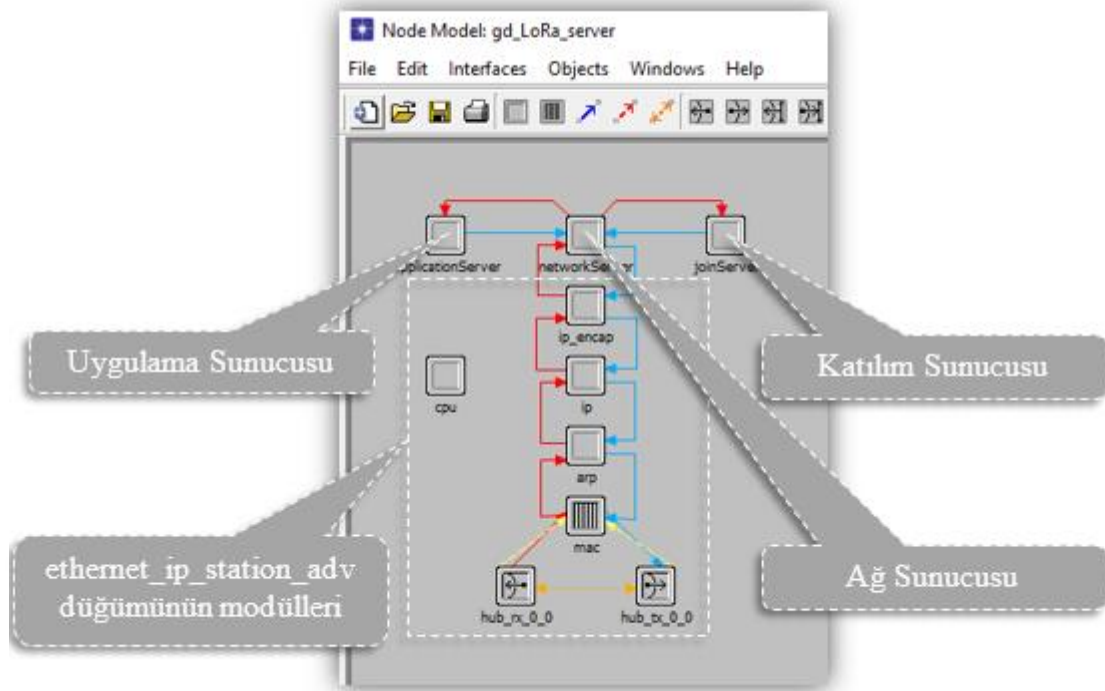
Şekil 4.15. Ağ geçidinin düğüm modeli

Öte yandan Opnet Modeler simülasyon aracında aynı kanal içerisinde ve aynı anda farklı yayılım faktörlü paketlerin alımını sağlamak için alıcı ve verici/gönderici modülleri her bir yayılım faktörlüyle oluşturulan LoRa modülasyonu sayısınca ihtiyaç olmaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışması için zorunlu olan minimum üç kanalda (868.1, 868.3 ve 868.5 MHz) tüm ortagonal yayılım faktörleriyle LoRa modülasyonu ve demodülasyonu yapılabilir. Sadece 868.5 MHz frekansındaki SF12 için demodülasyon sınırlandırılmıştır. 3.2.1'deki Sınıf A ve Alım Penceleri alt bölümde değinildiği gibi Rx_2 alım penceresinde ise bu parametrelerden veri oranı (SF) ve frekans sabittir. Rx_2 alım penceresi için varsayılan parametreler 869.525 MHz ve DR0 (SF12, 125 kHz) olmasına karşılık bu çalışma için 868.5 MHz'lik frekans ve DR0 (SF12,125 kHz) sabit tutulmuştur.



Şekil 4.16. LoRa ağ geçidinin fiziksel katmandaki verici (rt_3) ve alıcı (rr_12) modüllerinin öznelikleri

Şekil 4.16'da görülen LoRa ağ geçidinin fiziksel katmanındaki alıcı ve verici modüllerinin tüm özellikleri sabittir yani simülasyon sırasında değişmezler. Şekil 4.16'da bu ağ geçidinin bazı alıcı (rt_3) ve verici (rr_12) modüllerinin özellikleri gösterilmiştir. Bu modüllerden rt_3, “gd_CSS_SF10_sample400” LoRa modülasyonunu, 868.1 MHz frekansını ve 1220.703125 bps veri oranını kullanırken rr_12 modülü, “gd_CSS_SF7_sample400” LoRa modülasyonunu, 868.5 MHz frekansını ve 6835.9375 bps veri oranını kullanmaktadır.



Şekil 4.17. Sunucu cihazlarının düğüm modeli

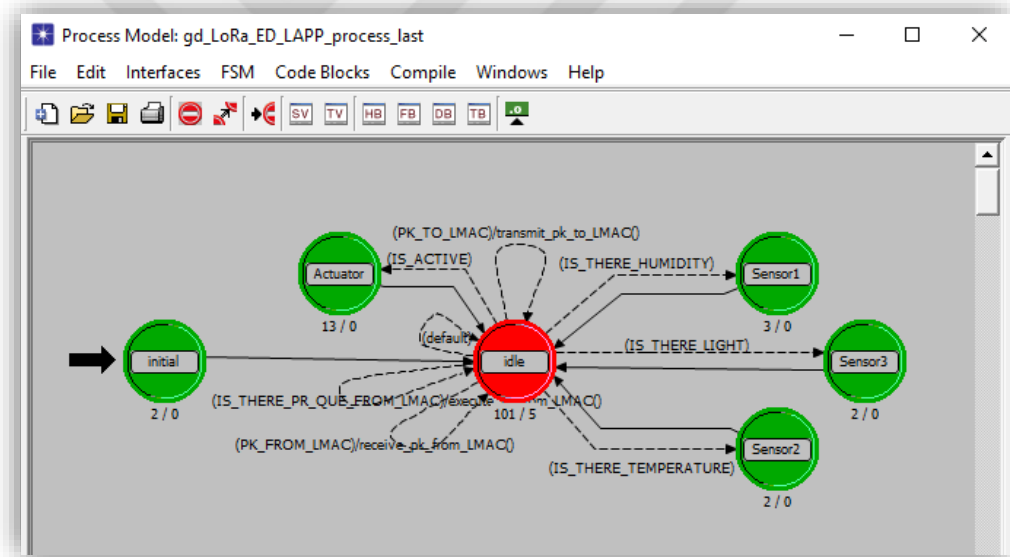
Bir LoRaWA ağını sevk ve idare etmek için en az üç tane sunucuya ihtiyaç duyulmaktadır; merkezi ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucusu. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi paketlerin IP protokolü ile transferi için Opnet Modeler’de hazır düğüm olarak bulunan “ethernet_ip_station_adv” düğümünün bazı modülleri (cpu, ip_encap, ip, arp, mac hub_rx_0_0 ve hub_tx_0_0) kullanılırken LoRaWA ağından gelen mesajların değerlendirmesi ise kendi tasarımı olan merkezi ağ sunucusu (networkServer), katılım sunucusu (joinServer) ve uygulama sunucusu (applicationServer) geliştirilmiştir. Merkezi ağ sunucusu, bir takım güvenlik mekanizmasından ve komutların yönetiminden sorumlu iken katılım sunucusu, bir uç cihazın LoRaWA ağına katılımının sağlanması ve şifreleme mekanizmaları için anahtarların türetimi ve dağıtımından sorumludur. Uygulama sunucusu ise uç cihazlardan gelen sensör verilerinin depolanması ve değerlendirilmesi ve buna karşılık uç cihazdaki aktivatörün aktif yada pasif hale getirilmesinden sorumludur.

Yukarıda modellenen düğümlerin hepsi Opnet Modeler simülasyon aracındaki Düğüm Modeli Editörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.1.4. Sonlu Durum Makinelerinin Modellenmesi

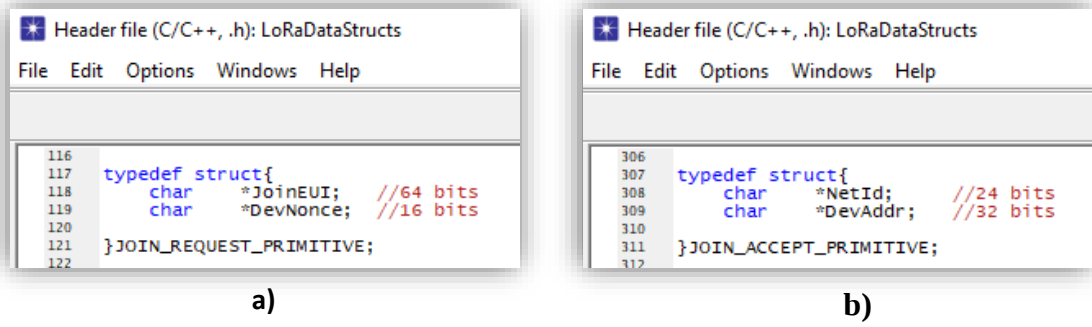
Bu alt bölümde LoRaWA ağı için modellenen düğümlerin (uç cihaz ve ağ geçidi) fiziksel katmanı, Mac katmanı (LMAC) ve uygulama (LAPP) katmanına ve temelinde ip protokolü olan sunucuların Opnet Modeler simülasyon aracında oluşturulan süreç (process) ya da sonlu durum makinesi (SDM) olarak adlandırılan yapıların modellenmesi açıklanmıştır.

Uç cihazın uygulama katmanındaki sonlu durum makinesi Şekil 4.18’de verilmiştir. Bu SDM ile uç cihaz nem, sıcaklık ve ışık olmak üzere üç tane sensörün ve bir tane de aktivatörün kontrolünü üstlenmektedir. Sensörler hem zaman tetiklemeli hem de olay tetiklemeli olarak çalışabilmekteyken aktivatör sadece uygulama sunucusunun değerlendirmesine göre komut mesajları vasıtasıyla aktif yada pasif yapılabilmektedir. Dahası, aktivatörün aktif veya pasif olarak değerlendirilmesi için uygulama sunucusu, ilgili uç cihazdan nem, sıcaklık ve ışık sensörlerinin verilerine ihtiyaç duymakta ve bu bilgiler belirli bir aralıkta ise aktivatör aktif yapılmaktadır.



Şekil 4.18. Uç cihazın uygulama katmanındaki sonlu durum makinesi

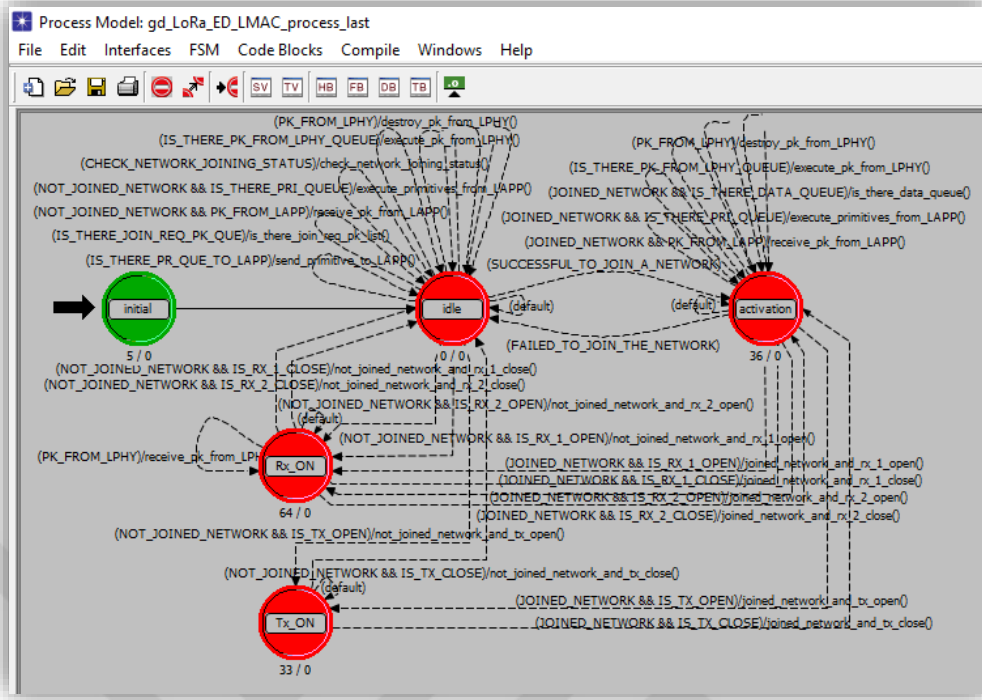
Öte yandan, bu uygulama katmanının SDM'si ile komşu katman olan Mac katmanının haberleşmesi için bazı primitiflerin yönetimi bu SDM tarafından sağlanmaktadır. Bu katmanda kullanılan primitifler; ağa katılım primitifleri, aktivatörün çalışma durumunu belirleyen primitifler ve verilerin aşağı katmana iletilmesini sağlayan primitifler olmak üzere üç tanedir. Bu primitiflerin daha iyi anlaşılması için uç cihazın ağa katılım işlemlerinde kullanıldığı katılım isteği primitifi (Şekil 4.19-a) ve katılım kabulü primitifi (Şekil 4.19-b) aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.19. Uç cihazın uygulama katmanında LoRaWA ağına katılım için kullanılan primitifler

Uç cihazın Mac katmanındaki sonlu durum makinesi de Şekil 5.20’de verilmiştir. Bu katmanda kullanılan SDM ile 3.2.1 alt bölümündeki LoRaWAN A sınıfına göre alım pencerelerinin, ağa katılımın, ağa katılımdan sonra veri ve komut haberleşmesinin ve komşu katmanlarla haberleşmenin yapısı gibi durumların tasarımı yapılmıştır. Bu SDM uç cihaz ilk uyandığı zaman “*initial*” durumunda (state) cihazın çalışması sağlayacak bazı özniteliklerin (modülasyon türü, kanal ve bant genişliği vb. gibi bilgiler) yüklenmesi sağlandıktan sonra “*idle*” durumuna geçip yukarı katman olan uygulama katmanından bir ağa katılım isteği primitifinin (*JOIN_REQUEST_PRIMITIVE*) gelmesini bekler. Eğer bu primitif Mac katmanına ulaşırsa hemen değerlendirmeye alınıp bir katılım isteği mesajı (Şekil 4.7-8) hazırlanıp fiziksel katman vasıtasıyla ağ geçidine ordan da nihai olarak katılım sunucusuna ulaşılması sağlanır. Katılım sunucusu olumlu cevap verecek olursa bir katılım kabulü mesajı (Şekil 4.9-10) oluşturup ilgili uç cihaza bu mesajı iletir. Olumsuz bir cevap verecek olursa ilgili uç cihaza hiçbir mesaj göndermez. Katılım sunucusundan ilgili uç cihazın Mac katmanının SDM’sine katılım kabulü mesajı geldiği takdirde hem “*idle*” durumundan “*activation*” durumuna geçiş yapılır hem de uygulama katmanına ağa katılım sağlandığına dair bir primitif (*JOIN_ACCEPT_PRIMITIVE*) gönderilir. Bu sayede uygulama katmanı artık bir ağa katılım yaptığını bilir ve tekrar tekrar bir ağa katılım isteği primitifi göndermez. “*activation*” durumu artık bir ağa katılım sağlandığı durumdur ve veri ve komut alışverişi istenildiği takdirde gerçekleşmeye hazırdır.

Bu SDM’deki “*Tx_ON*” ve “*Rx_ON*” durumları hem LoRaWA ağına katılım yaparken hemde veri ve komut transferi yaparken fiziksel katmanın alıcı ve vericisini bir başka deyişle alım ve gönderim pencerelerini/slotlarını yöneten durumlardır. Bu slotlardan “*Rx_ON*” durumunda iki farklı alım penceresinin benzetimi yapılmıştır; Rx_1 ve Rx_2 alım pencereleri. “*Rx_ON*” durumu tek bir durum olmasına rağmen bu iki farklı alım penceresinin (Rx_1 ve Rx_2 ’nin) benzetimi bu SDM’nin arka planında çalışan algoritmalar tarafından sağlanmıştır. Rx_1 ve Rx_2 alım pencerelerinin çalışma süreci, 3.2.1’deki Sınıf A ve Alım Pencereleri alt bölümünde açıklandığı gibidir.



Şekil 4.20. Uç cihazın Mac katmanındaki sonlu durum makinesi

Ek olarak, bir OTA aktivasyonunda veya bir onaylı veri çerçevesinin transferi gerçekleştirilirken uç cihazın Rx_1 ve Rx_2 alım pencerelerinin çalışma süreci Şekil 4.21 ve 22’de detaylandırılmıştır. Bu şekillerdeki t_{Rx_1} , Rx_1 alım penceresinin açık kalma süresi iken t_{Rx_2} , Rx_2 alım penceresinin açık kalma süresidir. Bu sürelerin değeri, fiziksel katmanda herhangi bir çerçevenin önsözünün (preamble) eşleşmesi için geçen zaman ve çerçevenin geriye kalan bit’lerinin sayısı ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla bu sürenin hesaplanması için bir bit’in kaç saniyede verici modülünden gönderimi yapıldığının (denklem 4.7) bilinmesi gerekir.

$$Spb = \frac{1}{R_b} = \frac{1}{SF * \frac{BW}{2^{SF}} (bits/sec)} \quad (4.7)$$

Ağ geçitleri tarafından iletilen aşağı bağlantı (downlink) önsözleri 8 sembol içermektedir. Alıcının modülünün herhangi bir önsözü algılaması ve senkronizasyonu için en az 5 sembola ihtiyacı vardır. Bu nedenle de iletilen önsöz ile alım penceresi arasında 5 sembol örtüşmelidir [72]. Bir sinyal için $Rx_{error} \pm 1.5$ msec ve bant genişliği 125 kHz olması durumunda bu 5 sembolün eşleşmesi için gereken minimum süre Tablo 4.2’te verilmiştir.

$$t_{Rx_1} \text{ veya } t_{Rx_2} = t_{önsöz} + Spb * L_{paket} \quad (4.8)$$

Nihai olarak, alım pencerelerinin açık kalma süresi için denklem 4.8 yazılabilir. Bu denkleme göre Tablo 4.2’de de görüldüğü gibi kullanılan yayılım faktörüne göre $t_{\text{önsöz}}$ değeri belirlenir. 3.2.2 alt bölümünde değinilen paketin önsöz (preamble) dışında kalan uzunluğu (Bits) olan L_{paket} ve denklem 4.7’de elde edilen S_{pb} değeri hesaplanarak denklem 4.8 ile elde edilebilir.

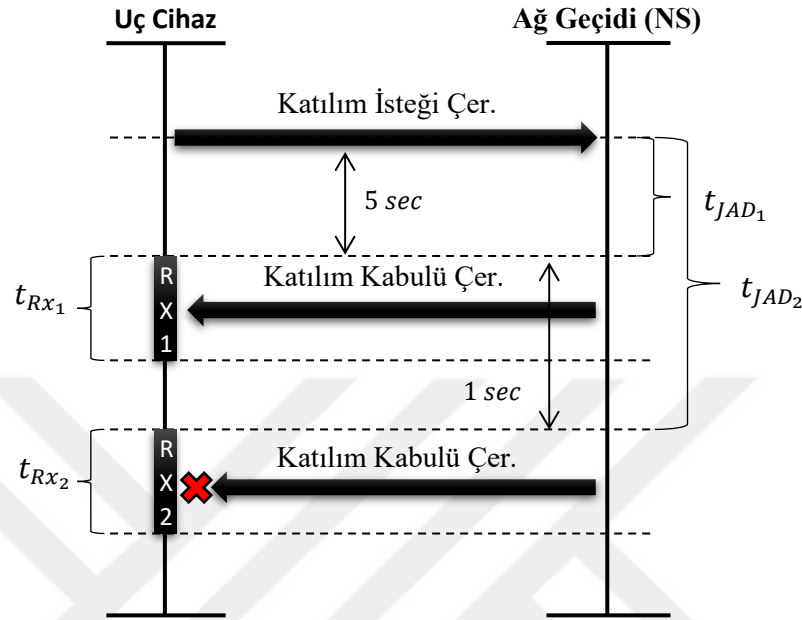
Tablo 4.2. Farklı SF’li sinyallerin önsöz örtüşme süreleri [72].

	T_{sembol}	Rx_{offset}	Rx Penceresi ($t_{\text{önsöz}}$)	
SF	(msec)	(msec)	Sembol	mSec
7	1.0	1.5	5.0	5.1
8	2.0	3.1	5.0	10.2
9	4.1	6.1	5.0	20.5
10	8.2	12.3	5.0	41.0
11	16.4	24.6	5.0	81.9
12	32.8	49.2	5.0	163.8

Bir uç cihazın LoRaWA ağına katılımı için katılım isteği çerçevesi ağ geçidine, ağ geçidinden de ağ sunucusuna ve ordanda katılım sunucusuna gönderilir. Bunun yanı sıra herhangi bir sunucudan uç cihaza veya herhangi bir sunucudan başka bir sunucuya olan tüm paket trafiği ağ sunucusu üzerinden gerçekleşir. Dolayısıyla uç cihazlar ve diğer sunucular arasındaki senkronizasyonu sağlayan cihaz ağ sunucusudur. Öte yandan Şekil 4.21’de görüldüğü gibi, katılım isteği çerçevesi uç cihazdan ağ sunucusuna ulaştınca, t_{JAD_1} ve t_{JAD_2} yani sırasıyla 5 ve 6 saniye kadar sonra tetiklenecek iki zamanlayıcı (timer) kurulur. t_{JAD_1} süre sonra tetiklenecek olan zamanlayıcı tetiklenmeden önce katılım isteğinin cevabı olan katılım kabulü mesajı ağ sunucusuna ulaşmış olmalı ve her iki tetikleme gerçekleştiğinde ise bu mesaj ağ geçidi üzerinden uç cihaza gönderilir. Bir başka deyişle, iki zamanlayıcının tetiklenmesi gerçekleştiğinde (5 ve 6 saniye sonra) aynı katılım kabulü mesajı iki defa ağ geçidi üzerinden uç cihaza gönderilmiş olur. Gönderilen çerçeve eğer uç cihaza, Rx_1 alım penceresi içerisinde ulaşırsa Rx_2 alım penceresi hiç açılmadığı için 6 saniye sonra gönderilen kopya (replica) katılım kabulü mesajı alınmaz. Eğer gönderilen çerçeve Rx_1 alım penceresi içerisinde uç cihaza ulaşmaz ise Rx_2 alım penceresi açılacak ve bu süre içerisinde kopya olan katılım kabulü mesajının ulaşması beklenecektir. Eğer katılım kabulü mesajı, Rx_1 ve Rx_2 alım pencerelerinde alınmaz ise uç cihaz tekrar katılım isteği mesajı iletmek zorunda kalacaktır.

Bir paketin uç cihazdan ağ sunucusuna ulaşmaya kadar birçok gecikme yaşanmaktadır. Bu gecikmelerden; propagasyon gecikmesi, iletim gecikmesi ve kuyruk gecikmesi vb. gibi gecikmeler,

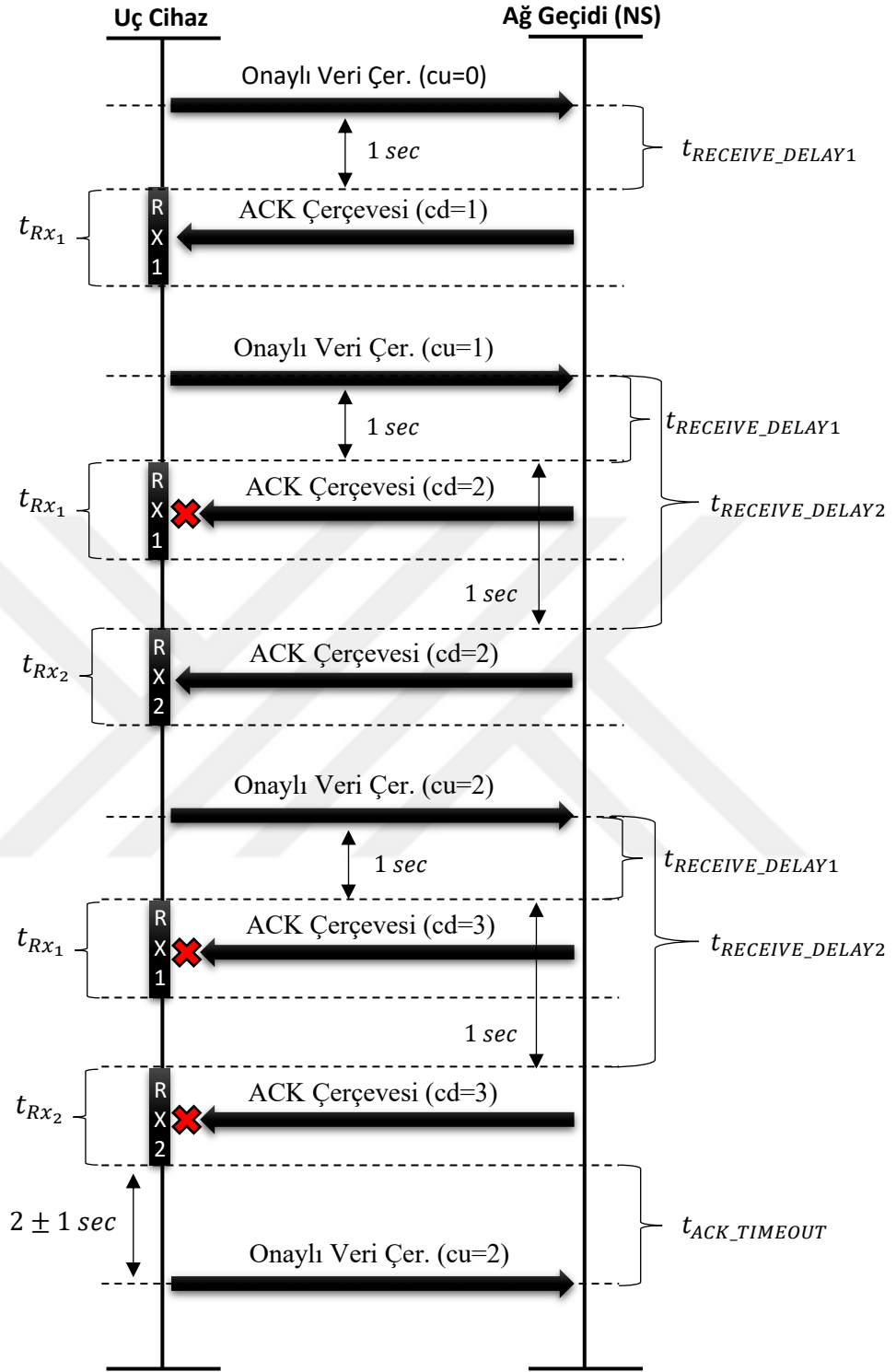
uç cihazın Rx_1 ve Rx_2 alım pencerelerinin ağ sunucusu ile senkronizasyonunda dikkate alınarak benzetimi yapılmıştır.



Şekil 4.21. LoRaWAN'da OTA aktivasyon grafiği

Diğer taraftan, Şekil 4.20'deki SDM'nin onaylı bir veri çerçevesi ile haberleşmesi ve alım pencerelerinin deteylandırılması Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Bu şekildeki t_{Rx_1} , Rx_1 alım penceresinin açık kalma süresi, t_{Rx_2} , Rx_2 alım penceresinin açık kalma süresi, $t_{RECEIVE_DELAY1}$, birinci alım penceresinin açılması için beklenilecek 1 saniyelik süre, $t_{RECEIVE_DELAY2}$, ikinci alım penceresinin açılması için beklenilecek 2 saniyelik süre, $t_{ACK_TIMEOUT}$, bir onaylı veri çerçevesine karşılık onay alınmadığında beklenilecek 1 ila 3 saniye arasındaki süre, cu , yukarı bağlantı (uplink) mesajlarının sayacı, cd , aşağı bağlantı (downlink) mesajlarının sayacıdır. Bu sayaçlardan cu ağ sunucusunda bulunurken cd uç cihazda bulunmaktadır. Bu grafikteki alım pencerelerinin karakteristiği yukarıda açıklanan aktivasyon grafiğinin aynısı olmakla birlikte sadece alım pencerelerinin açılması için beklenen süre farklılaşmaktadır.

Uç cihazdan ilk defa bir onaylı veri gönderildiğinde $cu = 0$ olmakta ve $t_{RECEIVE_DELAY1}$ saniye sonra, Rx_1 alım penceresi açılmakta ve $cd = 1$ olan onay (ACK) çerçevesi alınmaktadır. Uç cihazdan ikinci bir onaylı veri çerçevesi gönderildiğinde $cu = 1$ olmakta ve $t_{RECEIVE_DELAY1}$ saniye beklenip Rx_1 alım penceresi açılmasına rağmen herhangi bir onay (ACK) çerçevesi alınmamaktadır. Dolayısıyla, uç cihaz Rx_2 alım penceresini açıp $cd = 2$ olan onay (ACK) çerçevesini almaktadır.



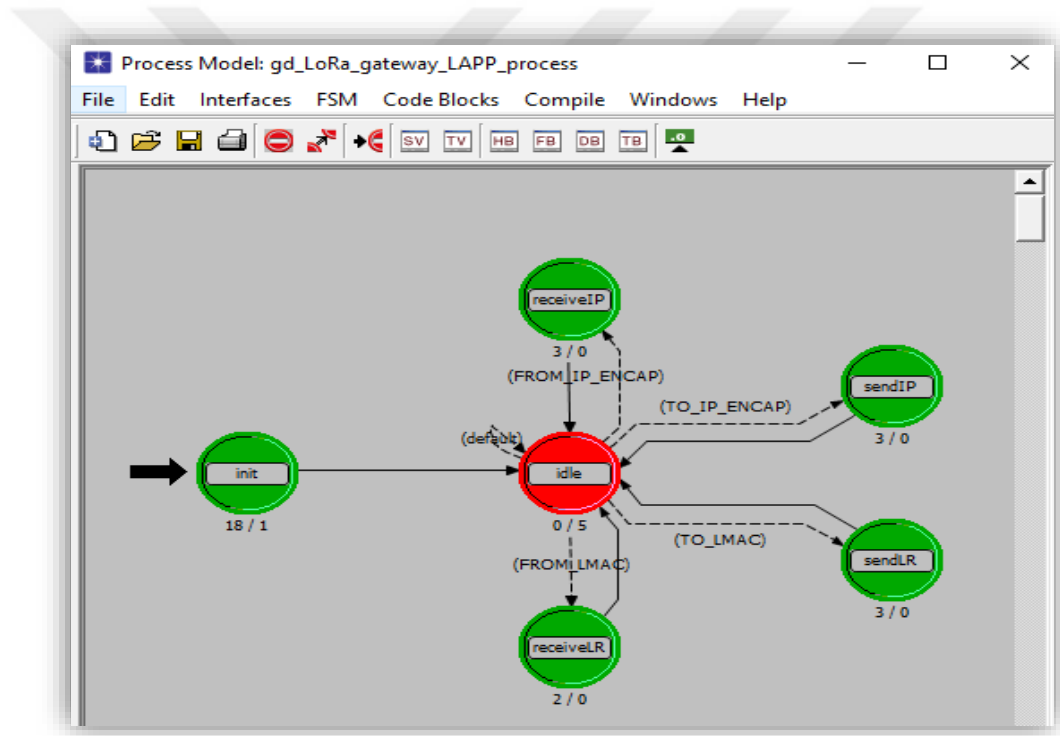
Şekil 4.22. LoRaWAN'da onaylı veri aktarım grafiği

Uç cihazdan üçüncü bir onaylı veri çerçevesi gönderildiğinde $cu = 2$ olmakta ve $t_{RECEIVE_DELAY1}$ saniye sonra Rx_1 ve $t_{RECEIVE_DELAY2}$ saniye sonra Rx_2 alım pencereleri açılmasına rağmen her iki alım penceresinde de onay (ACK) çerçevesi alımı olmamıştır. Bundan dolayı, uç cihazdan üçüncü

onaylı veri çerçevesinin gönderimi, $cu = 2$ olacak şekilde $t_{ACK_TIMEOUT}$ saniye sonra tekrar yapılacaktır.

Uç cihazın Mac katmanındaki sonlu durum makinesi 3.2.3 alt bölümündeki LoRaWAN Bölgesel Sınırlamaları'na tamamen uymaktadır.

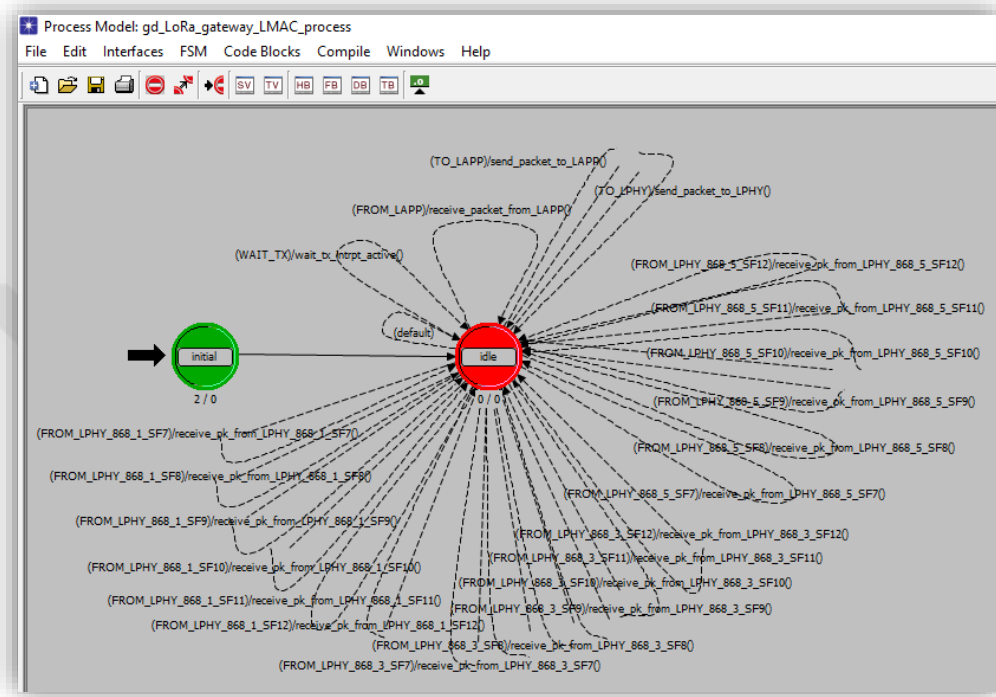
Ağ geçidinin uygulama katmanındaki sonlu durum makinesi Şekil 4.23'te verilmiştir. Bu SDM en önemli görevi LoRaWAN protokolü ile IP protokolü arasında dönüşüm yapmaktır. LoRaWAN ağından gelen paketleri internet ağına, internet ağından gelen (ağ, katılım ve uygulama sunucusundan) paketleri de LoRaWA ağına çıkarabilmek için iki farklı ağ arasında protokol dönüşümü yapmaktadır. Bununla birlikte, bu sonlu durum makinesi, kendisine komşu olan "ip_encap" ve "LMAC" katmanlarıyla da primitifler vasıtasıyla haberleşebilmektedir.



Şekil 4.23. Ağ geçidinin uygulama katmanındaki sonlu durum makinesi

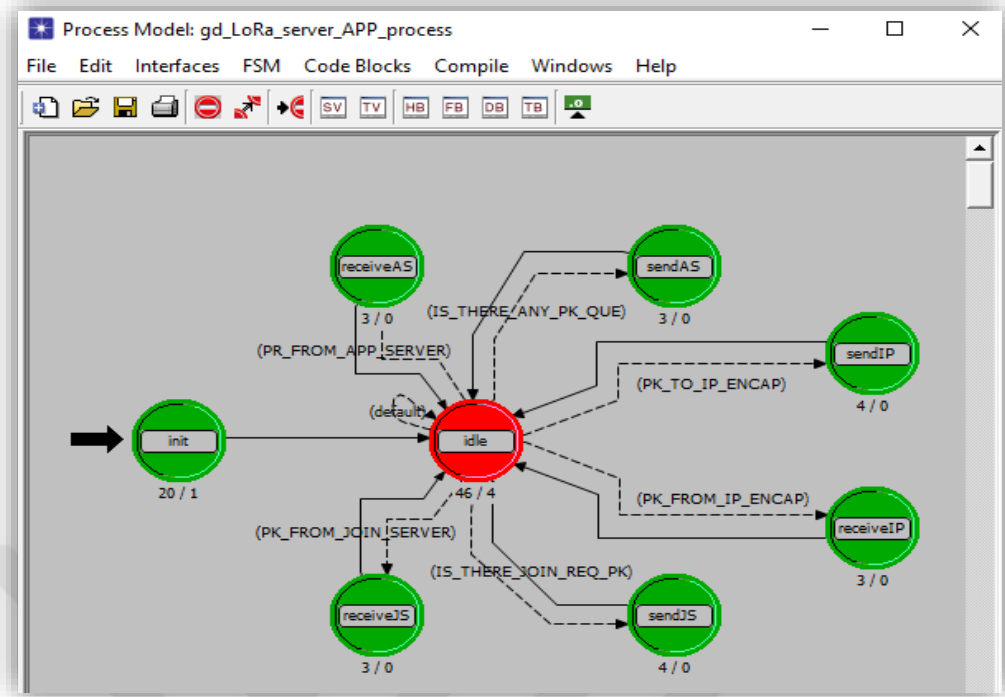
Ağ geçidinin LoRa Mac katmanındaki sonlu durum makinesi ise 4.24'te gösterilmektedir. Bu SDM ile LoRaWA ağ ortamına erişim için fiziksel katmandaki modüllerin kontrolü yapılmaktadır. Bu modüller üç farklı kanal frekansında (868.1, 868.3 ve 868.5 MHz) ve altı farklı yayılım faktörünü (SF7...SF12) desteklemektedir. Bu sayede aynı kanal frekansında farklı yayılım faktörlü sinyaller eş zamanlı olarak alınabilmektedir. Öte yandan, uç cihazdan gönderilen bir yukarı-bağlantı (uplink) mesajında hangi yayılım faktörü ve kanal frekansı kullanılmış ise sunuculardan bu mesaja cevap olarak gönderilecek aşağı-bağlantı (downlink) mesajlarında aynı yayılım faktörü ve kanal frekansı ile uç cihazın Rx_1 alım slotuna gönderilir. Cevap olarak

gönderilen mesajın kopyası ise sadece SF12 yayılım faktörü ve 868.5 kanal frekansı ile uç cihazın Rx₂ alım penceresine gönderilmektedir. Ayrıca uç cihazlardan gelen yukarı bağlantı (uplink) sinyalleri için yayılım faktörüne göre alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) ve sinyal gürültü oranı gibi sınırlama kontrolleri (Tablo 3.1'e bkzn.) bu SDM'de yapılmaktadır.

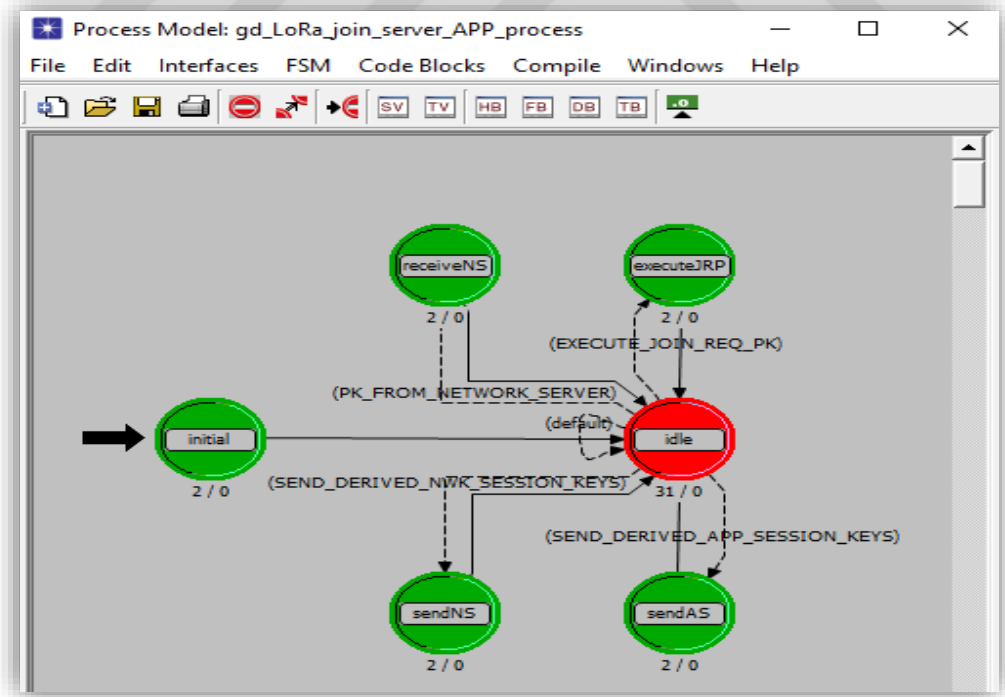


Şekil 4.24. Ağ geçidinin LoRa Mac katmanındaki sonlu durum makinesi

Ağ sunucusunun sonlu durum diyagramı Şekil 4.25'te verilmiştir. LoRaWA ağının tüm trafiği bu sunucu üzerinden gerçekleşmekte ve uç cihazların alım pencerelerinin zamanlaması yani herhangi bir paketin uç cihaza transferi için son olarak zamanlayıcı (timer) işlemleri bu sunucuda yapılmaktadır. Ayrıca uç cihazlardan gönderilen komut mesajlarının muhatabı yine ağ sunucusudur. Dolayısıyla, bu sunucu, 3.2.4 alt bölümünde açıklanan FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey oturum anahtarları kullanılarak sırasıyla mesajların MIC'inin hesaplanması, veri bütünlüğünün sağlanması ve komutların yer aldığı FOpts alanını veya port sıfır iken yük taşıma alanını şifreleyip şifre çözme gibi işlemleri de gerçekleştirir.



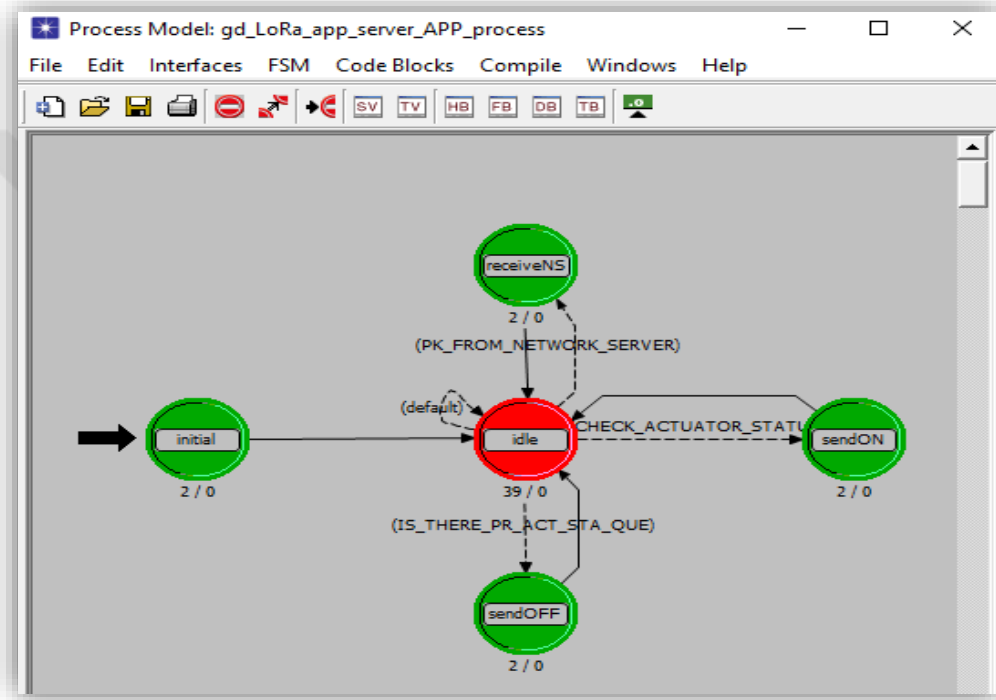
Şekil 4.25. Ağ sunucusunun sonlu durum diyagramı



Şekil 4.26. Katılım sunucusunun sonlu durum makinesi

Katılım sunucusunun sonlu durum diyagramı Şekil 4.26’da verilmiştir. LoRa uç cihazlarının LoRaWA ağına katılma işlemleri bu sunucuda gerçekleşir. Katılım işlemi sırasında her bir uç

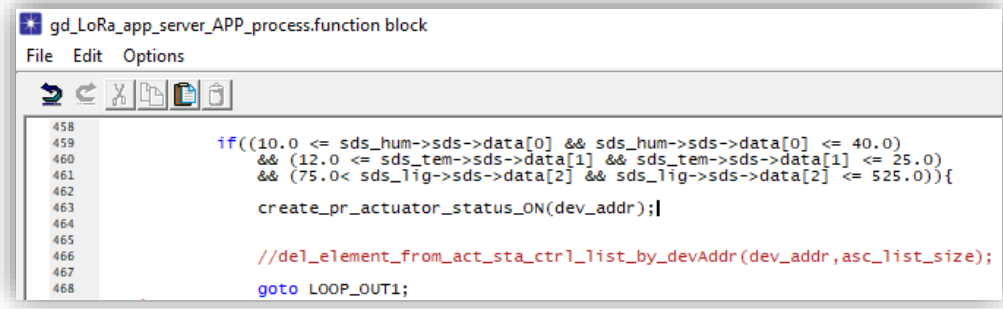
cihaza özel AppSKey, JSIntKey, JSEncKey, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey ve NwkSEncKey anahtarları bu sunucuda türetilir. Türetilen anahtarlardan JSIntKey, JSEncKey katılım sunucusu üzerinde depolanırken FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey anahtarları ağ sunucusuna ve AppSKey anahtarı da uygulama sunucusuna depolanmak üzere güvenli bir protokol (IPsec VPN, Https vb.) vasıtasıyla iletilir. Katılım sunucusunun türettiği bu anahtarlar, LoRa uç cihazlarına kesinlikle gönderilmez. LoRa uç cihazları, bu anahtarları 3.2.4 alt bölümünde açıklandığı gibi elde eder.



Şekil 4.27. Uygulama Sunucusunun sonlu durum makinesi

Uygulama sunucusunun sonlu durum diyagramı Şekil 4.27’de verilmiştir. Bu sunucu LoRa uç cihazlarından gelen nem, sıcaklık ve ışık sensörünün verilerini hem depolar hemde bu verileri değerlendirerek aynı LoRa uç cihazının aktivatörünü aktif veya pasif yapmaktadır. Dolayısıyla, LoRa uç cihazından gelen paketlerin verileri bulundurduğu yük taşıma alanını AppSKey anahtarı ile şifresini çözme gibi işlemleri yine bu sunucu gerçekleştirmektedir.

Uygulama sunucusunun sonlu durum makinesinde yer alan ve aktüvatörün durumunun aktif yapıldığı fonksiyonun bir kısmı Şekil 4.28’de verilmektedir. Bu fonksiyonda aktivatörün durumunun aktif olması için LoRa uç cihazından gelen nem verisi %10 ila %40 Rh arasında, sıcaklık verisi 12 °C ila 25 °C arasında ve ışık verisi de 75 ila 525 lux arasında bir değere sahip olması gerekir.



Şekil 4.28. Aktivatorün kontrolü için kullanılan fonksiyondan bir görünüm

Yukarıda kısaca açıklanan sonlu durum makinelerinin arka planında çalışan algoritmalar LoRaWAN spesifikasyon 1.1 ve LoRaWAN Bölgesel Parametreler 1.1'e uygun olarak geliştirilmiştir. Bu SDM'lerden ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucusu bir fiziksel sunucunun sanal sunucuları olarak modellenmiştir.

4.1.5. Kablosuz Propagasyonun Modellenmesi

Bu alt bölümde, Opnet Modeler simülasyon aracında kablosuz ağ ortamı için kullanılan sinyallerin yayılım modellerini açıklamaktadır.

Radyo dalgası yayılım modeli veya radyo frekansı yayılım modeli olarak da bilinen bir radyo yayılım modeli, radyo dalgası yayılımının frekans, mesafe ve diğer koşulların bir fonksiyonu olarak karakterize edilmesi için deneysel bir matematiksel formülasyondur. Genellikle benzer kısıtlamalar altındaki tüm benzer haberleşme hatları için yayılım davranışını tahmin etmek için tek bir model geliştirilmiştir. Radyo dalgalarının bir yerden diğerine yayılma şeklini biçimlendirme amacı ile oluşturulan bu tür modeller tipik olarak bir haberleşme hattı boyunca veya bir vericinin (Tx Modülü) etkili kapsama alanındaki yol kaybını tahmin etmektedir [73,74].

Yayılım modelleri, dış ve iç mekân olmak üzere temelde iki türe ayrılmasına rağmen bazı yayılım modelleri hem dış mekân hem de iç mekân ortamlarını modellemek için kullanılabilir. Bu tez çalışmasında, hem dış hem de iç mekân ortamları için yol ve gölgeleme kayıplarını hesaplamak için *log normal shadowing* yayılım modeli kullanılmıştır. Bu yayılım modeli denklem 4.9'da ifade edilmektedir [76,77].

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\beta \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \varphi(x) \quad (4.9)$$

Bu denklemde $PL(d)$, d metre uzaklıktaki yol kaybını desibel (dB) olarak ifade ederken $PL(d_0)$, verici ve alıcı arasında referans alınan uzaklıktaki (d_0 : genelde iç mekan için 1 m, dış mekan için 100m ile 1km arasında kabul edilir) yol kaybı

da decibel (dB) olarak ifade edilmektedir. β , yol kaybı katsayısı olarak adlandırılır ve genelde sahadaki ölçümlerle deneysel olarak belirlenir. $\varphi(x)$ (dB), μ sıfır ortalamalı ve σ (dB) standart sapmalı bir Gaussian (Normal) dağılım fonksiyonudur. $\varphi(x)$ fonksiyonu 4.10'daki denklemde verilmektedir.

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.10)$$

Bu denklemde $\pi = 3.14 \dots$, $e = 2.71 \dots$ iken standart sapma olan σ (sigma), gölgeleme sapması olarak adlandırılmakta ve ölçümlerden elde edilmektedir. Tablo 4.3 ve 4.4 sırasıyla yol kaybı katsayısının ve gölgeleme sapmasının bazı tipik değerlerini göstermektedir [77].

Tablo 4.3. Yol kaybı katsayısının (β) bazı tipik değerleri [77].

Ortam		β
Dış Mekân	Boş Alan	2
	Gölgeli Kentsel Alan	2.7 - 5
İç Mekân (Bina)	Görüş Hattı	1.6 - 1.8
	Engelli	4 - 6

Tablo 4.4. Gölgeleme sapmasının (σ) bazı tipik değerleri [77].

Ortam	σ (dB)
Dış Mekân	4 - 12
Ofis, sıkı bölmeli	7
Ofis, seyrek bölmeli	9.6
Fabrika, görüş hattı	3 - 6
Fabrika, engelli	6.8

Bu tez çalışmasında, hem dış mekân hem de iç mekân ortamları için kullanılan *log normal shadowing* propagasyon parametreleri aşağıdaki tabloda (Tablo 4.5) verilmektedir.

Öte yandan, OPNET Modeler, haberleşen düğümler arasındaki radyo bağlantılarının dinamik olarak modellenmesini destekler. Bu bağlantıların özellikleri ve kullanılabilirliği, haberleşen düğümlerinin mobilitesi, verici ve alıcı özniteliklerinin değiştirilmesi ve diğer eşzamanlı iletimlerin bir girişime/parazite sebep olması gibi zamanla değişen faktörlere tabi olabilir. Opnet Modeler'in simülasyon çekirdeği, düğümler arasındaki haberleşme gerçekleştiğinde kablosuz haberleşmenin özelliklerini değerlendirmek için 14 aşamalı bir hesaplamalı iş hattını (pipeline)

kullanır. İş hattının her bir aşaması için Opnet Modeler tarafından varsayılan prosedürler sağlanmıştır.

Tablo 4.5. LNS propagasyon modeli için kullanılan parametreler

Ortam		$PL(d_0)$ (dB)	β_1	β_2	β_3	σ (dB)
Dış Mekân	467 m	-71.2	3.00	4.80	5.00	6.00
	1300 m		4.00	4.75	4.90	
	1380 m		4.00	4.70	4.90	
	3270 m		3.10	3.55	3.90	
İç Mekân	69 m	-31.2	4.50	5.04	5.50	7.00
	106 m		4.30	4.60	5.00	

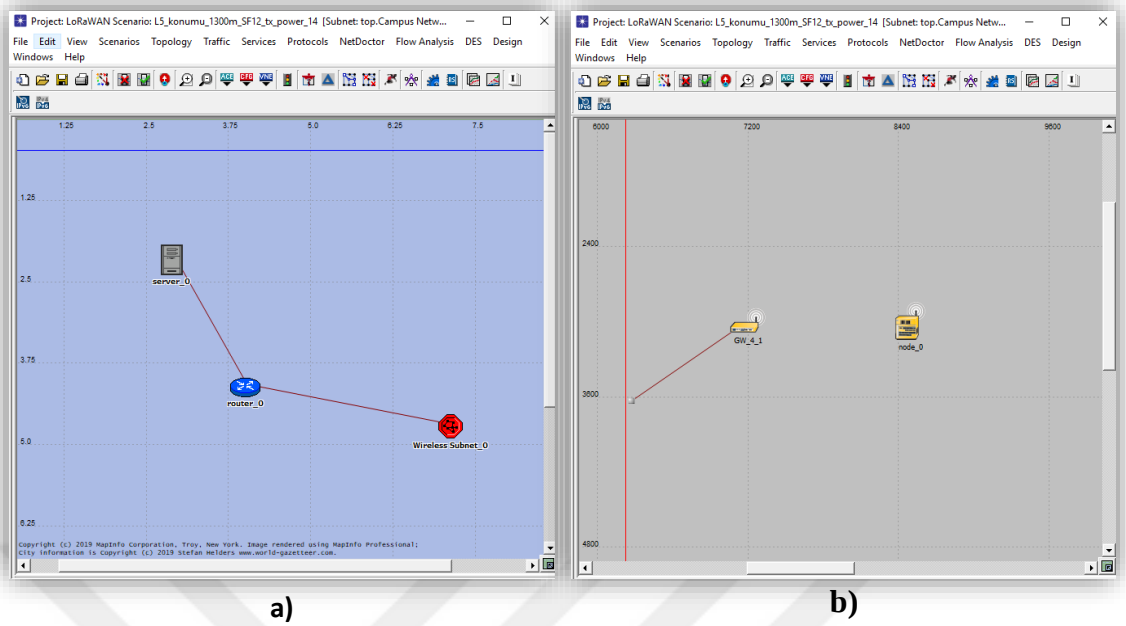
Kablosuz yayılım modelinin Opnet Modeler’de modellenmesi için iş hattının 7. aşaması olan “Received Power” kullanılmaktadır. Bu iş hattı aşaması, varsayılan olarak “dra_power.ps.c” dosyasını kullanırken bu çalışmada yayılım modellerinin algoritmaları bu dosyada yazılarak kullanımı sağlanmıştır.

4.1.6. Ağ Ortamının Modellenmesi

Bu alt bölümde Opnet Modeler simülasyon aracında oluşturulan LoRaWA ağ ortamı hakkında bilgilere yer verilmiştir.

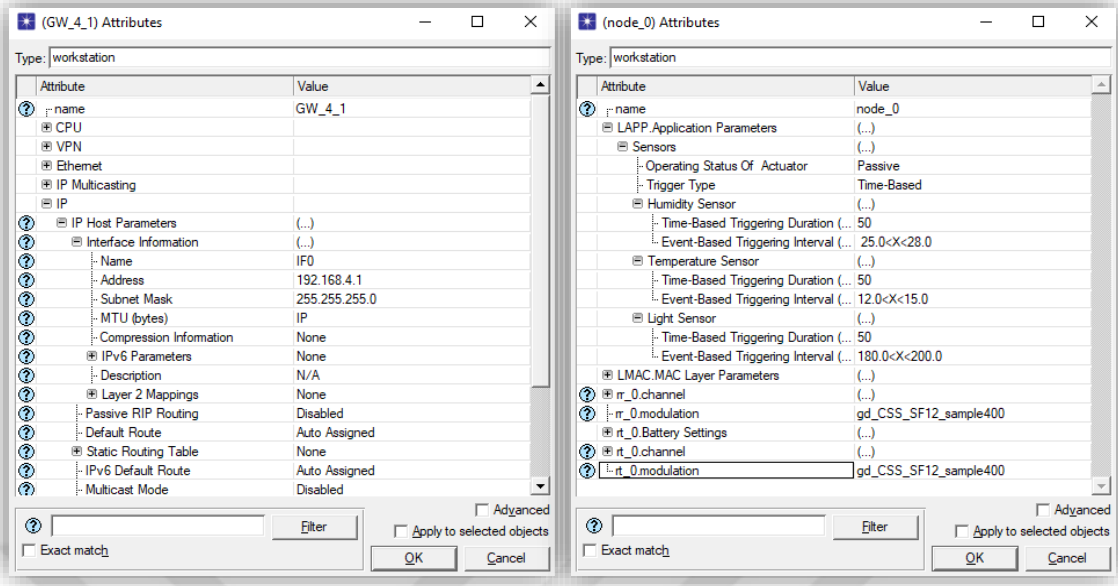
LoRaWA ağ ortamı, 10 km x 10 km ‘lik bir kampüs alanı olarak planlanıp oluşturulmuştur. Bu alan içerisinde bir tane de alt ağ oluşturularak ağ geçidi ve uç cihazların konuşlandırılması bu alt ağda yapılmıştır. Alt ağ oluşturulmasının nedeni; ihtiyaç duyulması halinde birden çok LoRa alt ağı ile çalışma yapabilmektir. Şekil 4.29’da LoRaWA ağ ortamı olan kampüs alanı (Şekil 4.29-a) ve onun alt ağı olan “Wireless_Subnet_0” (Şekil 4.29-b) görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.29-a’da bir tane fiziksel sunucu ve bir tane yönlendirici (router) bulunurken Şekil 4.29-b’de bir tane ağ geçidi (GW_4_1) ve bir tane de uç cihaz (node_0) bulunmaktadır. Alt ağdaki cihazlar LoRaWAN protokolüne göre çalışırken bu ağdaki ağ geçidi tarafından protokol dönüşümü gerçekleştirilerek ve IP tabanlı internet ağına paketler çıkarılarak yönlendirici üzerinden fiziksel sunucuya (server_0) ulaştırılmaktadır. Aynı şekilde bu paket yönlendirmesinin tersi de yani fiziksel sunucudan uç cihaza paket yönlendirilmesi yapılmaktadır.

LoRaWA ağında kablosuz medyaya erişim için saf ALOHA protokolü kullanılırken topoloji olarakta yıldız topoloji kullanılmıştır. Bununla birlikte, uç cihazlar LoRaWAN A sınıfı mekanizmasıyla haberleşmeyi sağlamaktadır.



Şekil 4.29. LoRaWA ağ ortamından bir görüntü

Şekil 4.30'da LoRaWA ağında yer alan ağ geçidi ve uç cihaz için öznitelikler verilmiştir. Şekil 4.30-a'da görülen ağ geçidi özniteliklerinden IP adres 192.168.4.1, alt ağ maskesi 255.255.255.0 ve maksimum taşıyıcı birimi (MTU) IP olarak ayarlanmıştır. Burada özniteliği verilmeyen fiziksel sunucunun da özniteliklerinden IP adres 192.168.23.1, alt ağ maskesi 255.255.255.0 ve maksimum taşıyıcı birimi IP 'dir. Şekil 4.30-b'de görülen uç cihazın öznitelikleri arasında aktivatörün çalışma durumu, aktif olduğunda aktivatör otomatik olarak rastgele zaman aralıklarında kendisini çalıştırıp durdurabilirken pasif olduğunda fiziksel sunucu içerisinde sanal uygulama sunucusu tarafından komut mesajları vasıtasıyla çalıştırılıp kapatılabilmektedir. Bir başka öznitelik olan tetikleme tipi, uç cihaza bağlı olan nem, sıcaklık ve ışık sensörlerinin zaman-tetiklemeli veya olay-tetiklemeli mi çalışacağını belirler. Eğer zaman tetiklemeli seçilirse her sensör tipinin altında yer alan zaman tetiklemeli süre değeri girilmelidir ve bu süreye göre tetikleme olmaktadır. Eğer olay tetiklemeli seçilirse yine her sensör tipinin altında bulunan olay tetikleme aralığının değeri girilmelidir ve bu değer aralığında bir veri elde edilirse işleme alınır. Bu şekilde görülen diğer özniteliklerden kanal bilgileri ve modülasyon türü uç cihazın Mac katmanı tarafından dinamik olarak yönetilebilmesinin yanı sıra Opnet Modeler'in ağ alanındaki (Network Domain) bu özniteliklerden de ayarlanabilmektedir.



a)

b)

Şekil 4.30. Ağ geçidi ve uç cihazın özellikleri

4.1.7. Senaryoların Tasarımı

Bu alt bölümde Opnet Modeler simülasyon aracında oluşturulan LoRaWA kablosuz ağ ortamında bazı performans metriklerinin değerlendirilmesi için oluşturulan senaryolar hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Opnet Modeler'deki oluşturulan senaryolar ile 4.2 alt bölümündeki fiziksel uygulamanın senaryoları temelde birbirine benzemektedir. Opnet Modeler'deki simülasyon uygulamasında da modellenen LoRa cihazlarının iç ve dış mekan performansına odaklanılmaktadır. Bu uygulama için LoRaWAN tarafında temel cihazlardan olan ağ geçidi ve uç cihaz kullanılmıştır. Her iki cihaz türü (GW ve ED) de simülasyon esnasında sabit olarak (yani mobilitenin olmadığı bir şekilde) konumlandırılmıştır.

Dış mekân testi için ağ geçidi her bir senaryoda sürekli aynı konumda (L_{GW}) kalırken uç cihaz toplamda dört farklı konuma yerleştirilerek performans testleri gerçekleştirilmiştir. Uç cihazın ilk test noktası/konumu (L_{ED_1}), ağ geçidinin konumundan 467 m uzakta yer alırken, ikinci test noktası (L_{ED_2}), ağ geçidinden 1380 m uzakta, üçüncü test noktası (L_{ED_3}), ağ geçidinden 3270 m uzakta ve dördüncü nokta (L_{ED_4}), ağ geçidinden 1300 m uzaklığa sahiptir.

İç mekân testi için de ağ geçidi her bir senaryoda sürekli aynı konumda (L_{GW}) kalırken uç cihaz farklı konumlara yerleştirilerek performans testleri gerçekleştirilmiştir. İç mekân simülasyon testi bina içi senaryolarında her ne kadar fiziksel uygulamada iki farklı katta (binanın zemin ve 3. katında) ölçümler alınmış olsa bile simülasyon ortamında yayılım modelleri genellikle alıcı (Rx) ve verici (Tx) arasındaki mesafeyi dikkate aldığı için ilk ölçüm noktası ağ geçidinden 69 m uzakta

(L_{ED_5}) ve ikinci ölçüm noktası 106 m uzaktadır(L_{ED_6}). Simülasyon testi için oluşturulan dış mekân ve iç mekân senaryolarda sadece ağ geçidi ile uç cihazın arasındaki menzil farklı olmaktadır.

Tablo 4.6. LoRaWAN düğümlerinin kullandığı parametreler

Parametreler	Değerler
Frekans	EU 863-870 MHz
Bant Genişliği (BW)	125 kHz
Yayılım Faktörü (SF)	7,8,9,10,11,12
Yük Alanı	6 Bytes
MAC Sınıfı	A Sınıfı
Aktivasyon Türü	OTAA
Adaptif Veri Oranı (ADR)	Devredışı
İletim Gücü	2,8 ve 14 dBm

Tablo 4.6’da da görüldüğü gibi tüm ölçümlerde, ADR devre dışı bırakılmıştır ve paketin boyutu 6 byte olarak sabittir. İletişim tipi onaylamalıdır (Confirmed). Deneylerde kullanılan iletim (Tx) güçleri sırasıyla 2, 8 ve 14 dBm 'dir. Bu senaryoların (lokasyonların) her biri için farklı iletim gücü (2,8 ve 14 dBm), ortam katsayısı (β_1, β_2 ve β_3) ve yayılım faktörü (SF7’den SF12’ye kadar) kullanılarak 800 simülasyon saniyesi süresince (her bir senaryo için 10 tane paket aktarımıyla yani her bir konum ve ortam katsayısı için 180 tane paket aktarımıyla) paket teslim oranı (PDR), alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) ve sinyal gürültü oranı (SNR) gibi performans ölçütlerinin simülasyon testi gerçekleştirilmiştir.

4.2. Gerçek/Fiziksel Uygulama

Bu bölümde gerçek bir LoRaWAN sisteminin kurulumu ve entegrasyonu sağlanarak uç cihazdan farklı iletim gücü, yayılım faktörü ve coğrafi konum kullanılarak paket aktarımı gerçekleştirilerek paket teslim oranı, alınan sinyal gücü göstergesi ve sinyal gürültü oranı gibi performans kriterlerinin analizi yapılmıştır. Yapılan deneylerde, Şekil 4.31-a’da da görüldüğü gibi oluşturulan LoRaWAN sisteminde iki LoRa uç cihazı (Rak811), bir LoRa / LoRaWAN ağ geçidi (Rak831 + Raspberry Pi), bir LoRaWAN bulut sistemi (TTN) ve bir uzak iş istasyonu kullanılmıştır. Bu sistemdeki LoRaWAN uç cihazları ve ağ geçidinin gerçek görünümü de Şekil 4.31-b’de verilmiştir. LoRa uç cihazı, kablosuz LoRa ortamı ile ağ geçidi ile haberleşirken ağ geçidi, kablolu ve güvenli bir TCP/IP protokolü vasıtasıyla internet ağı içerisinde bulunan Nesnelerin Ağı (TTN) ile haberleşmektedir. TTN ile uzak iş istasyonu da kendi aralarında güvenli

bir TCP/IP protokolüne ek olarak MQTT protokolünü kullanmaktadır. Uzak iş istasyonunun görevi; uç cihazdan gelen paketlerin alanlarını ve üst verilerini (metadata) ayrıştırarak MySQL veritabanına kaydetmektir. Ek olarak, uzak iş istasyonunda bir de NodeJS ile yazılan web uygulaması bulunmakta ve bu uygulama sayesinde gelen paketler anlık olarak takip edilebilmektedir.



Uzak iş istasyonu ile ilgili kısa bilgiler verildikten sonra diğer LoRaWAN elemanları hakkındaki ayrıntılı bilgiler aşağıdaki alt bölüm başlıklarında yer almaktadır.

4.2.1. Uç Cihaz

Bu çalışmada kullanılan LoRa uç cihazı, Rakwireless Firması'nın Rak811 modülüdür. Bu modül Semtech SX1276 LoRa alıcı-vericisini, düşük güçle çalışan STM32L mikro-denetleyicini ve kullanıcıların AT komutlarıyla modülü kullanabileceği UART seri haberleşme arayüzünü üzerinde barındırmaktadır. Bu uç cihaz modülünün özellikleri aşağıdaki gibidir [62];

- LoRaWAN protokolünü, küresel lisanssız ISM bandını desteklemekte ve bölgeye göre tam sertifikalandırması bulunmaktadır,
- LoRa noktadan noktaya haberleşme ve OTAA ve ABP gibi aktivasyon seçenekleri sunmaktadır,
- Maksimum çıkış gücü 100 mW (20 dBm)' dir, 5'den 20 dBm'e kadar ayarlanabilir,
- -148 dBm'e kadar yüksek hassasiyet ile çok uzun menzilli bağlantı sağlayabilmektedir,
- 15 km'den daha büyük uzun menzil sağlayabilir,
- 1 milyon düğüme kadar yüksek kapasitelidir,
- Düşük güç tüketimine sahiptir; bekleme modunda 500nA ve hava yoluyla uyandırma desteği bulunmaktadır,
- Çok kanallı, çift veri arabelleğine (her biri 256 bayt) sahiptir,

- LoRa / FSK / GFSK / OOK modülasyonu ile iki yönlü iki yollu haberleşme desteği sunmaktadır,
- 10 yıldan fazla, uzun pil ömrüne sahiptir,
- LoRa teknolojisi, entegre ileri hata düzeltmesi ile birleştirildiğinde parazite karşı bağışıklığı önemli ölçüde arttırarak gürültü seviyesinin 20 dB altında demodüle etme yeteneğine sahiptir.

4.2.2. Ağ Geçidi

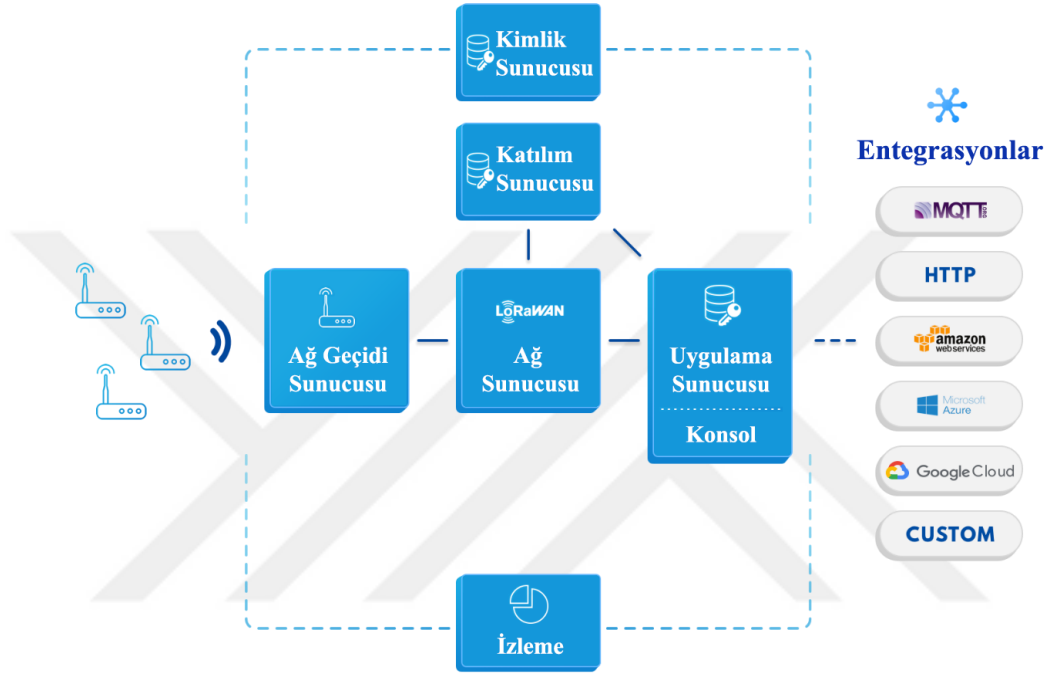
LoRa ağ geçidi olarak Rakwireless Firması'nın Rak831 modülü kullanılmıştır. Bu modül ağ geçidi işlevini yerine getirebilmek için Raspberry Pi veya WisAP (OpenWRT tabanlı) veya WisCam gibi bir sunucuya ihtiyaç duyar. Sunucu işlemcisi, RAK831'e USB veya SPI aracılığıyla bağlanacak olan bir PC veya MCU olabilir. Bu çalışmada sunucu görevini Raspberry Pi 3 Model B+ üstlenmiştir. Bu ağ geçidinin özellikleri aşağıdaki gibidir [63];

- LoRa™ modülasyon teknolojisi,
- 433, 470, 868 ve 915 MHz frekans bantları,
- Ortogonal yayılım Faktörleri (SF7-SF12),
- -142,5 dBm 'e kadar alıcı hassasiyeti,
- Maksimum bağlantı maliyeti 162 dB,
- SX1301 dijital sinyal işleme motoru,
- 49x Lora demodülatör 'ünü taklit edebilir,
- 12 paralel demodülasyon yolu,
- 1 (G)FSK demodülatörü,
- Yüksek frekansta 2 x SX1257 Tx/Rx ön uçları,
- Düşük frekansta 2 x SX1255 Tx/Rx ön uçları,
- Besleme gerilimi 5 V,
- 50'ye kadar optimize edilmiş RF arayüzü,
- 23 dBm 'e kadar çıkış gücü,
- 15 km'ye kadar menzil (Görüş Hattı),
- Kentsel ortamda birkaç km menzile sahiptir.

RAK831, farklı kanallarda farklı yayılma faktörleriyle eşzamanlı olarak gönderilen 8 LoRa paketini alabilir. Bu benzersiz özellik, diğer kısa menzilli sistemlere göre avantajlı olan yenilikçi ağ mimarilerini hayata geçirmeyi sağlar; Uç düğümler (örneğin sensör düğümleri), her aktarımla rastgele bir düzende frekansı değiştirebilir. Bu, parazit bağışıklığı ve radyo kanalı çeşitliliği açısından sistem sağlamlığında büyük bir iyileşme sağlar [63].

4.2.3. Nesnelerin Ağı (TTN)

LoRaWAN ağ ortamımız düşük maliyetli, güvenli ve ölçeklendirmeyi destekleyen ve bir dizi açık araç sunan, herkesin kullanımına açık bulut tabanlı bir ağ olan Nesnelerin Ağı'na (The Things Network /TTN) entegre bir şekilde çalışmaktadır ve bu ağ (TTN'in) teknolojisi hakkında bazı önemli bilgiler de aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.32. Nesnelerin Ağı'nın teknoloji yığını [64].

Şekil 4.32 'de görülen Nesnelerin Ağı Yığını V3, mevcut tüm LoRaWAN sürümlerini (1.1 dahil), çalışma modlarını (A, B ve C) ve tüm bölgesel parametreleri destekleyen çeşitli dağıtım senaryoları için tasarlanan eksiksiz ve açık kaynaklı bir LoRaWAN sunucu yığınıdır [64]. Mikro hizmetler mimarisi, diğer sistemlerle uyumlu çalışabilirliğin yanı sıra işlerin ayrılmasını, dağıtılmasını ve ölçeklendirilmesini sağlar.

LoRaWAN, hem ağ hem de uygulama düzeyinde şifreleme, bütünlük ve kimlik doğrulama kullandığından tasarım açısından güvenlidir. Nesnelerin Ağı Yığını V3, LoRaWAN anahtarlarını güvenli bir şekilde saklayan ve oturum anahtarlarını Ağ Sunucusu ve Uygulama Sunucusuna veren güvenli Katılım Sunucuları (Join Server) kullanır.

Nesnelerin Ağı Yığını V3, endüstri standardı protokolleri de kullanarak uygulamalara entegre edilebilmektedir.

Birinci tasarım olan Uygulama Programlama Arayüzü (API), veri düzleminde gRPC, HTTP ve MQTT teknolojilerini ve kontrol düzleminde gRPC ve HTTP teknolojilerinin entegrasyonlarını

sunar. Bu sayede kullanıcılar, kuruluşlar, ağ geçitleri, uygulamalar ve cihazlar yönetilebilir ve yukarı bağlantı (Uplink), aşağı bağlantı (Downlink) ve düşük seviye işleme olaylarının akışına gerçek zamanlı olarak etkileşimde bulunulabilmektedir.

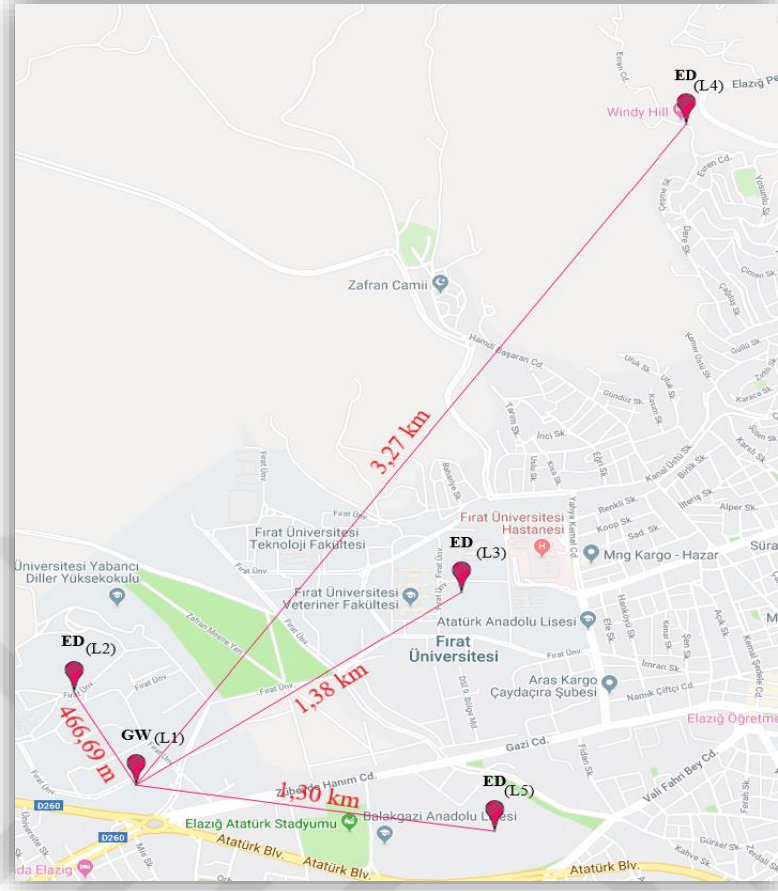
Mikro hizmetler mimarisi, yüksek düzeyde ölçeklenebilir ve yüksek düzeyde kullanılabilir küresel LoRaWAN ağları oluşturmak için özelleştirilen hizmetlerin örneklerinin çoğaltılmasına ve kümelerin içindeki hizmetlerin dağıtılmasına da izin vermektedir.

Nesneler Ağı Yığını V3, yalnızca bulut hizmetleriyle ilgili değildir: ağ geçitleri her LoRaWAN ağında temeldir. Bu nedenle, standart paket ileticisi (forwarder) ile herhangi bir ağ geçidini desteklemenin yanında, V3 Ağ Geçidi Faktörü, uzaktan yapılandırma, güvenli bağlantı, daha iyi bir görüş ve ayrıca hücresel ve uydu ana taşıyıcıları (backhaul) kullanırken maliyetleri azaltmak için düşük bant genişliği modu sağlar.

Nesneler Ağı Yığını V3, büyük miktarda trafiği kaldıran üretim ortamları için tasarlanmıştır. Bu nedenle, yığın ağda sorunları izlemek, aygıt davranışlarını izlemek ve yararlı uyarılar almak için bilgi sağlamaktadır.

4.2.4. Deneysel Yöntem

Tüm deneylerde, hem uç cihazın (ED) hem de ağ geçidinin (GW) konumu sabitlenmiştir. Dış mekan testlerinde GW, yerden yaklaşık 25 m yükseklikte olan bölüm binasının balkonuna yerleştirildi. Ağ geçidinin konumu Fırat Üniversitesi kampüs alanında olmakla birlikte şehir merkezine yakındı (L1). Dış mekan testlerinde ED, 5 farklı ölçüm noktasına taşındı. İlk ölçüm noktası (L2), GW'den yaklaşık 467 m uzakta olan üniversite kampüs alanında bulunmaktadır. Bu nokta ve GW arasında, Fresnel Bölgesi açık değildir. Bu bölge toprak ve ağaçları içermektedir. Diğer bir dış mekân ölçüm noktası (L3), kampüs içindeki bir dinlenme alanıdır. L3 ve GW arasındaki mesafe yaklaşık 1380 m'dir ve aralarında boş alan yoktur. Fresnel bölgesi diğer bölüm binalarını ve çok sayıda ağacı içerir. L4 ölçüm noktası GW'den yaklaşık 3270m uzaklıkta olan Gülmez Tepesi'ndedir. Bu konum iyi bir Fresnel bölgesine sahiptir. L5 şehir merkezindedir ve GW'ye olan mesafe yaklaşık 1300 m'dir. Bu nokta ve GW arasında boş alan yoktur [65].



Şekil 4.33. Dış mekân ölçüm noktaları

Ek olarak, GW'den yaklaşık 5900m uzaklıkta bulunan beşinci bir nokta olan turistik Harput Tepesi'nden bir ölçüm yapıldı. Ancak tüm SF ve iletim güç parametreleri için herhangi bir paket alınmadı. Bu nedenle, bu nokta şekillerde gösterilmemiştir. Dış mekân ölçüm konumları Şekil 4.33'te gösterilmektedir. Ek olarak, Tablo 4.7, ölçüm noktalarının Fresnel Bölgesi özelliklerini ve bölgedeki engelleri göstermektedir.

Tablo 4.7. Test konumları için Fresnel bölgesi özellikleri

Konum	Mesafe (km)	Rakım	Frekans (MHz)	1. Fresnel Bölgesinin % 60 (m)	Açıklama
L2	0.467	1108	868	6.35	Birkaç ağaç ve direk, kısmi açıklık var.
L3	1.38	1097	868	10.92	Açıklık yok, diğer bölümlerin binaları ve ağaçlar var.
L4	3.27	1259	868	16.81	İyi açıklık var.
L5	1.30	1081	868	10.60	Açıklık ve boş alan yok.

İç mekan testleri iki ortamda yapıldı. İlki, 5 katlı bölüm binasıdır. Binanın büyüklüğü 100m x 40m'dir. İkincisi, bir yeraltı tüneldir. GW'nin konumu dış mekan testlerinki ile aynıdır. ED iki ayrı ölçüm noktasına taşındı. İlki (L6), 3. kattaki WSN laboratuvarıydı. Bu laboratuvar tamamen kapalıdır ve birçok engel içermektedir. İkinci (L7) ölçüm noktası, zemin kat koridorunun bitiş noktasıdır. Binanın çizimi Şekil 4.34'te verilmiştir. Tünelin enine kesiti 2m x 4m'dir. Bu dar kesitli tünel 277 metredir ve elektrik, telekomünikasyon ve ısıtma tesisatı için kullanılır. Tünelde çok yollu etkiye ve zayıflamaya neden olabilecek birçok araç ve ekipman vardı. GW, tünelin girişine yakın olan ve bir WiFi bağlantısına sahip olan bir noktada (L8, L9) bulunuyordu. Tüneldeki ölçüm noktaları GW'den 70m, 90m ve 120m uzaklıktadır. 120 metreden sonrası için fiziksel zorluklar nedeniyle ölçüm yapılamadı.



Şekil 4.34. Bölüm binası ve kat planı

Test yerlerine ait birkaç görüntü Şekil 4.35 'te verilmiştir. Ayrıca, testler sırasında kullanılan parametreler Tablo 4.8 'de sunulmaktadır [65].

Deneylerde gözlemlenen parametreler paket teslim oranı (PDR), alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) ve sinyal gürültü oranı (SNR) 'dır. Tüm ölçümlerde, ADR devre dışı bırakılmıştır ve paketin boyutu 30 bayttır. İletişim tipi onaylanmamıştır (Unconfirmed). Deneylerde kullanılan iletim (Tx) güçleri sırasıyla 2, 8 ve 14 dBm 'dir. Her lokasyon için farklı iletim gücü ve SF parametreleri kullanılmış ve 1000 paket gönderilmiştir. Ölçümler 10 gün sürdü. Ölçümler sırasında, hava sıcaklığı 27-30 °C 'idi ve nem yaklaşık %35 idi.



L1



L2



L3



L4



L5



L6



L7



L8



L9

Şekil 4.35. LoRaWAN performans ölçümleri için kullanılan konumlar

Tablo 4.8. LoRa düğümü için kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler
Frekans	EU 863-870 MHz
Bant Genişliği (BW)	125 kHz
Yayılım Faktörü (SF)	7,8,9,10,11,12
Yük Alanı	30 byte
Kodlama Oranı (CR)	4/5
MAC Sınıfı	A Sınıfı
Aktivasyon Türü	OTAA
Adaptif Veri Oranı (ADR)	Devredışı
İletim Gücü	2,8 ve 14 dBm

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

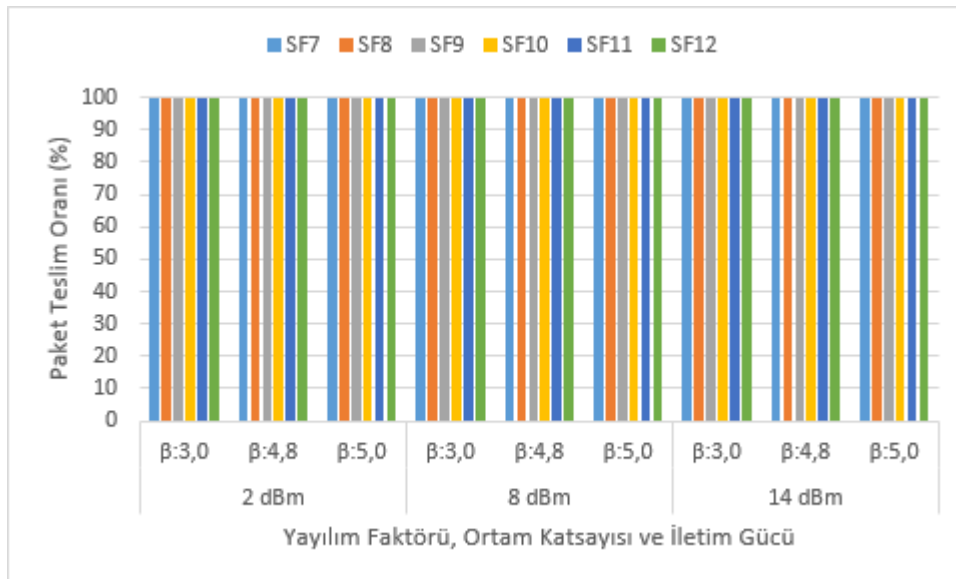
Bu bölümde, simülasyon ve gerçek/fiziksel uygulamada gerçekleştirilen LoRaWA ağının PDR, RSSI ve SNR gibi performans ölçütlerine göre dış ve iç mekân testleri yapılarak elde edilen bulgular paylaşılıp tartışılmıştır. Ayrıca, simülasyon ve gerçek uygulamada benzer senaryolar kullanıldığından bu iki uygulamanın 467 m ve 1300 m konumlarından elde edilen dış mekân bulguları PDR, RSSI ve SNR ölçütlerine göre kıyaslanarak analiz edilmiştir.

5.1. Simülasyon Uygulamasının Sonuçları

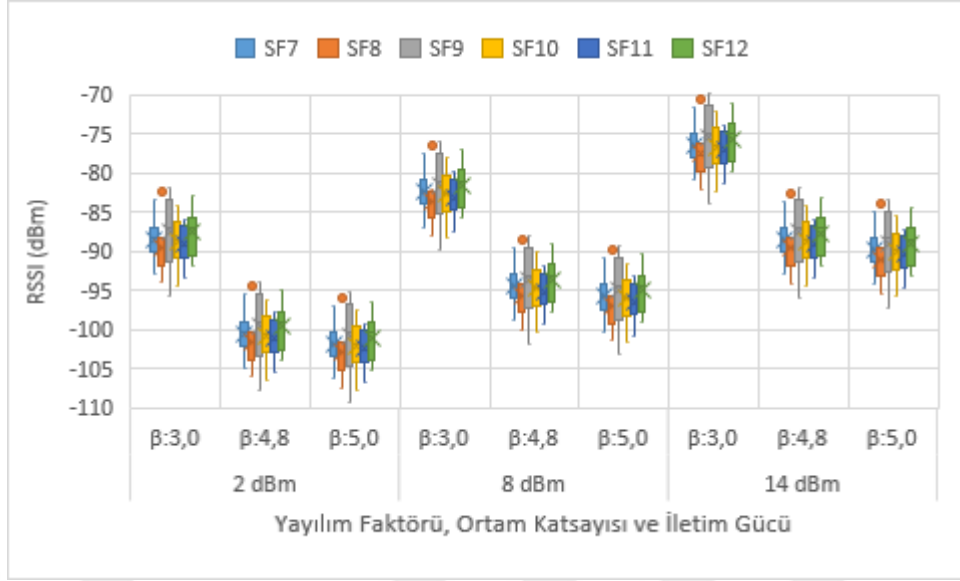
Bu alt bölümde, Opnet Modeler simülasyon aracında modellenen LoRaWAN ağ cihazlarının performans testleri hem dış mekân hem de iç mekân için gerçekleştirilmiştir. Performans testleri, her bir konum için *log normal shadowing* propagasyon modelinin β_1 , β_2 ve β_3 ortam katsayılarıyla (bkz. Tablo 4.5'e) elde edilen gölgelemeye bağlı olarak PDR, RSSI ve SNR ölçütleriyle ölçümler yapılmıştır.

5.1.1. Dış Mekân Ölçüm Sonuçları

Bu alt bölümde, simülasyon uygulaması için dış mekân ölçümlerinin sonuçları paylaşılmaktadır. Uç cihazın ağ geçidinden 467m uzak olduğu L_{ED_1} konumu için, farklı ortam katsayılarına, iletim güçlerine ve SF'lere göre elde edilen PDR, RSSI ve SNR grafikleri sırasıyla Şekil 5.1-2-3'te verilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_1} (467 m) konumundaki PDR ölçümleri

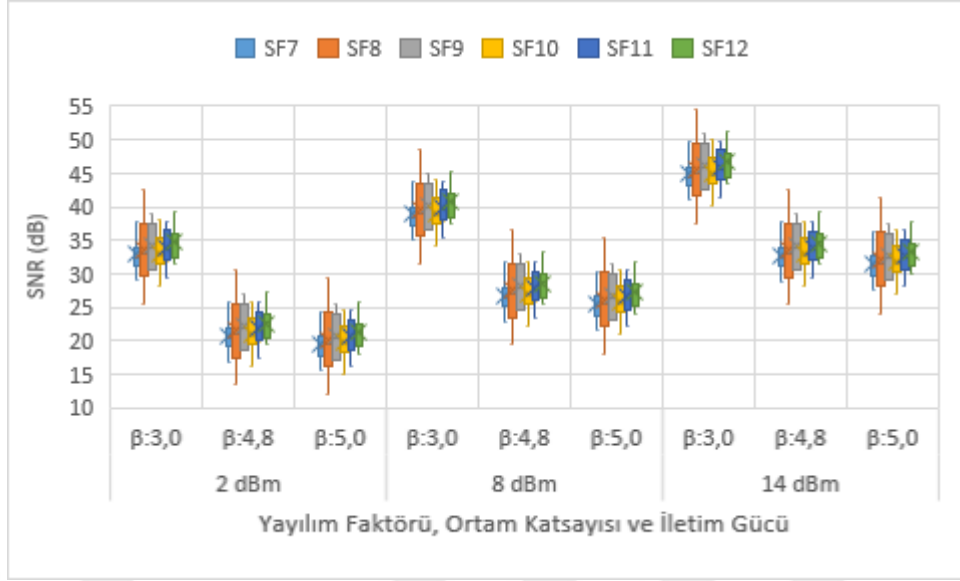


Şekil 5.2. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_1} (467 m) konumundaki RSSI ölçümleri

Şekil 5.1 sırasıyla 2, 8 ve 14 dBm’lik iletim güçlerinin ve ortam katsayılarının ($\beta_1:3.0$, $\beta_2:4.8$ ve $\beta_3:5.0$) kullanıldığı grafiklere karşılık gelmektedir. İletim gücü 2 dBm olduğunda tüm yayılım faktörleriyle yapılan haberleşme %100’lük başarıyla paket teslim oranını sağlarken diğer iletim güçlerinde de aynı başarı oranını devam ettirmiştir. En düşük iletim gücünde ortam katsayısı maksimuma (β_3) çıkarılmasına rağmen PDR oranı tüm yayılım faktörleri için %100 olmuştur.

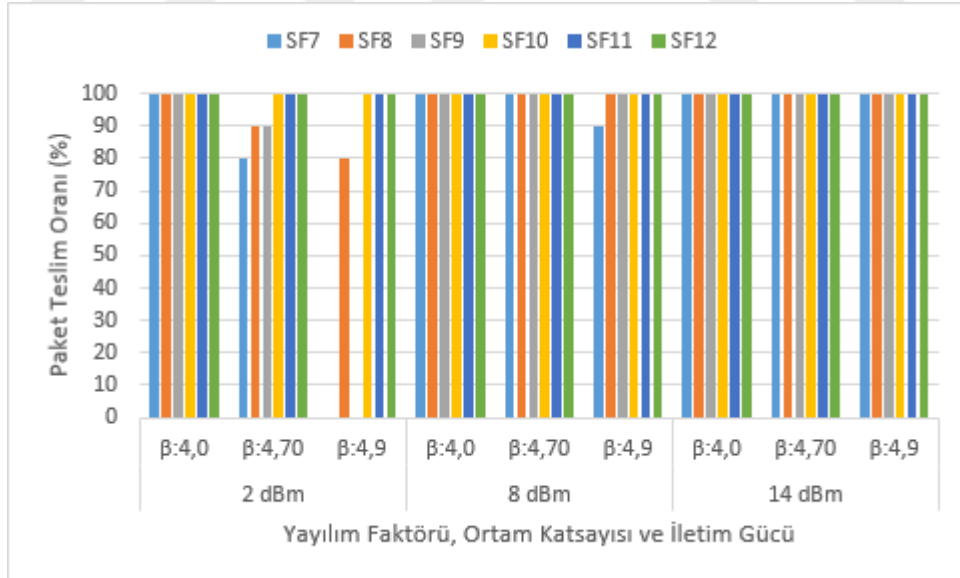
Şekil 5.2 sırasıyla 2,8 ve 14 dBm’lik iletim güçleriyle ve ortam katsayılarıyla ($\beta_1:3.0$, $\beta_2:4.8$ ve $\beta_3:5.0$) elde edilen RSSI değerlerine karşılık gelmektedir. En düşük iletim gücü olan 2 dBm’de en yüksek ortam katsayısı β_3 kullanılmasına rağmen RSSI minimum -95 ile -110 dBm aralığında olmuştur. En yüksek iletim gücü 14 dBm’de ise en yüksek RSSI aralığına en düşük ortam katsayısı ($\beta_1:3.0$) ile ulaşılmıştır. Aynı iletim gücündeki ortam katsayısında herhangi bir artışın olmasını müteakiben tüm yayılım faktörlerinin RSSI aralığının azaldığı görülmektedir. Öte taraftan, aynı ortam katsayısında iletim gücünün artması RSSI aralığını pozitif yönde arttırmaktadır.

Şekil 5.3 sırasıyla 2,8 ve 14 dBm’lik iletim güçlerinin ve ortam katsayılarının ($\beta_1:3.0$, $\beta_2:4.8$ ve $\beta_3:5.0$) kullanıldığı SNR grafiğine karşılık gelmektedir. Aynı ortam katsayılarında iletim gücü 2 dBm’den 8 veya 14 dBm’e çıktıkça herbir yayılım faktörlü sinyalin kuvvetinin de buna paralel olarak artmaktadır. Dolayısıyla iletim gücünün artmasıyla sinyalin gürültüden daha az etkilendiği bu grafikler için söylenebilir.



Şekil 5.3. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_1} (467 m) konumundaki SNR ölçümleri

Uç cihazın ağ geçidinden 1380m uzak olduğu L_{ED_2} konumu için, farklı iletim gücüne, ortam katsayısına ($\beta_1: 4.0$, $\beta_2: 4.7$ ve $\beta_3: 4.9$) ve SF'lere göre elde edilen PDR, RSSI ve SNR grafikleri sırasıyla Şekil 5.4-5-6'da verilmiştir.

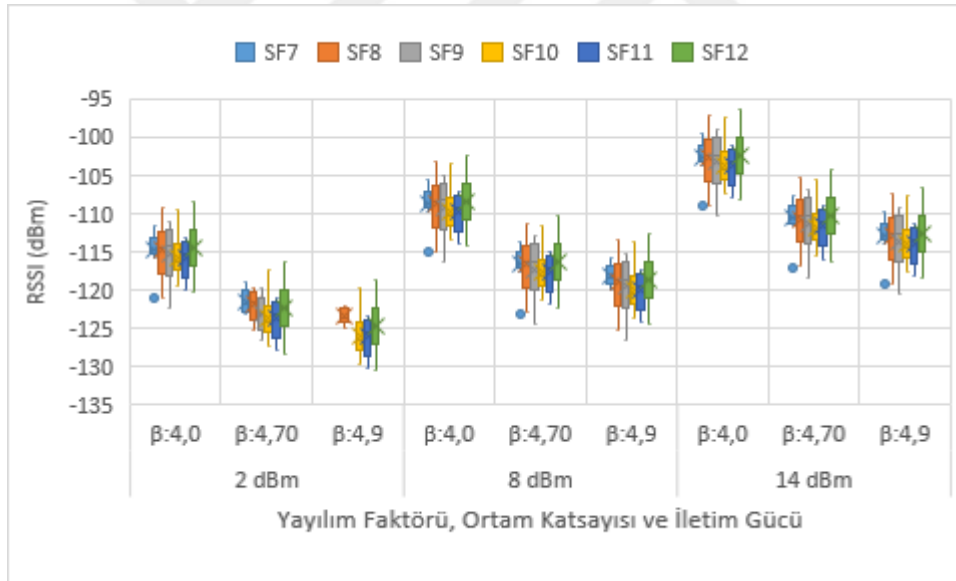


Şekil 5.4. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_2} (1380 m) konumundaki PDR ölçümleri

Şekil 5.4'te gösterilen en düşük iletim gücü olan 2 dBm'de en düşük ortam katsayısı ($\beta_1: 4.0$) ile tüm SF'ler %100'lük bir PDR başarısına sahipken $\beta_2: 4.7$ ortam katsayısında SF10, SF11 ve SF12 aynı kalırken SF7'de %20'lik, SF8 ve SF9'da %10'luk bir PDR azalışı görülmektedir. En yüksek ortam katsayısında ($\beta_3: 4.9$), SF10, SF11 ve SF12 aynı PDR başarısını sürdürürken SF8 ve

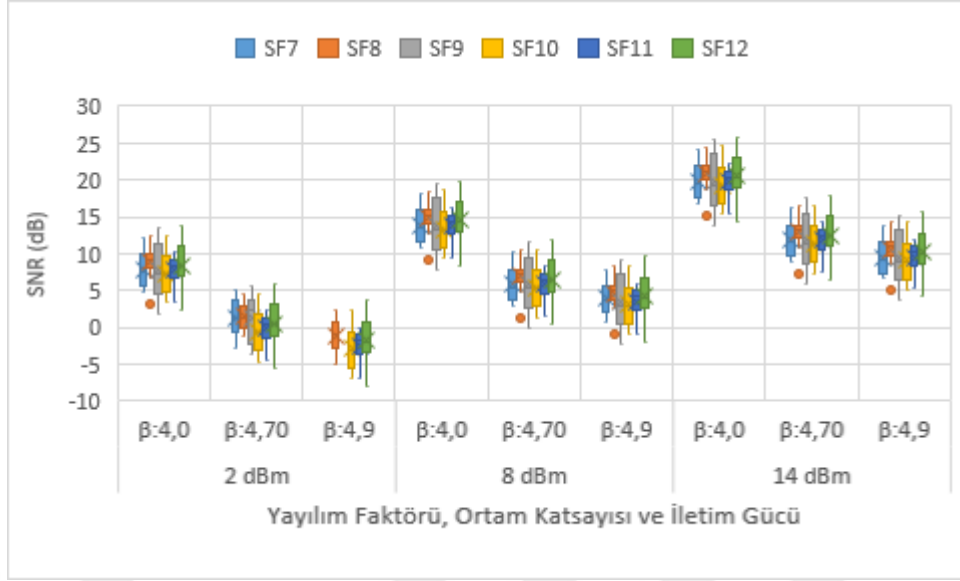
SF9 ile sinyal iletimi başarısız olmuştur ve SF8 yayılım faktörünün PDR başarısı biraz daha azalmıştır. İletim gücü 8 dBm'e çıktığında, 2dBm'e göre en düşük ortam katsayısındaki tüm yayılım faktörlerinin PDR başarısı aynı kalırken diğer ortam katsayılarında tüm SF'lerin PDR başarısı dikkate değer şekilde artmıştır. 14 dBm'de ise tüm yayılım faktörlerinde PDR %100'lük bir başarı sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, iletim gücü 2 dBm'den 8 ya da 14 dBm'e çıkmasıyla SF7, SF8 ve SF9 yayılım faktörleriyle elde edilen paket iletim oranı başarısının arttığı görülmektedir.

Şekil 5.5 sırasıyla 2,8 ve 14 dBm'lik iletim güçlerinin ve farklı ortam katsayılarının kullanıldığı RSSI grafiğine karşılık gelmektedir. Aynı ortam katsayılarında iletim gücü 2 dBm'den 8 veya 14 dBm'e çıktıkça her bir yayılım faktörlü sinyalin kuvvetinin de buna paralel olarak artmaktadır. Aksine, aynı iletim gücünde ortam katsayısının artması ise RSSI marjını negatif yönde arttırmıştır. Bu şekilde ayrıca, en düşük iletim gücünde en yüksek ortam katsayısı için SF7 ve SF9 ile paket aktarımı yapılamamışken diğer tüm SF'lerin RSSI aralığı minimum değerlere bu şartlarda ulaşmıştır.



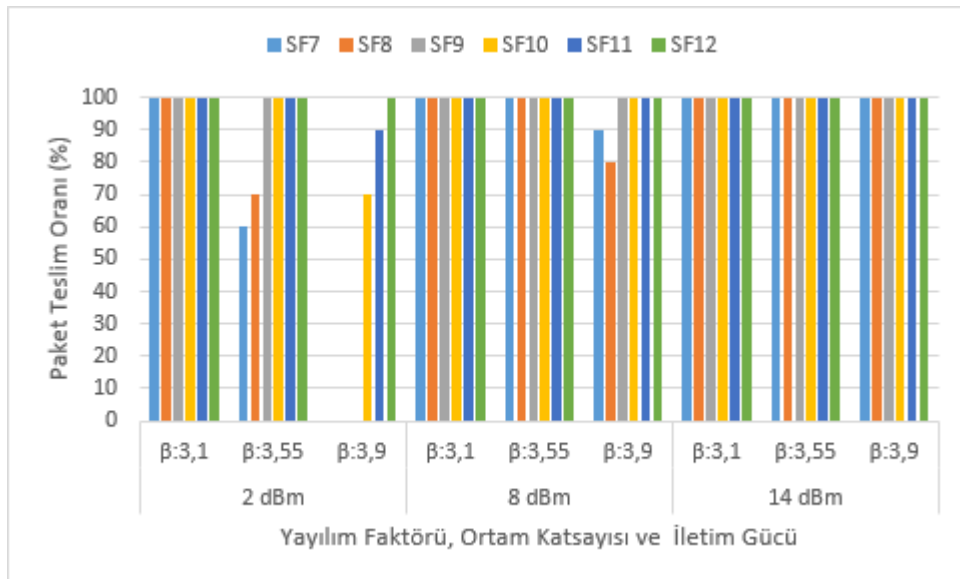
Şekil 5.5. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_2} (1380 m) konumundaki RSSI ölçümleri

Şekil 5.6'da iletim gücü 2 dBm ve ortam katsayısı maksimum iken en düşük SNR aralığına ulaşılmıştır. Aynı ortam katsayılarında iletim gücünün artması, ilgili SNR aralığını arttırmıştır. En yüksek SNR aralığına, minimum ortam katsayısı ve maksimum iletim gücünde ulaşılmıştır.

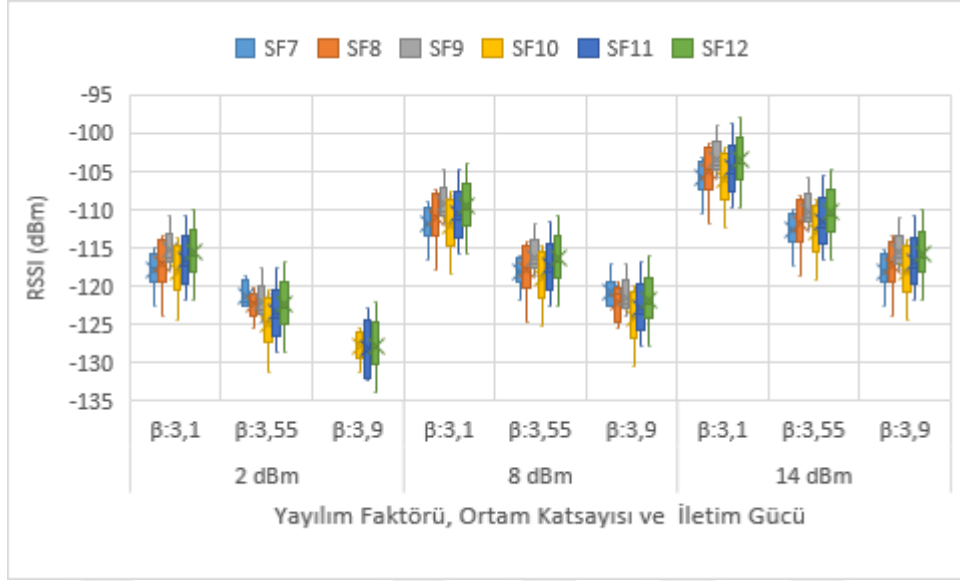


Şekil 5.6. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_2} (1380 m) konumundaki SNR ölçümleri

Uç cihazın ağ geçidinden 3270m uzak olduğu L_{ED_3} konumu için, SF'ler, ortam katsayıları ($\beta_1:3.1$, $\beta_2:3.55$ ve $\beta_3:3.9$) ve iletim güçlerine göre elde edilen PDR, RSSI ve SNR grafikleri sırasıyla Şekil 5.7-8 ve 9 'da verilmiştir. Bu konumda (Şekil 5.7'de) iletim gücü 2 dBm iken $\beta_1:3.1$ ortam katsayısı ile tüm SF'lerde %100 'lük bir PDR başarısı sağlamaktayken $\beta_2:3.55$ ortam katsayısında SF7 ile %60, SF8 ile %70 ve diğer SF'lerin hepsinde %100'lük bir PDR başarısı sağlamıştır. İletim gücü 2 dBm'den 8 veya 14 dBm'e çıkarıldığında tüm yayılım faktörlerinde dikkate değer bir PDR artışı yaşanmıştır.

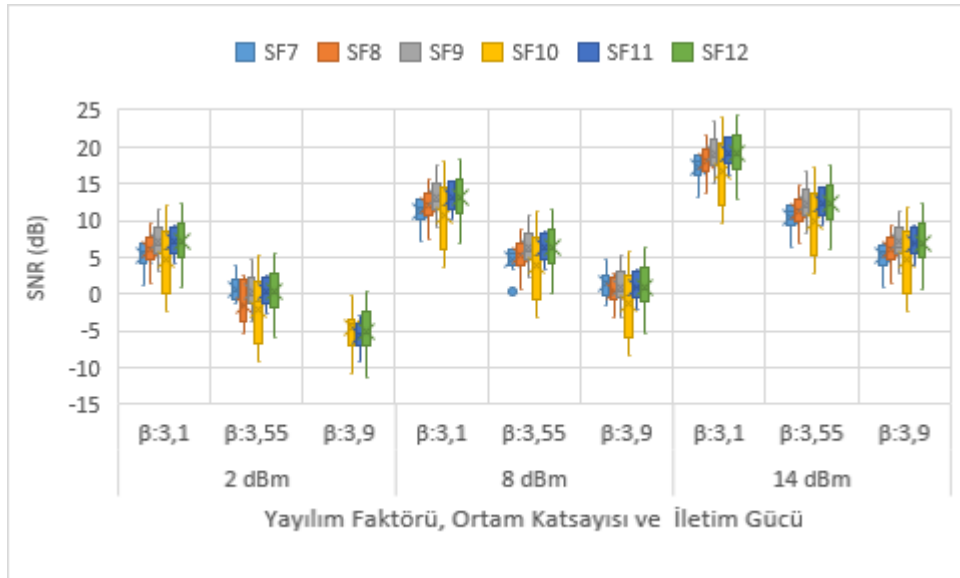


Şekil 5.7. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_3} (3270 m) konumundaki PDR ölçümleri



Şekil 5.8. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_3} (3270 m) konumundaki RSSI ölçümleri

Şekil 5.8 sırasıyla 2,8 ve 14 dBm’lik iletim güçlerinin ve farklı ortam katsayılarının ($\beta_1:3.1$, $\beta_2:3.55$ ve $\beta_3:3.9$) kullanıldığı RSSI grafiğine karşılık gelmektedir. Aynı ortam katsayılarında iletim gücü 2 dBm’den 8 veya 14 dBm’e çıktıkça her bir yayılım faktörlü sinyalin kuvvetinin de buna paralel olarak artmaktadır. Aksine, aynı iletim gücünde ortam katsayısının artması ise RSSI marjını negatif yönde arttırmıştır. Bu şekilde ayrıca, en düşük iletim gücünde en yüksek ortam katsayısı için SF7, SF8 ve SF9 ile paket aktarımı yapılamamışken diğer tüm SF’lerin RSSI aralığı -122 ile -134 dBm arasında olan minimum değerlere ulaşmıştır. Benzer bir şekilde, Şekil 5.9’da

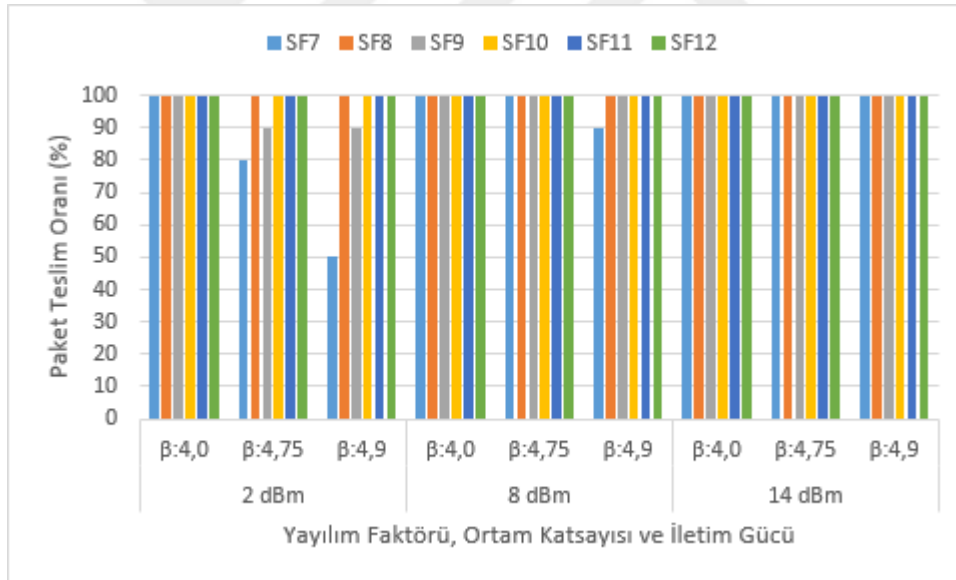


Şekil 5.9. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_3} (3270 m) konumundaki SNR ölçümleri

en düşük iletim gücünde en yüksek ortam katsayısı için SF7, SF8 ve SF9 ile paket aktarımı yapılamamışken diğer tüm SF'lerin SNR aralığı 0 ile -12 dB arasında olan minimum değerlere aynı şartlarda ulaşmıştır.

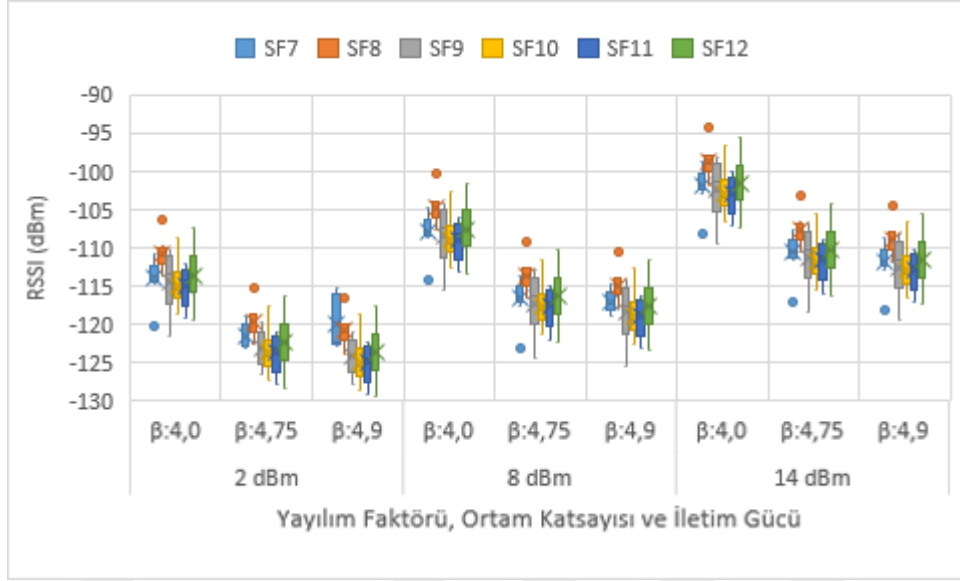
Uç cihazın ağ geçidinden 1300m uzak olduğu L_{ED_4} konumu için, farklı iletim güçlerine, ortam katsayılarına ($\beta_1:4.0$, $\beta_2:4.75$ ve $\beta_3:4.9$) ve SF'lere göre elde edilen PDR, RSSI ve SNR grafikleri sırasıyla Şekil 5.10-11 ve 12 'de verilmiştir.

Şekil 5.10'da gösterilen en düşük iletim gücü olan 2 dBm'de en düşük ortam katsayısı ($\beta_1:4.0$) ile tüm SF'ler %100'lük bir PDR başarısına sahipken $\beta_2:4.75$ ortam katsayısında SF8, SF10, SF11 ve SF12 aynı kalırken SF7'de %20'lik, SF9'da %10'luk bir PDR azalışı görülmektedir. En yüksek ortam katsayısında ($\beta_3:4.9$), SF8, SF10, SF11 ve SF12 aynı PDR başarısını sürdürürken SF7 ile PDR başarısı %50 'ye düşmüştür. İletim gücü 8 dBm'e çıktığında, 2dbm'e göre en düşük ortam katsayısındaki tüm yayılım faktörlerinin PDR başarısı aynı kalırken diğer ortam katsayılarında tüm SF'lerin PDR başarısı dikkate değer şekilde artmıştır. 14 dBm'de ise tüm ortam katsayılarında ve yayılım faktörlerinde PDR %100'lük bir başarı sağladığı görülmektedir.

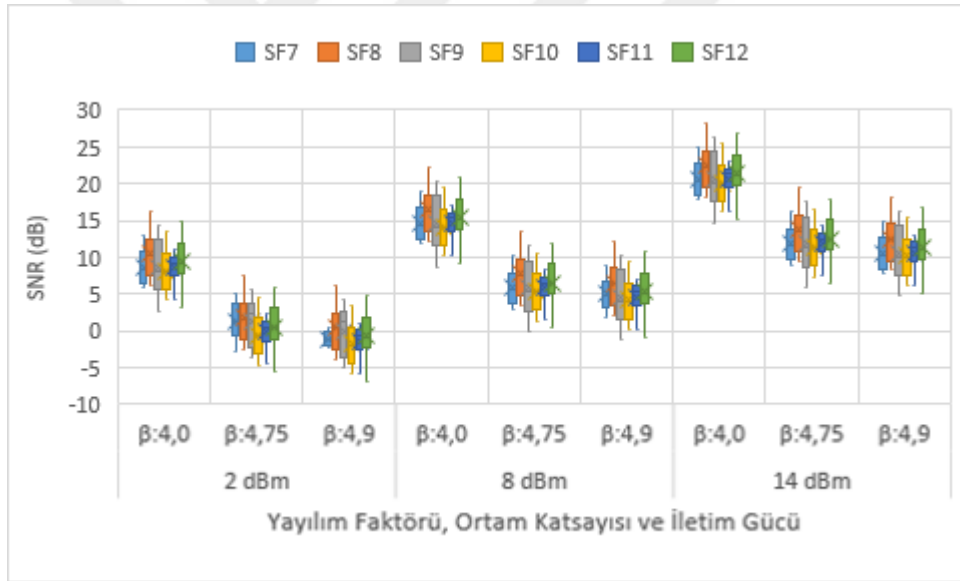


Şekil 5.10. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_4} (1300 m) konumundaki PDR ölçümleri

Şekil 5.11 sırasıyla 2, 8 ve 14 dBm'lik iletim güçlerinin ve farklı ortam katsayılarının kullanıldığı RSSI grafiğine karşılık gelmektedir. Aynı ortam katsayılarında iletim gücü 2 dBm'den 8 veya 14 dBm'e çıktıkça her bir yayılım faktörlü sinyalin kuvvetinin de buna paralel olarak artmaktadır. Aksine, aynı iletim gücünde ortam katsayısının artması ise RSSI marjını negatif yönde arttırmıştır.



Şekil 5.11. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_4} (1300 m) konumundaki RSSI ölçümleri



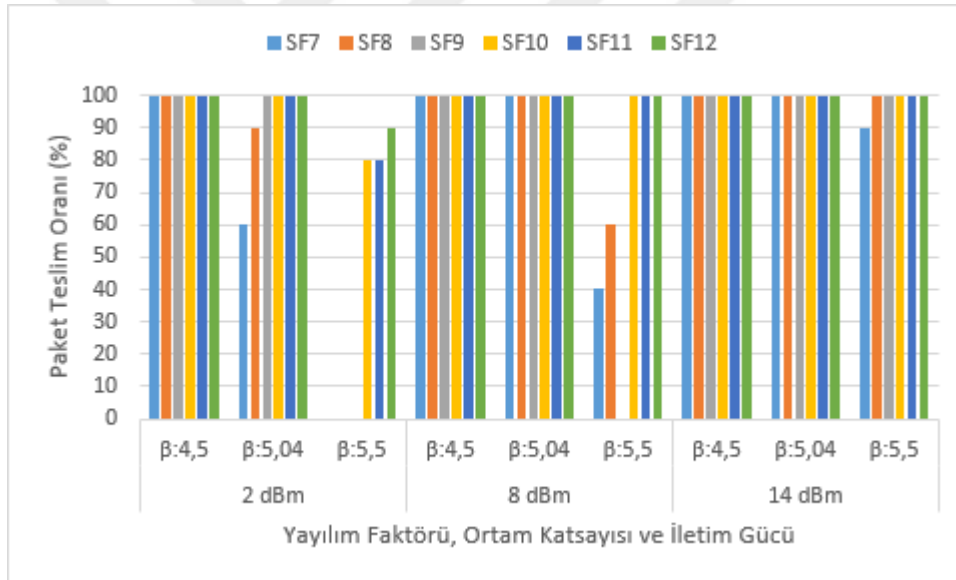
Şekil 5.12. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_4} (1300 m) konumundaki SNR ölçümleri

Şekil 5.12’de iletim gücü 2 dBm ve ortam katsayısı maksimum iken en düşük SNR aralığına ulaşılmıştır. Aynı ortam katsayılarında iletim gücünün artması, ilgili SNR aralığını arttırmıştır. En yüksek SNR aralığına, minimum ortam katsayısı ve maksimum iletim gücünde ulaşılmıştır.

5.1.2. İç Mekân Ölçüm Sonuçları

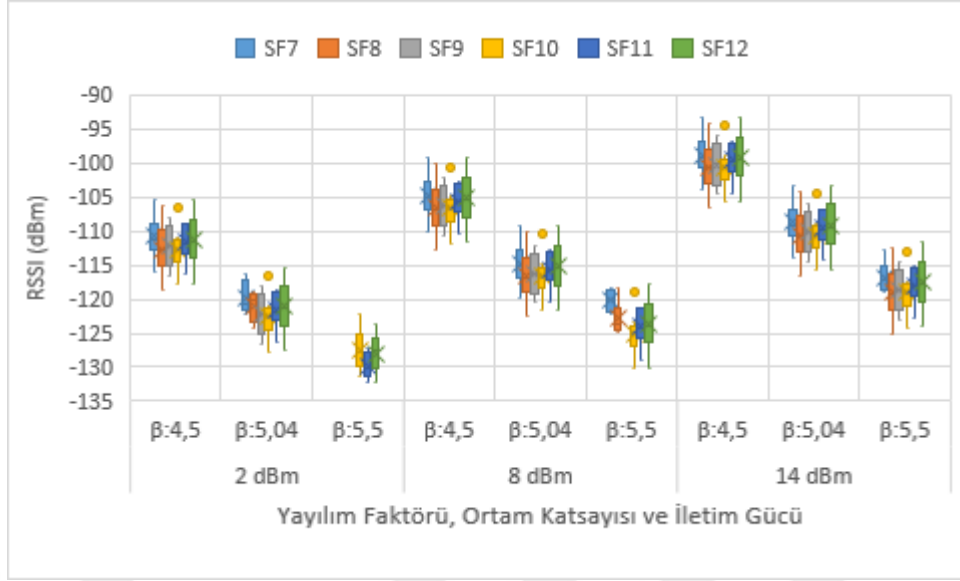
Bu alt bölümde, simülasyon uygulaması için iç mekân ölçümlerinin sonuçları paylaşılmaktadır. Uç cihazın ağ geçidinden 69m uzak olduğu L_{ED_5} konumu için, farklı iletim gücü, ortam katsayısı ve SF'lere göre elde edilen PDR, RSSI ve SNR grafikleri sırasıyla Şekil 5.13-14-15 'te verilmiştir.

Şekil 5.13 sırasıyla 2, 8 ve 14 dBm'lik iletim güçlerinin ve ortam katsayılarının ($\beta_1: 4.5$, $\beta_2: 5.04$ ve $\beta_3: 5.5$) kullanıldığı grafiklere karşılık gelmektedir. İletim gücü 2 dBm ve ortam katsayısı $\beta_1: 4.5$ iken tüm yayılım faktörleriyle yapılan haberleşme %100'lük başarıyla paket teslim oranını sağlarken ortam katsayısının artmasıyla tüm yayılım faktörlerinde paket teslim oranı azalmıştır. En düşük iletim gücünde ortam katsayısı maksimum ($\beta_3: 5.5$) olmasıyla SF7, SF8 ve SF9 ile sinyal aktarımı başarısız olmuştur. İletim gücünün 2 dBm'den 8 veya 14 dBm'e çıkarılmasıyla tüm yayılım faktörlerinin PDR başarısının arttığı saptanmıştır.



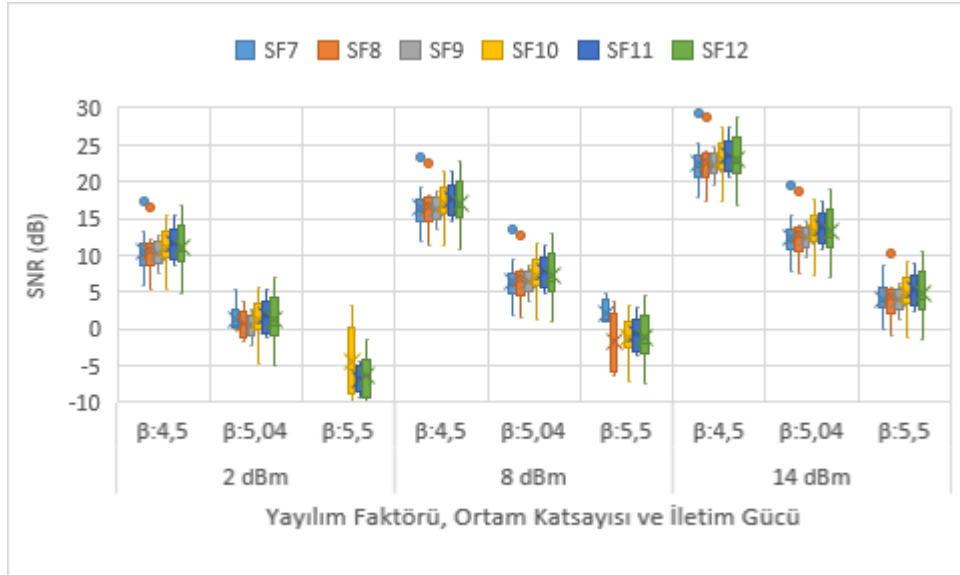
Şekil 5.13. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_5} (69 m) konumundaki PDR ölçümleri

Şekil 5.14 sırasıyla 2,8 ve 14 dBm'lik iletim güçleriyle ve ortam katsayılarıyla ($\beta_1: 4.5$, $\beta_2: 5.04$ ve $\beta_3: 5.5$) elde edilen RSSI değerlerine karşılık gelmektedir. En düşük iletim gücü olan 2 dBm'de en yüksek ortam katsayısı β_3 kullanılmasıyla RSSI minimum değerlerini -122 ile -132 dBm aralığında almıştır. En yüksek iletim gücü 14 dBm'de ise en yüksek RSSI aralığına en düşük ortam katsayısı ($\beta_1: 4.5$) ile ulaşılmıştır. Aynı iletim gücündeki ortam katsayısında herhangi bir artışın olmasını müteakiben tüm yayılım faktörlerinin RSSI aralığının azaldığı görülmektedir. Öte taraftan, aynı ortam katsayısında iletim gücünün artması RSSI aralığını pozitif yönde arttırmaktadır.



Şekil 5.14. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_5} (69 m) konumundaki RSSI ölçümleri

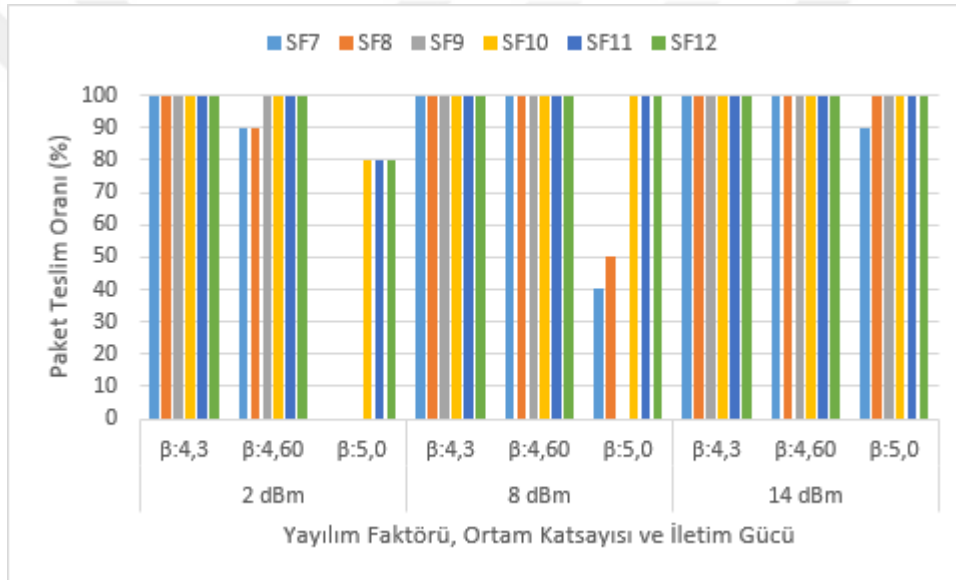
Şekil 5.15 sırasıyla 2,8 ve 14 dBm’lik iletim güçlerinin ve ortam katsayılarının ($\beta_1:4.5$, $\beta_2:5.04$ ve $\beta_3:5.5$) kullanıldığı SNR grafiğine karşılık gelmektedir. Aynı ortam katsayılarında iletim gücü 2 dBm’den 8 veya 14 dBm’e çıktıkça herbir yayılım faktörlü sinyalin kuvvetinin de buna paralel olarak artmaktadır. Dolayısıyla iletim gücünün artmasıyla sinyalin gürültüden daha az etkilendiği bu grafikler için söylenebilir.



Şekil 5.15. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_5} (69 m) konumundaki SNR ölçümleri

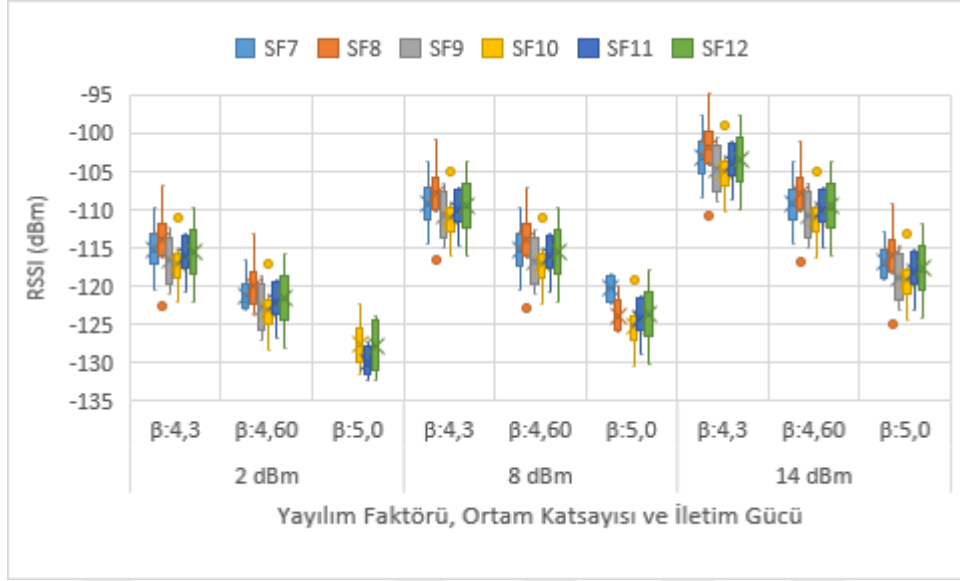
Uç cihazın ağ geçidinden 106m uzak olduğu L_{ED_6} konumu için, farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre elde edilen PDR, RSSI ve SNR grafikleri sırasıyla Şekil 5.16-17 ve 18'de verilmiştir.

Şekil 5.16 sırasıyla 2, 8 ve 14 dBm'lik iletim güçlerinin ve ortam katsayılarının ($\beta_1:4.3$, $\beta_2:4.6$ ve $\beta_3:5.0$) kullanıldığı grafiklere karşılık gelmektedir. İletim gücü 2 dBm ve ortam katsayısı $\beta_1:4.3$ iken tüm yayılım faktörleriyle yapılan haberleşme %100'lük başarıyla paket teslim oranını sağlarken ortam katsayısının artmasıyla tüm yayılım faktörlerinde paket teslim oranı azalmıştır. En düşük iletim gücünde ortam katsayısı maksimum ($\beta_3:5.0$) olmasıyla SF7, SF8 ve SF9 ile sinyal aktarımı başarısız olmuştur. İletim gücünün 2 dBm'den 8 veya 14 dBm'e çıkarılmasıyla tüm yayılım faktörlerinin PDR başarısının arttığı görülmektedir.

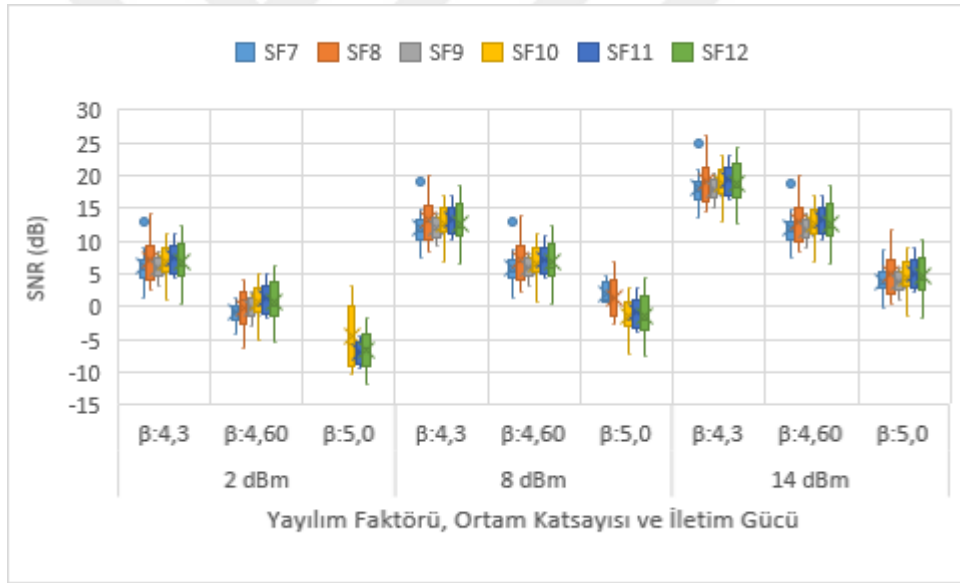


Şekil 5.16. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_6} (106 m) konumundaki PDR ölçümleri

Şekil 5.17 sırasıyla 2, 8 ve 14 dBm'lik iletim güçleriyle ve ortam katsayılarıyla ($\beta_1:4.3$, $\beta_2:4.6$ ve $\beta_3:5.0$) elde edilen RSSI değerlerine karşılık gelmektedir. En düşük iletim gücü olan 2 dBm'de en yüksek ortam katsayısı β_3 kullanılmasıyla RSSI minimum değerlerini -122 ile -133 dBm aralığında almıştır. En yüksek iletim gücü 14 dBm'de ise en yüksek RSSI aralığına en düşük ortam katsayısı (β_1) ile ulaşılmıştır. Aynı iletim gücündeki ortam katsayısında herhangi bir artışın olmasını müteakiben tüm yayılım faktörlerinin RSSI aralığının azaldığı görülmektedir. Öte taraftan, aynı ortam katsayısında iletim gücünün artması RSSI aralığını pozitif yönde arttırmaktadır.



Şekil 5.17. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_6} (106 m) konumundaki RSSI ölçümleri



Şekil 5.18. Farklı SF, ortam katsayısı ve iletim güçlerine göre L_{ED_6} (106 m) konumundaki SNR ölçümleri

Şekil 5.18 sırasıyla 2,8 ve 14 dBm'lik iletim güçlerinin ve ortam katsayılarının ($\beta_1:4.3$, $\beta_2:4.6$ ve $\beta_3:5.0$) kullanıldığı SNR grafiğine karşılık gelmektedir. Aynı ortam katsayılarında iletim gücü 2 dBm'den 8 veya 14 dBm'e çıktıkça her bir yayılım faktörlü sinyalin kuvvetinin de buna paralel olarak artmaktadır. Dolayısıyla iletim gücünün artmasıyla sinyalin gürültüden daha az etkilendiği bu grafikler için söylenebilir.

Bu simülasyon uygulamasında da fiziksel uygulamaya benzer olarak; modellenen LoRa düğümlerinin iç ve dış mekân performansının mesafe üzerindeki etkisine odaklanılmaktadır.

Performans değerlendirmek için PDR, RSSI ve SNR gibi ölçütler kullanılmıştır. Simülasyon testleri her bir yayılım faktörü, ortam katsayısı ve iletim gücü için ayrı ayrı yapıldı.

Dış mekân test sonuçlarında en iyi paket teslim oranı, alınan sinyal gücü göstergesi ve sinyal gürültü oranı, alıcının 467m mesafede bulunduğu konumdur. Bu konumda 2, 8 ve 14 dBm iletim güçleri, ortam katsayılarının tümünde ve tüm yayılım faktörlerinin hepsinde %100'lük bir PDR başarısı sağlanmıştır. Alınan paketlerin RSSI değerlerinin yaklaşık olarak -70 ile -110 dBm aralığında olmasıyla ve SNR değerlerinde yaklaşık olarak 55 ile 10 dB arasında pozitif değerlere sahip olmasıyla da en iyi değerler bu konumda elde edilmiştir. Dış mekân test sonuçlarında en kötü paket teslim oranı, alınan sinyal gücü göstergesi ve sinyal gürültü oranı, alıcının 3270m uzaklıkta bulunduğu konumda gerçekleşmiştir. Bu konumda iletim gücü 2 dBm ve ortam katsayısı 3.9 iken SF7, SF8 ve SF9 yayılım faktörleriyle sinyal iletimi sağlanamamıştır. Bu konumdaki en iyi PDR, 14 dBm iletim gücünde, tüm yayılım faktörleri için %100'lük bir başarıyla gerçekleşmiştir. Alınan paketlerin RSSI değerleri yaklaşık olarak -97 ile -134 dBm aralığında olmasıyla ve SNR değerlerinde yaklaşık olarak 25 ile -12 dB arasında olmasıyla da en kötü değerler bu konumda elde edilmiştir.

İç mekân test sonuçlarında alıcının 69 m uzaklıkta bulunduğu konumda 2 dBm'lik iletim gücü ve 5.5'lik ortam katsayısı en düşük PDR elde edilirken SF7, SF8 ve SF9 yayılım faktörleri ile paket aktarımı başarısız olmuştur. Bu konumda iletim gücünün artması ile yayılım faktörlerinin PDR başarısının arttığı, 5.04 ve 5.5 ortam katsayılarında görülmüştür. RSSI'nın en az olduğu aralık -122 ile -132 dBm iken bu değerlere 2 dBm ve 5.5 ortam katsayısı ile ulaşılmıştır. En yüksek RSSI aralığı -93 ile -107 dBm arasında iken bu değerlere 14 dBm ve 4.5 ortam katsayısı ile ulaşılmıştır. Benzer şekilde, en yüksek SNR aralığı 14 dBm ve 4.5 ortam katsayısı ile ulaşılırken en düşük SNR değerlerine 2 dBm ve 5.5 ortam katsayısı ile ulaşılmıştır. Alıcının 106 m uzaklıkta bulunduğu konumda en yüksek PDR başarısı tüm iletim güçlerinde 4.3 ortam katsayısı ile sağlanırken en düşük PDR başarısı tüm iletim güçleri için 5.0 ortam katsayısı ile sağlanmıştır. En düşük iletim gücü olan 2 dBm'de en yüksek ortam katsayısı (5.0) kullanılmasıyla RSSI minimum değerlerini -122 ile -133 dBm aralığında almıştır. En yüksek iletim gücü 14 dBm'de ise en yüksek RSSI aralığına (-95 ile -110 dBm) en düşük ortam katsayısı (4.3) ile ulaşılmıştır. Benzer şekilde, en yüksek SNR değerlerine 14 dBm ve 4.3 ortam katsayısı ile en düşük SNR değerlerine ise 2 dBm ve 5.0 ortam katsayısı ile ulaşılmıştır.

Simülasyon test sonuçlarından iletim gücü, ortam katsayısı ve yayılım faktörlerinin paket teslim oranına etkisi doğrudan bu uygulama sayesinde gözlemlenebilmiştir. Hem iç mekân hem de dış mekân test sonuçlarında iletim gücünün artmasıyla tüm yayılım faktörleri için PDR, RSSI ve SNR değerlerinin de paralel olarak arttığı saptanmıştır. Propagasyon modeli için kullanılan ortam katsayısının artmasıyla PDR, RSSI ve SNR değerleri olumsuz yönde düştüğü ve ortam katsayısının

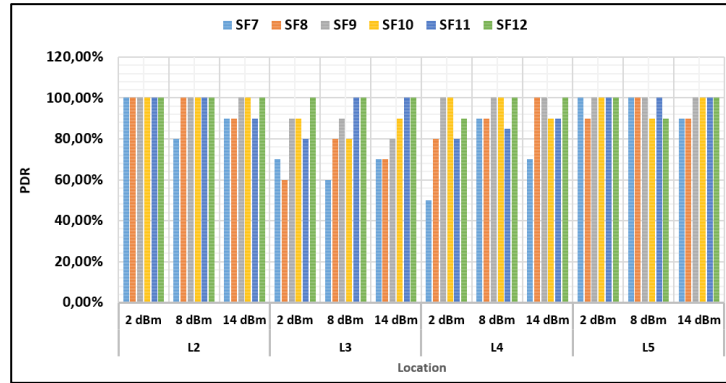
azalmasıyla da bu değerlerin pozitif yönde arttığı gözlemlenmiştir. Yayılm faktörünün artmasıyla (örn.: SF8'den SF10'a çıkması) sinyalin gürültüye daha bağışıklı hâle geldiği de belirlenmiştir.

5.2. Gerçek Uygulamanın Sonuçları

Bu alt bölümde fiziksel/gerçek uygulamanın paket teslim oranı, alınan sinyal gücü göstergesi ve sinyal gürültü oranı gibi performans ölçütlerine göre dış mekân ve iç mekân ölçüm sonuçları verilmektedir.

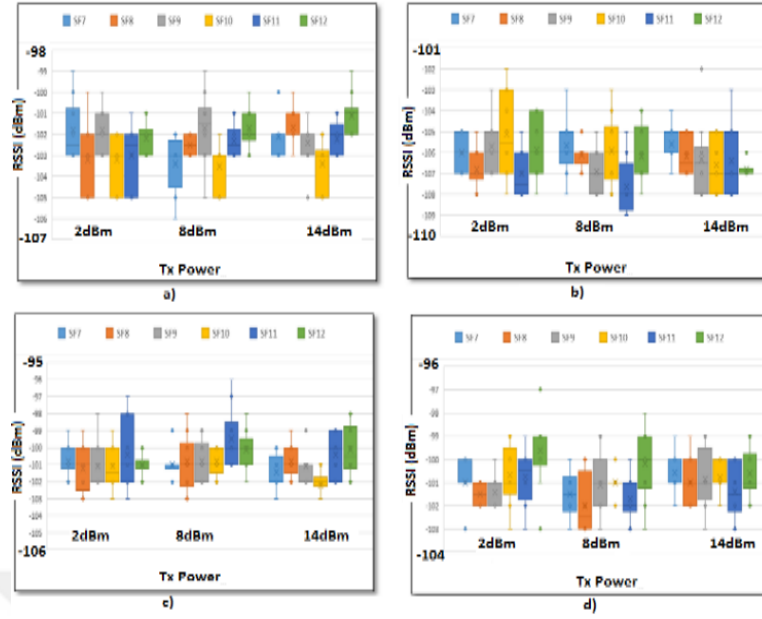
5.2.1. Dış Mekân Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde, dış mekân ölçümlerinin sonuçları paylaşılmaktadır. Her ölçüm noktası/konumu için, farklı iletim gücüne ve SF'lere göre elde edilen PDR değerleri, Şekil 5.19 'da verilmiştir [65]. Elde edilen sonuçlara göre, en iyi PDR bulunan yerler L2 ve L5'tir. L2, üniversite kampüsü içinde ve en yakın ölçüm noktasıdır. L2'nin Fresnel bölgesi, kısmen ağaçlar içerir. Öte yandan, L5 kentsel bir alanda ve GW'ye 1,38 km uzaklıktadır. Bunun yanı sıra, bu nokta için boş alana sahip değildir. Buna rağmen, L2 ve L5'teki ortalama PDR 'ler %90'ın üzerindedir. En uzak nokta, aynı zamanda iyi bir Fresnel bölgesine sahip olan L4'tür (Gülmez Tepesi-3.27km). Bu bölgede, PDR performansı, düşük SF'ler için iyi değildir. Örneğin, en kötü PDR değeri % 50'dir ve bu ölçüm 2dBm iletim gücü ve SF7 için elde edilmiştir.



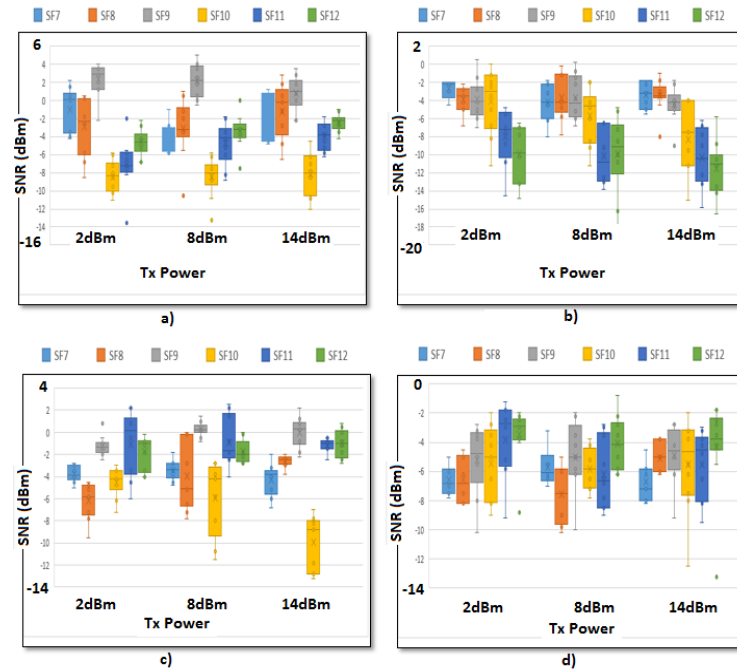
Şekil 5.19. Farklı iletim gücü ve SF'lere göre dış mekân PDR ölçümleri

Öte yandan, PDR performansı, yüksek SF değerlerinde önemli ölçüde artmış ve ortalama PDR performansı %90'a ulaşmıştır. Öte yandan, L3 rekreasyon alanından elde edilen PDR'ler daha düşüktür. Her ne kadar PDR performansı, yüksek SF'lerde %100'e ulaşmış olsa da, ortalama PDR performansı iyi değildir. Bunun nedeni, GW ile bu nokta arasında oldukça çok ağaçlık ve yüksek binalar bulunduğundan ortalama PDR performansını olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 5.20. Farklı iletim gücü ve SF'lere göre dış mekân RSSI ölçümleri

Dış mekân testlerinde başarılı paketlerden elde edilen RSSI değerlerinin IQR grafikleri, Şekil 5.20 'de verilmiştir [65]. Elde edilen sonuçlara göre, en iyi RSSI değeri -97 iken, en düşük RSSI değeri -109 dBm'dir. Ortalama IQR değerleri 101 ile 104 dBm arasında değişmiştir. Burada, en uzak konum olan L4'ten (Gülmez Tepesi'nden) elde edilen ortalama RSSI değeri -102 dBm'dir. Bu değer neredeyse diğer konumlarla aynıdır.

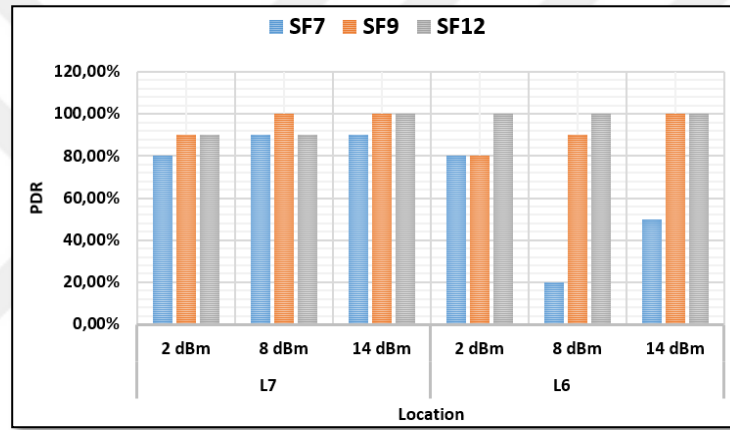


Şekil 5.21. Farklı iletim gücü ve SF'lere göre dış mekân SNR ölçümleri

Dış mekan testlerinde ölçülen son parametre, başarılı paketlerin SNR değerleridir. L2, L3, L4 ve L5 konumlarında yapılan ölçümlerin IQR grafikleri sırasıyla Şekil 5.21-a-d 'de verilmiştir [65]. Burada ölçülen en düşük SNR -12 dBm iken, en büyük SNR 5 dBm 'dir. En yüksek SNR değerleri L2'den elde edilmiştir.

5.2.2. İç Mekân Ölçüm Sonuçları

İç mekân ölçümleri hem bölüm binasında hemde bir yeraltı tüneline yapıldı. Değerlendirme parametreleri dış mekan ölçümleriyle aynıdır. Bölüm binasındaki ölçümler iki noktada yapılmıştır. Birincisi, 3. kat WSN laboratuvarı L6 (kapalı alan), ikincisi ise GW'den en uzak nokta olan L7 zemin kat konumudur. Bölüm binası için PDR ölçümleri Şekil 5.22 'de verilmiştir [65].

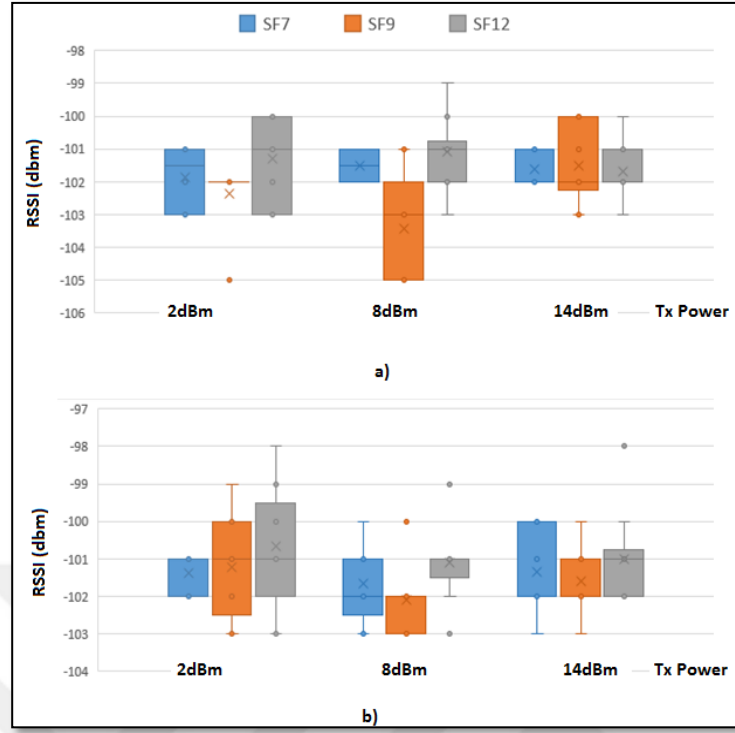


Şekil 5.22. L6 ve L7 iç mekân konumu için PDR ölçümleri

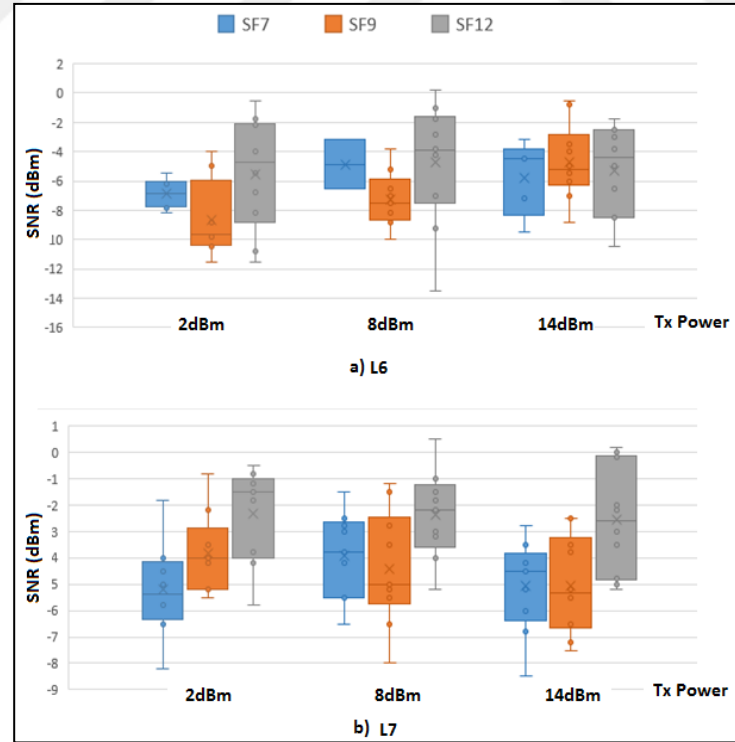
Şekil 5.22, düşük SF'ler için laboratuvar PDR değerlerinin iyi olmadığını göstermektedir. Öte yandan, yüksek SF'ler için ortalama PDR artmıştır. Ortalama PDR %90'ın üzerindedir. Laboratuvarın birçok engel içeren kapalı bir ortam olduğu göz önüne alındığında, yüksek SF'lerin karmaşık iç mekân ortamları için verimliliği arttırdığı görülebilir.

Benzer durum L7 konumu için de gözlemlenmiştir. Burada, yüksek SF'lere ek olarak, yüksek iletim gücü değerleri de performans artışında rol oynamıştır.

İlgili konumlar için başarılı paketlerden elde edilen RSSI ölçüm sonuçları, Şekil 5.23-a-b 'de sunulmuştur [65]. Ortalama RSSI değerleri -100 ila -102 dBm arasındadır. Dış mekan ölçümlerine benzer olarak, RSSI değerlerinin ayırt edici bir özellik göstermediği görülmektedir. Bu konumlar için SNR değerleri, Şekil 5.24 -a-b'de verilmiştir. Elde edilen SNR değerlerinin neredeyse tamamı 0 dBm'nin altında ölçülmüştür.



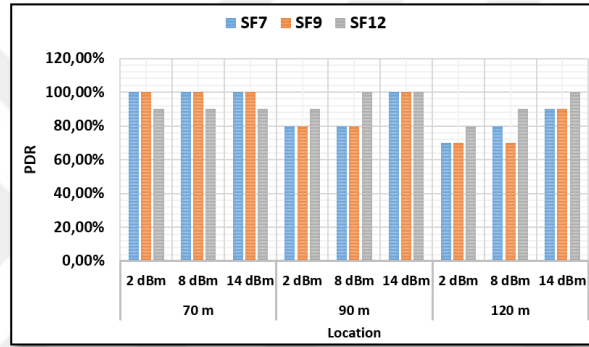
Şekil 5.23. L6 ve L7 iç mekân konumu için RSSI ölçümleri



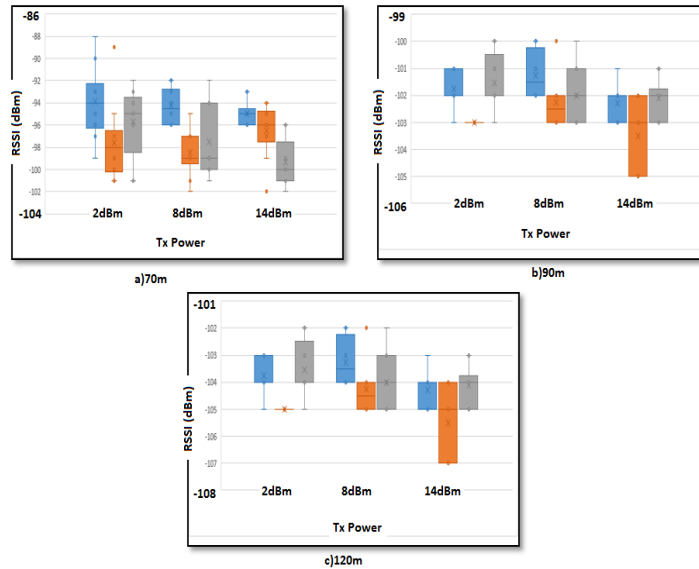
Şekil 5.24. L6 ve L7 iç mekân konumu için SNR ölçümleri

İç mekan ölçümleri için son konum yer altı tüneli ortamıdır. Tünel dar kesitlidir ve birçok tesisat engelini içerir. Ölçüm noktaları GW'den 70m, 90m ve 120 m uzaklıktadır. Ne yazık ki,

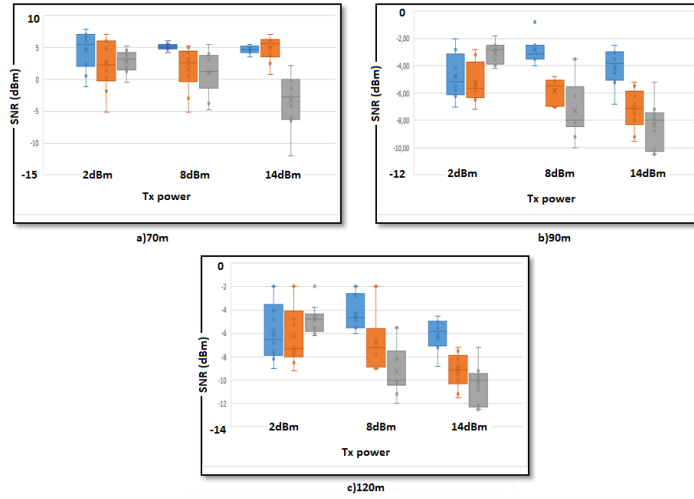
tüneldeki mevcut koşullar başka mesafelerde ölçüm yapılmasına izin vermedi. Ölçüm noktalarından elde edilen PDR değerleri, Şekil 5.25 'te sunulmuştur. Tünel sonuçları, yüksek SF ve iletim gücü (Tx power) değerlerinin PDR performansını artırdığını göstermektedir. Ölçülebilen son nokta 120m olsa da, bu tür yeraltı tüneli ortamlarında daha uzak noktalarda daha yüksek PDR değerlerinin elde edilebileceği tahmin edilmektedir. Bu daha ayrıntılı çalışmalar ile öğrenilecektir. LoRa'nın başarısı hakkında fikir vermek için, aynı tünelde [66] 2.4 GHz'de gerçekleştirilen başka bir çalışma karşılaştırma için gösterilebilir. İlgili çalışmada, en az başarılı ölçüm mesafesi 41,5m'dir. Frekans farkı ve teknoloji arka planı, doğru bir karşılaştırma için dikkate alınmakla birlikte, LoRa'nın bu tür ortamlarda başarılı performanslar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu noktalar için başarılı paket RSSI ölçüm değerleri, Şekil 5.26 a-c'de verilmiştir [65].



Şekil 5.25. Tünel için PDR ölçümleri



Şekil 5.26. Tünel için RSSI ölçümleri



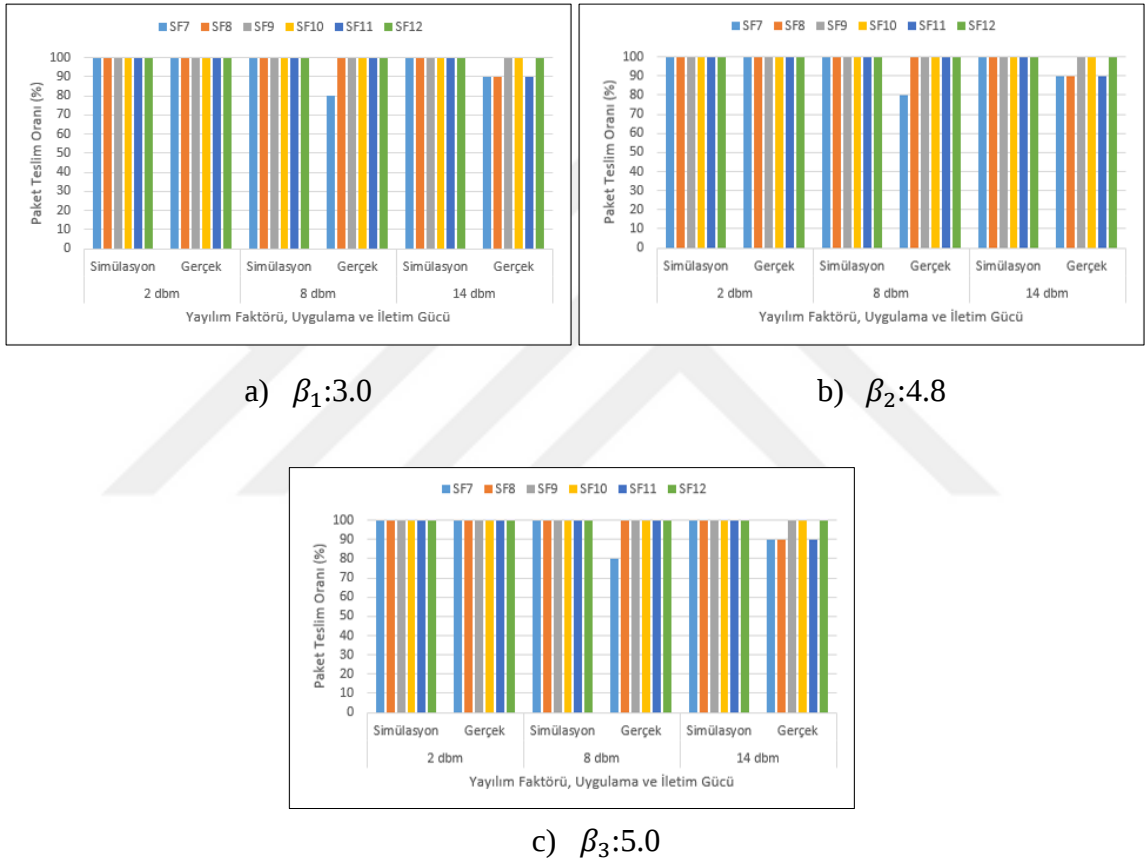
Şekil 5.27. Tünel için SNR ölçümleri

Ölçümlerde elde edilen SNR değerleri, Şekil 5.27 'de sunulmuştur. 70m'de, paketlerin %70 'inden fazlasının sıfırdan yüksek bir SNR değeri vardır. Diğer taraftan, 90m ve 120m için tüm değerler 0 dBm 'nin altında ölçülmüştür. Diğer taraftan, yakın ölçüm noktalarındaki, pozitif SNR değerlerinin yüzdesi yüksek olmasına rağmen, RSSI ve SNR'nin ayırt edici bir özelliğe sahip olduğu gözlenmiştir.

Gerçek/Fiziksel uygulamada, farklı ortamlar için LoRa teknolojisinin iç ve dış mekan performansına odaklanılmaktadır. Değerlendirme parametreleri olarak PDR, RSSI ve SNR dikkate alınmıştır. Ölçümler, farklı SF ve iletim gücü değerleri için ayrı ayrı yapıldı. Dış ortam olarak beş farklı ölçüm yeri seçildi. Başarılı bir ölçüm yapan en uzak yer Gülmez Tepesi oldu. Bu konum GW'den 3.27 km uzaktaydı ve iyi bir Fresnel Bölgesi sahipti. Öte yandan, diğer dış mekanlarda iyi bir Fresnel Bölgesi yoktu. Bu konumlarda, yüksek PDR değerleri yalnızca yüksek SF ve yüksek iletim gücüyle gözlenebilir. İç mekan testleri, beş katlı bölüm binasında ve bir yeraltı tüneline yapılmıştır. İç mekan ölçümlerinde PDR performansları, düşük SF'ler için iyi değildir. Ancak, yüksek SF ve iletim gücünün uzak noktalarda PDR değerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, tünel ölçümleri, LoRa teknolojisinin bu tür zorlu ortamlarda etkili bir şekilde kullanılabileceğine dair bir ipucu veriyor. Diğer taraftan, RSSI ve SNR'nin hem iç hem de dış mekan gözlemlerinde ayırt edici bir özelliğe sahip olmadığı görülmüştür.

5.3. Simülasyon ve Gerçek Uygulamanın Analizi

Bu alt bölümde gerçekleştirilen LoRaWAN simülasyon ve fiziksel/gerçek uygulamalarından elde edilen PDR, RSSI ve SNR performans kriterlerinin analizi yapılacaktır. Her iki uygulamada da ağ geçidi ile uç cihaz arasındaki mesafelerden biri 467 m ve diğeri 1300 m olmak üzere aynıdır ve bu iki uzaklık/konum üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Bununla birlikte, aktarılan paket sayısı da her bir senaryo için 10 tane olmak üzere aynıdır. Değerlendirmeler aynı uzaklıklar, iletim gücü, ortam katsayısı ve yayılım faktörleri üzerinden yapılmaktadır.

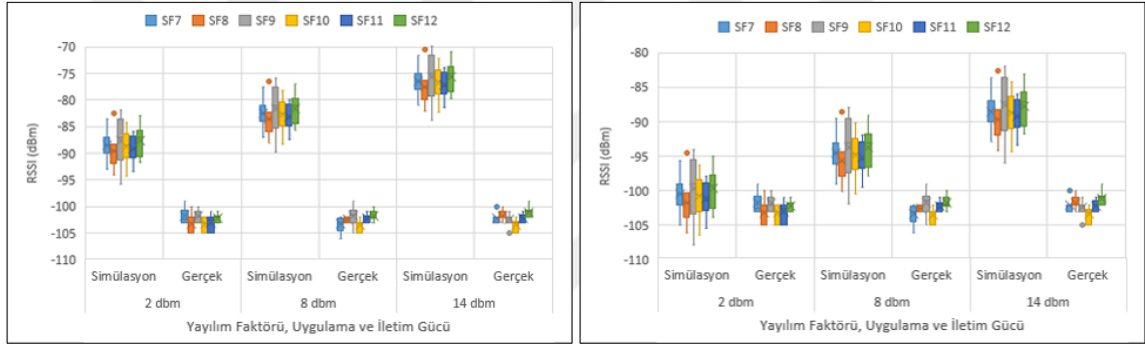


Şekil 5.28. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 467m deki konum için PDR'nın kıyaslaması

Uç cihazın ağ geçidinden 467m uzaklıkta bulunduğu konum için farklı iletim gücü, ortam katsayısı ($\beta_1:3.0, \beta_2:4.8$ ve $\beta_3:5.0$) ve yayılım faktörlerinin PDR, RSSI ve SNR üzerindeki etkisini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 5.28-29 ve 30'da verilmiştir. Şekil 5.28-a,b ve c'deki simülasyon uygulamasında farklı ortam katsayıları kullanılmasına ve en büyük ortam katsayısı (β_3) verilmesine rağmen hepsinde PDR başarısı %100 olmuştur. Dolayısıyla, herhangi bir ortam katsayısı gözetilmeksizin 2 dBm iletim gücüyle simülasyon ve gerçek/fiziksel uygulamada tüm SF'ler ile %100'lük bir başarı sağlanmaktadır. 8 dBm iletim gücünde gerçek uygulama simülasyon

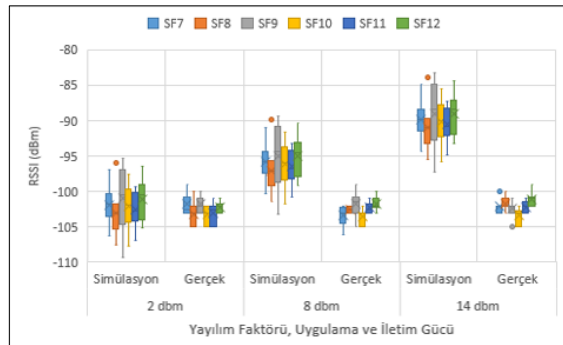
uygulamasına göre SF7 yayılım faktörü ile %20'lik daha düşük bir paket teslim oranı başarısı sağlanırken 14 dBm'de SF7, SF8 ve SF11 yayılım faktörlerinde de %10'luk bir azalma görülmektedir.

Şekil 5.29'da verilen RSSI kıyaslamasına göre 467 m için simülasyon uygulamasında ortam katsayısı arttıkça tüm iletim güçlerinde tüm yayılım faktörleriyle gerçek uygulamaya en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, simülasyon uygulamasında β_1 ortam katsayısıyla elde edilen RSSI aralığı -70 ile -96 dBm, β_2 'de bu aralık -82 ile -108 dBm ve β_3 'de bu aralık -83 ile -109 arasındayken gerçek uygulamada bu aralık -98 ile -107 arasında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, gerçek uygulamaya en yakın RSSI aralığı β_3 ortam katsayılı simülasyon uygulaması olmaktadır. Ayrıca simülasyon uygulamasında iletim gücüne göre RSSI değerlerinde düzenli bir artış pozitif yönde olmaktadır.



a) $\beta_1:3.0$

b) $\beta_2:4.8$

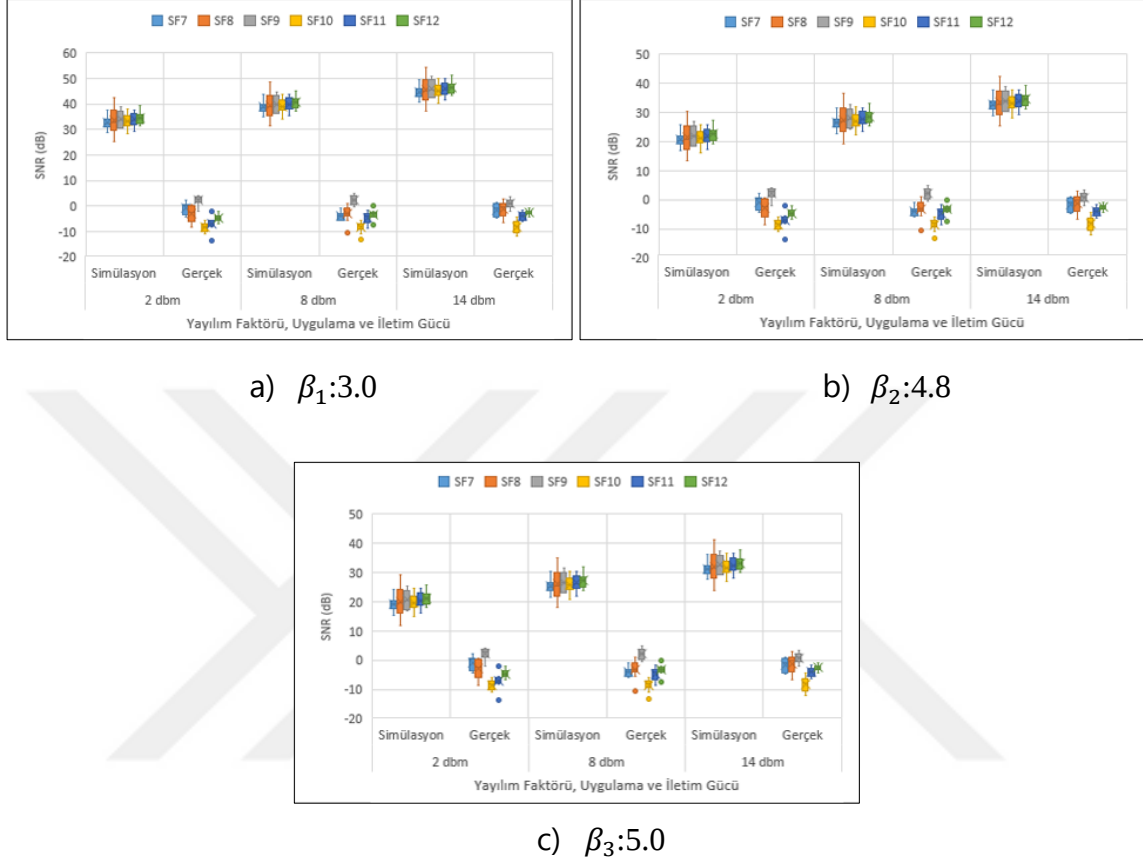


c) $\beta_3:5.0$

Şekil 5.29. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 467m deki konum için RSSI kıyaslaması

Şekil 5.30'da verilen SNR kıyaslamaları da RSSI kıyaslamasına benzer olmakla birlikte; simülasyon uygulamasında ortam katsayısı arttıkça tüm iletim güçlerinde tüm yayılım faktörleriyle gerçek uygulamaya en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla, gerçek uygulamaya en yakın

RSSI aralığı β_3 ortam katsayılı simülasyon uygulaması olmaktadır. Ayrıca simülasyon uygulamasında iletim gücüne göre SNR değerlerinde düzenli bir artış pozitif yönde olmaktadır.

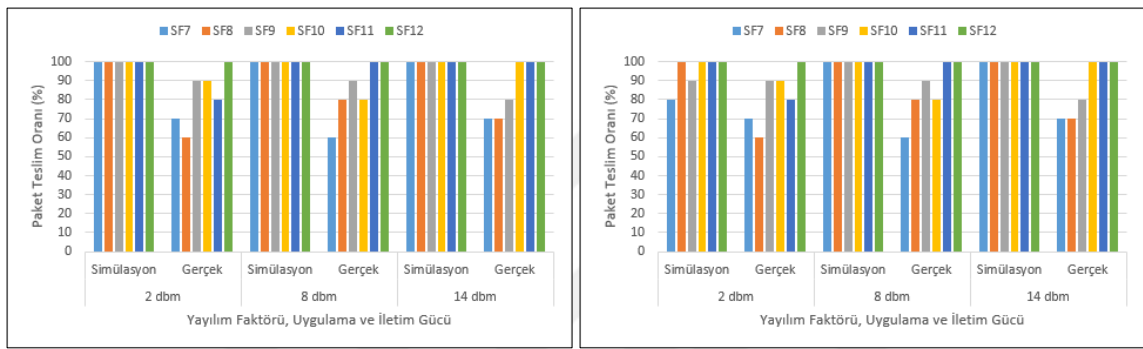


Şekil 5.30. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 467m deki konum için SNR kıyaslaması

Uç cihazın ağ geçidinden 1300m uzaklıkta bulunduğu konum için farklı iletim gücü, ortam katsayısı ($\beta_1:4.0, \beta_2:4.75$ ve $\beta_3:4.9$) ve yayılım faktörlerinin PDR, RSSI ve SNR üzerindeki etkisini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 5.31-32 ve 33'te verilmiştir. Şekil 5.31-a,b ve c'deki simülasyon uygulamasında farklı ortam katsayılarındaki ortalama PDR başarıları; β_1 'de %100, β_2 'de %98.3, β_3 'de %96.1 iken gerçek uygulamadaki ortalama PDR başarıları %84.4 olmuştur. Dolayısıyla, gerçek uygulamaya en yakın benzerlik oranı β_3 ortam katsayılı simülasyon uygulamasıdır (Şekil 5.31-c).

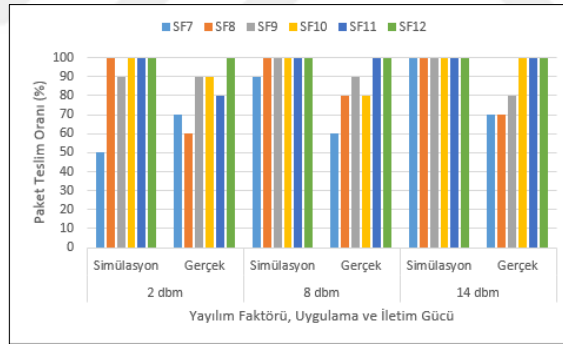
Şekil 5.32'de verilen RSSI kıyaslamasına göre 1300 m için simülasyon uygulamasında ortam katsayısı arttıkça tüm iletim güçlerinde tüm yayılım faktörleriyle gerçek uygulamaya en uzak sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, simülasyon uygulamasında β_1 ortam katsayısıyla elde edilen RSSI aralığı -96 ile -122 dBm, β_2 'de bu aralık -104 ile -128 dBm ve β_3 'de bu aralık -106 ile -130 arasındayken gerçek uygulamada bu aralık -97 ile -103 arasında olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla, gerçek uygulamaya en yakın RSSI aralığı β_1 ortam katsayılı simülasyon uygulaması (Şekil 5.32-a) olmaktadır. Ayrıca simülasyon uygulamasında iletim gücüne göre RSSI değerlerinde düzenli bir artış pozitif yönde olmaktadır. Şekil 5.33'te verilen SNR kıyaslamaları da RSSI kıyaslamasına tersi yönde benzer olmakla birlikte; simülasyon uygulamasında ortam katsayısı arttıkça tüm iletim güçlerinde tüm yayılım faktörleriyle gerçek uygulamaya en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla, gerçek uygulamaya en yakın RSSI aralığı β_3 ortam katsayılı simülasyon uygulaması (Şekil 5.33-c) olmaktadır. Ayrıca simülasyon uygulamasında iletim gücüne göre SNR değerlerinde düzenli bir artış pozitif yönde olmaktadır.



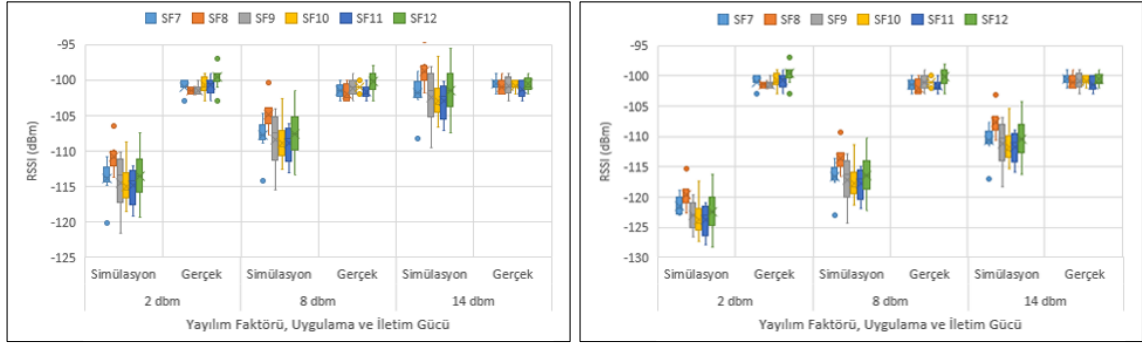
a) $\beta_1:4.0$

b) $\beta_2:4.75$



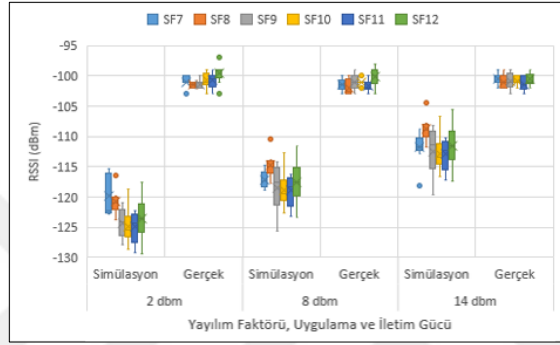
c) $\beta_3:4.9$

Şekil 5.31. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 1300m deki konum için PDR kıyaslaması



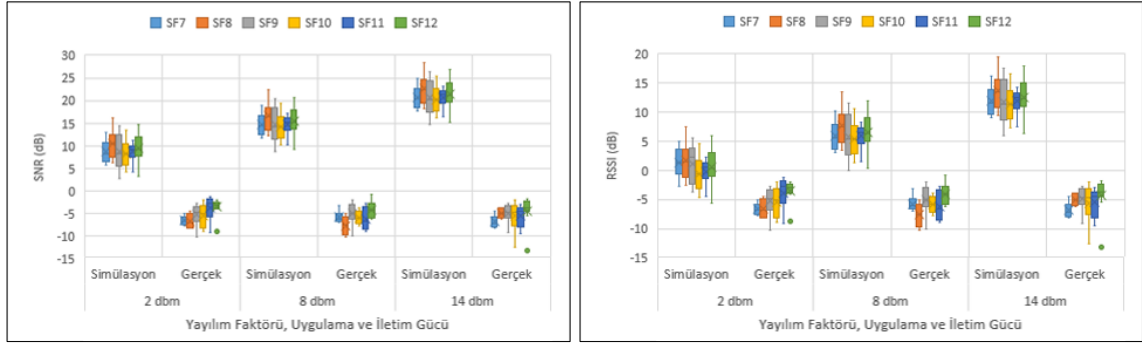
a) $\beta_1:4.0$

b) $\beta_2:4.75$



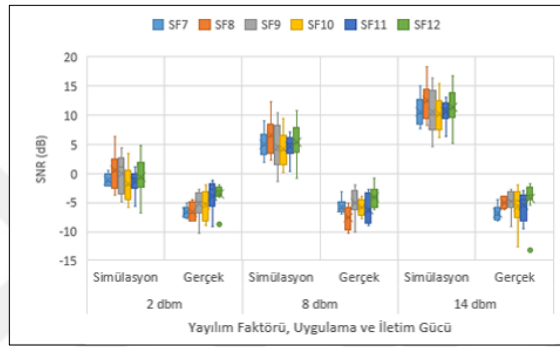
c) $\beta_3:4.9$

Şekil 5.32. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 1300m deki konum için RSSI kıyaslaması



a) $\beta_1:4.0$

b) $\beta_2:4.75$



c) $\beta_3:4.9$

Şekil 5.33. Simülasyon ve gerçek uygulamaya göre 1300m deki konum için SNR kıyaslaması

Bu analizlere göre gerçek uygulama ile simülasyon uygulaması arasındaki farklar için şunlar söylenebilir; ilk olarak, gerçek uygulamada iletim güçlerinin PDR, RSSI ve SNR performans kriterlerinin üzerindeki etkisi hakkında net bir şey söylenemezken simülasyon uygulamasında çok net bir şekilde bu kriterler analiz edilebilmektedir, ikinci olarak, ağ geçidi ile uç cihaz arasındaki uzaklık için gerçek uygulama da uzaklığın artmasıyla performans kriterleri üzerindeki etkisi çok kısmi yorumlanabilmekteyken simülasyon uygulamasında ortam katsayısı aynı kalmak şartıyla çok kesin yorumlar yapılabilmektedir. Gerçek uygulamada; Fresnel Alanı, yansıma, kırılma ve saçılma gibi bir çok faktör mesafeye bağlı olarak coğrafi alanın değişmesi ile çok değişkenlik gösterdiği için uzaklıkların performans ölçütleri üzerindeki etkisi izlemek için çok daha hassas ölçümler ve konumlar belirlenmelidir. Simülasyon uygulamalarında, log normal shadowing propagasyon modelindeki ortam katsayısının artmasıyla PDR, RSSI ve SNR gibi ölçütlerin değerleri negatif yönde arttığı tespit edilmiştir. Bunun tersi de geçerlidir.

6. SONUÇLAR

Nesnelerin interneti (IoT), insanların yaşamları ve çalışmaları üzerinde yardımcı olmasının yanı sıra insanların hayatlarında tam kontrol sahibi olmayı sağlar. Evleri otomatikleştirmek için akıllı cihazlar sunmanın yanı sıra şirketlere süreçlerini otomatikleştirmeleri ve işçilik maliyetlerini düşürmelerini de sağlar. Nesnelerin interneti; sağlık, finans, perakende ve üretim dahil her türlü sektöre dokunmaktadır. Bu nedenle, IoT günlük hayatın en önemli teknolojilerinden biridir ve günümüzde kullanılan IoT cihazlarının sayısının 50 milyar tane olduğu tahmin edilmektedir. Cisco Firma'sı bu sayının 2030 yılında 500 milyar tane olacağını tahmin etmektedir. Öte yandan, IoT uygulamalarının uzun menzilli, düşük veri oranı, düşük enerji tüketimi ve maliyet etkinliği gibi özel gereksinimleri vardır. Yaygın olarak kullanılan kısa kablosuz teknolojiler (örneğin; ZigBee, Bluetooth), uzun menzilli haberleşmeyi gerektiren senaryolarda kullanılamaz. Hücreli iletişimlere dayanan teknolojiler ise (örneğin, 2G, 3G ve 4G) daha büyük kapsama sağlayabilir, ancak çok fazla enerji ve maliyet gerektirirler. Bu nedenle, IoT uygulamalarının gereksinimleri, yeni bir kablosuz iletişim teknolojisi olan LPWAN'ın ortaya çıkmasına neden oldu. LPWAN, düşük güçlü, uzun menzilli ve düşük maliyetli iletişim özellikleri nedeniyle sanayi ve araştırma topluluklarında giderek daha fazla popülerlik kazanmaktadır. Kırsal bölgelerde 10-40 km, kentsel bölgelerde ise 2-5 km'ye kadar iletişim sağlar. Bununla birlikte, yüksek enerji tasarruflu (yani 10+ yıl pil ömrü [4]) ve maliyet açısından ucuzdur. LPWAN teknolojilerinden biri olan LoRaWAN, uzun iletim mesafesi, düşük veri oranı ve uzun pil ömrü sayesinde şu anda IoT uygulamalarını ve servislerini desteklemek için araştırmacıların en fazla ilgisini çeken ağ çözümüdür.

Bu tez çalışmasında, LoRa cihazlarının dış ve iç mekân ortamlarında farklı konumlara bağlı olarak performans testleri gerçekleştirilip analizleri yapıldı. Değerlendirme parametreleri olarak PDR, RSSI ve SNR dikkate alınmıştır. Ölçümler, farklı yayılım faktörü ve iletim gücü değerleri için ayrı ayrı yapıldı. Performans testi için simülasyon ve fiziksel uygulama olmak üzere iki uygulama yapıldı. Her iki uygulamada da ağ geçidinin konumu sürekli sabit tutulurken sadece uç cihazın konumu farklılaştırılarak testler gerçekleştirildi. Ayrıca, her iki uygulamada da ağ geçidi ile uç cihaz için belirlenen konumlar arasında dış mekân için 467m, 1300m, 1380m, 3270m uzaklıklar oluşturuldu. İç mekan testleri, fiziksel uygulamada, beş katlı bölüm binasında (zemin ve 3. katta) ve bir yeraltı tüneline yapılrken simülasyon uygulamasında sadece bina içinde (69 ve 106 m mesafelerde) yapılmıştır.

Simülasyon uygulaması, OPNET Modeler simülasyon aracı kullanılarak yapıldı. Bu simülasyon aracının kütüphanesinde henüz yer almayan LoRaWAN uç cihazı, ağ geçidi, merkezi ağ sunucusu, katılım sunucusu ve uygulama sunucu gibi düğümler modellenerek Opnet Modeler'in kütüphanesine eklendi. Bu geliştirme, Opnet Modeler'deki en önemli iyileştirmelerden biridir. Ek olarak, Log Normal Shadowing yayılım modeli de kütüphaneye eklendi. Opnet Modeler

Simülasyon Aracı'nda oluşturulan LoRaWAN düğümleri ve propagasyon modeliyle hem dış mekân hem de iç mekân (bina içi) ortamlarında LoRa ağ geçidi sabit konumda tutulurken LoRa uç cihaz için farklı konumlar seçilerek ve LoRa ağ geçidine farklı veri oranları, ortam katsayıları ve iletim gücü ile paket gönderimi yapılarak bu konumların PDR, RSSI ve SNR gibi performans ölçütleriyle analizinin yapılması sağlandı. Ayrıca, gerçek/fiziksel sistemin oluşturulduğu ağ ortamında da hem dış mekân hem de iç mekân (bina içi ve tünel) ortamlarında LoRa ağ geçidi sabit konumda tutulurken LoRa uç cihaz için farklı konumlar seçilerek, LoRa ağ geçidine farklı veri oranları ve iletim gücü ile paket gönderimi yapılarak bu konumların PDR, RSSI ve SNR gibi performans ölçütleriyle analizinin yapılması da sağlandı.

Simülasyon uygulamasından elde edilen dış mekân analiz sonuçlarına göre tüm uzaklıklarda en iyi PDR, RSSI ve SNR, en yüksek iletim gücü (14 dBm) ve en küçük ortam katsayısıyla elde edilmiştir. Dış mekân analiz sonuçlarında en kötü PDR, RSSI ve SNR alıcının 3270m uzaklıkta bulunduğu konumda en düşük iletim gücü (2 dBm) ve en yüksek ortam katsayısı ile gerçekleşmiştir. Bu konum kullanılan uzaklıklar içerisinde en uzak olan konumdur. Simülasyon uygulamasından elde edilen iç mekân analiz sonuçlarına göre alıcının 69 m uzakta olduğu konumda en iyi PDR, RSSI ve SNR, en yüksek iletim gücü ve en düşük ortam katsayısı ile elde edilirken en düşük PDR, RSSI ve SNR, en düşük iletim gücü ve en yüksek ortam katsayısı ile elde edilmiştir. 106m uzaklık içinde aynı şeyler söylenebilmektedir.

Simülasyon test sonuçlarından iletim gücü, ortam katsayısı ve yayılım faktörlerinin paket teslim oranına etkisi doğrudan bu uygulama sayesinde gözlemlenebildi. Hem iç mekân hem de dış mekân test sonuçlarında iletim gücünün artmasıyla tüm yayılım faktörleri için PDR, RSSI ve SNR değerlerinin de paralel olarak arttığı saptanmıştır. Propagasyon modeli için kullanılan ortam katsayısının artmasıyla PDR, RSSI ve SNR değerleri olumsuz yönde düştüğü ve ortam katsayısının azalmasıyla da bu değerlerin pozitif yönde arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, ortam katsayısının PDR, RSSI ve SNR performans ölçütleri üzerinde etkisi ters orantılıyken iletim gücünün performans ölçütleri üzerindeki etkisi doğru orantılı olmaktadır. Ayrıca, yayılım faktörünün artmasıyla (örn.: SF8'den SF10'a çıkması) sinyalin gürültüye daha bağımsız hâle geldiği de belirlenmiştir.

Fiziksel uygulamada, dış ortam olarak beş farklı ölçüm yeri seçildi. Başarılı bir ölçüm yapılan en uzak yer Gülmez Tepesi oldu. Bu konum ağ geçidinden 3.27 km uzaktaydı ve iyi bir Fresnel Bölgesi'ne sahipti. Öte yandan, diğer dış mekanlarda iyi bir Fresnel Bölgesi yoktu. Bu konumlarda, yüksek PDR değerleri yalnızca yüksek SF ve yüksek iletim gücüyle gözlemlenebilir. İç mekan ölçümlerinde PDR performansları, düşük SF'ler için iyi değildir. Ancak, yüksek SF ve iletim gücünün uzak noktalarda PDR değerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, tünel ölçümleri, LoRa teknolojisinin bu tür zorlu ortamlarda etkili bir şekilde kullanılabileceğine dair bir ipucu veriyor.

Diğer taraftan, RSSI ve SNR'nin hem iç hem de dış mekan gözlemlerinde ayırt edici bir özelliğe sahip olmadığı görülmüştür.

Gerçek/fiziksel uygulama ile simülasyon uygulaması arasındaki farklar için şunlar söylenebilir; ilk olarak, gerçek uygulamada iletim güçlerinin PDR, RSSI ve SNR performans kriterlerinin üzerindeki etkisi hakkında net bir şey söylenemezken simülasyon uygulamasında çok net bir şekilde bu kriterler analiz edilebilmektedir, ikinci olarak, ağ geçidi ile uç cihaz arasındaki uzaklık için gerçek uygulama da uzaklığın artmasıyla performans kriterleri üzerindeki etkisi çok kısmi yorumlanabilmekteyken simülasyon uygulamasında ortam katsayısı aynı kalmak şartıyla çok kesin yorumlar yapılabilmektedir. Gerçek uygulamada; Fresnel Alanı, yansıma, kırılma ve saçılma gibi bir çok faktör mesafeye bağlı olarak coğrafi alanın değişmesi ile çok değişkenlik gösterdiği için uzaklıkların performans ölçütleri üzerindeki etkisi izlemek için çok daha hassas ölçümler ve konumlar belirlenmelidir. Simülasyon uygulamalarında, log normal shadowing propagasyon modelindeki ortam katsayısının artmasıyla PDR, RSSI ve SNR gibi ölçütlerin değerleri negatif yönde arttığı tespit edilmiştir. Bunun tersi de geçerlidir.

Bu tez çalışması ile LoRaWAN teknolojisi detaylı bir şekilde ele alınıp geliştirilen uygulamalar sayesinde PDR, RSSI ve SNR gibi değerlendirme kriterleri gözetilerek analizleri yapılmıştır. Ayrıca, Opnet Modeler Simülasyon Aracı'nda ilk defa bu boyutta bir LoRaWAN düğümlerinin modellenmesi yapılarak bu simülasyon aracının kütüphanesine eklenmiştir. Gelecekteki çalışmalarımız arasında, LoRaWA ağlarında adaptif veri oranı (ADR) veya kanal modeli gibi teknolojiler üzerinde geliştirmeler veya optimizasyonlar yapmayı öngörmekteyiz.

ÖNERİLER

- 1) Simülasyon uygulamasındaki dış mekân ölçümleri için, iletim güçlerinin (2, 8 ve 14 dBm) PDR, RSSI ve SNR gibi performans kriterlerinin üzerindeki etkisi her bir konum ve yayılım faktörleri için çok net bir şekilde gözlemlenebilirken gerçek/fiziksel uygulamada bu etki çok sınırlı kalmıştır. Bunun nedeni, gerçek uygulamadaki bazı konumların coğrafi şartları, fresnel alanını çok kısıtladığı için radyo sinyalinin iletimi yeterince sağlıklı gerçekleşmediği düşünülmektedir. Dolayısıyla, eğer gerçek bir uygulama dış mekân ortamında gerçekleştirilecekse ilgili konumların fresnel alanı iyi olmalıdır.
- 2) Simülasyon uygulamasındaki radyo sinyali yayılım modelinde, sadece yol kaybı ve gölgeleme kaybı dikkate alınarak ampirik formüller kullanılmıştır. Daha gerçekçi bir sinyal yayılım modeli için çok yolluluk özelliği de dikkate alınarak yeni modellemeler yapılabilir.
- 3) Bu çalışmadaki simülasyon uygulamasında, LoRaWAN ağındaki bir uç cihazın alım pencerelerini düzenleyen sınıflardan A Sınıfı kullanılarak performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu sınıf baz alınarak B ve C Sınıfları modellenip Opnet Modeler platformunda LoRaWAN ağının performans testleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.ncta.com/whats-new/the-internet-of-things-continues-transform-the-way-we-live>, The Internet of Things Continues to Transform the Way We Live, 07 Mayıs 2019.
- [2] <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/se/internet-of-things/at-a-glance-c45-731471.pdf>, Internet of Things, 07 Mayıs 2019.
- [3] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, Fernand Meyer, A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, ICT Express, Volume 5, Issue 1, 2019, Pages 1-7, ISSN 2405-9595, <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>.
- [4] <http://www.weightless.org/membership/hvVs4ZGQqr5dwCDlBiYX>, LPWAN Technology Decisions: 17 critical features, 07 Mayıs 2019.
- [5] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios," in IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, October 2016.
- [6] D. Nicolas, R. Dominique, S. Ahmed, H. Olivier, P. Gabor, R. Guillaume, 2016. LoRa Device Developer Guide, Orange Connected Objects & Partnerships.
- [7] Tardy, Isabelle; Aakvaag, Niels; Myhre, Bård; Bahr, Roy, Comparison of wireless techniques applied to environmental sensor monitoring, SINTEF Digital Acoustics and Communication, report no. A27942, March 2017, <http://hdl.handle.net/11250/2436270>.
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/LoRa>, LoRa, 22 Ağustos 2019.
- [9] <https://devopedia.org/lora>, Who invented LoRa?, 22 Ağustos 2019.
- [10] F. Van den Abeele, J. Haxhibeqiri, I. Moerman and J. Hoebeke, "Scalability Analysis of Large-Scale LoRaWAN Networks in ns-3," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 6, pp. 2186-2198, Dec. 2017.
- [11] J. M. Marais, R. Malekian and A. M. Abu-Mahfouz, "Evaluating the LoRaWAN Protocol Using a Permanent Outdoor Testbed," in IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 12, pp. 4726-4733, 15 June 15, 2019.
- [12] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, J. Haapola and A. Pouttu, "D2D communications in LoRaWAN Low Power Wide Area Network: From idea to empirical validation," 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris, 2017, pp. 737-742.
- [13] J. Kim and J. Song, "A Secure Device-to-Device Link Establishment Scheme for LoRaWAN," in IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 5, pp. 2153-2160, 1 March 1, 2018.
- [14] B. Reynders, Q. Wang, P. Tuset-Peiro, X. Vilajosana and S. Pollin, "Improving Reliability and Scalability of LoRaWANs Through Lightweight Scheduling," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 3, pp. 1830-1842, June 2018.
- [15] R. B. Sørensen, D. M. Kim, J. J. Nielsen and P. Popovski, "Analysis of Latency and MAC-Layer Performance for Class A LoRaWAN," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 6, no. 5, pp. 566-569, Oct. 2017.
- [16] M. Pulpito, P. Fornarelli, C. Pomo, P. Boccadoro and L. A. Grieco, "On fast prototyping LoRaWAN: a cheap and open platform for daily experiments," in IET Wireless Sensor Systems, vol. 8, no. 5, pp. 237-245, 10 2018.
- [17] Petäjäjärvi, M. Pettissalo, J. Iinatti, K. Mikhaylov, J. Janhunen, "Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness scalability and coverage", Int. J. Distrib. Sens. Netw., vol. 13, no. 3, pp. 1-16, Mar. 2017.
- [18] R. Sanchez-Iborra, J. Ballesta-Viñas, A. Skarmeta, J. S. Gomez, M. D. Cano, "Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions", Sensors, vol. 18, no. 3, pp. 772, Mar. 2018.

- [19] R. Miller, LoRa security—Building a secure LoRa solution, London, U.K., Mar. 2016.
- [20] S. Tomasin, S. Zulian, L. Vangelista, "Security analysis of LoRaWAN join procedure for Internet of Things networks", Proc. Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops, pp. 1-6, Mar. 2017.
- [21] E. Aras, G. S. Ramachandran, P. Lawrence, D. Hughes, "Exploring the security vulnerabilities of LoRa", Proc. IEEE Int. Conf. Cybern., pp. 1-6, Jun. 2017.
- [22] T. Voigt et al., "Mitigating Inter-network Interference in LoRa Networks," [Online]. Url: <https://arxiv.org/abs/1611.00688> .
- [23] M. C. Bor et al., "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?," in Proc. 19th ACM Int. Conf. Modeling, Analysis Simulation Wireless Mob. Syst., New York, NY, 2016, pp. 59-67.
- [24] O. Georgiou and U. Raza, "Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?," [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1610.04793> .
- [25] Dobrilovic, Dalibor, Milan Malić, Dušan Malić and Srdjan Sladojevic. "Analyses and optimization of Lee propagation model for LoRa 868 MHz network deployments in urban areas." (2017).
- [26] Hosseinzadeh, Salaheddin; Almoathen, Mahmood; Larijani, Hadi; Curtis, Krystyna. 2017. "A Neural Network Propagation Model for LoRaWAN and Critical Analysis with Real-World Measurements." Big Data Cogn. Comput. 1, no. 1: 7.
- [27] Linka, Hendrik & Rademacher, Michael & Jonas, Karl & Aliu, Osianoh. (2018). Path Loss Models for Low-Power Wide-Area Networks: Experimental Results using LoRa.
- [28] P. Jörke, S. Böcker, F. Liedmann and C. Wietfeld, "Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz," 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, 2017, pp. 1-6.
- [29] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Copenhagen, 2015, pp. 55-59.
- [30] J. Toussaint, N. E. Rachkidy, A. Guitton, "Performance analysis of the on-the-air activation in LoRaWAN", Proc. IEEE 7th Annu. Inf. Technol. Electron. Mobile Commun. Conf. (IEMCON), pp. 1-7, Oct. 2016.
- [31] A. J. Wixted et al., "Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks", Proc. IEEE SENSORS, pp. 1-3, Oct. 2016.
- [32] Ruano, E., 2016. LoRa™ protocol Evaluations, limitations and practical test, Universitat Politècnica de Catalunya, MSc Thesis, Barcelona.
- [33] Sanfratello, A., 2016. Enabling relay-based communication in LoRa networks for the Internet of Things: design, implementation and experimental evaluation, Università di Pisa, MSc Thesis, Pisa.
- [34] Semtech Corporation, LoRa™ Modulation Basics, AN1200.22, May 2015.
- [35] Guillaume Ferré, Eric Simon. An introduction to Sigfox and LoRa PHY and MAC layers. 2018. hal-01774080
- [36] LoRa Alliance. What is it?. A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. 2015. url: <https://www.lora-alliance.org/>.
- [37] Haxhibeqiri, J.; De Poorter, E.; Moerman, I.; Hoebeke, J. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. *Sensors* **2018**, *18*, 3995.
- [38] <https://www.newieventures.com.au/blogtext/2018/2/26/lorawan-otaa-or-abp> , LoRaWAN: OTAA or ABP?, 08 Haziran 2019.
- [39] <https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/architecture.html>, The Things Network, Network Architecture, 24 Ağustos 2019.
- [40] <http://suraj.lums.edu.pk/~te/simandmod/Opnet/01%20Modeling%20Overview.pdf>, Chapter 1, Modelling Overview, 20 Nisan 2018.

- [41] Lu, Z. and Yang, H., 2012, Unlocking the power of OPNET modeler, Cambridge University Press., Cambridge.
- [42] 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. <https://doi.org/10.1177/1550147717699412>
- [43] Martin Bor, John Vidler, and Utz Roedig. 2016. LoRa for the Internet of Things. In Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN '16). Junction Publishing, USA, 361-366.
- [44] <https://spectrum.ieee.org/telecom/internet/tata-communications-countrywide-internet-of-things-will-manage-the-chaos-in-indias-booming-cities>, Tata Communications' Countrywide Internet of Things Will Manage the Chaos in India's Booming Cities., 29 Kasım 2019.
- [45] https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part13.pdf, Symbol, Spreading Factor & Chip, 22 Haziran 2019.
- [46] Semtech Corporation., SX1276/77/78/79 Datasheet, Rev. 6., 2019., url: https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V6.pdf.
- [47] Semtech Corporation., SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem., Designer's Guide., AN1200.13., July 2013.
- [48] LoRa Alliance. LoRaWAN™ 1.1 Specification. 2017. url: <https://www.lora-alliance.org/>.
- [49] LoRa Alliance. LoRaWAN™ 1.1 Regional Parameters. 2017. url: <https://www.lora-alliance.org/>.
- [50] LoRa Alliance. LoRaWAN™ 1.0 Specification. 2015. url: <https://www.lora-alliance.org/>.
- [51] Semtech Corporation., Recommended SX1276 Settings for EU868 LoRaWAN Network Operation., SX1276 Settings for LoRaWAN., AN1200.24., January 2015.
- [52] https://www.raveon.com/data_radio_info/the-lora-protocol-1159/, The LoRa Protocol, Forward Error Correction, 24 Temmuz 2019.
- [53] ETSI EN 300 220-1, V2.4.1 "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM) Short Range Devices (SRD) Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW" Part 1: Technical characteristics and test methods. May 2012.
- [54] Semtech Corporation., ETSI Compliance of the SX1272/3 LoRa Modem., AN1200.10., July 2013.
- [55] https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part23.pdf., ETSI Duty Cycles, TTN Fair Access Policy & Transmit Time Interval., 05 Temmuz 2019.
- [56] <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html>., Duty Cycle for LoRaWAN Devices., 03.12.2018.
- [57] D. Bankov, E. Khorov and A. Lyakhov, "On the Limits of LoRaWAN Channel Access," 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Moscow, 2016, pp. 10-14.
- [58] https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part17.pdf., LoRa Packet Format, Time on Air and Adaptive Data Rate., 17 Ağustos 2019.
- [59] K. Mikhaylov, -. Juha Petäjäjärvi and T. Haenninen, "Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology," *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, Oulu, Finland, 2016, pp. 1-6.
- [60] By Gemalto, Actility And Semtech, LoRaWAN™ SECURITY, Full End-To-End Encryption For Iot Application Providers, February 2017, url: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2019-05/lorawan_security_whitepaper.pdf.
- [61] Tony Rosati , ECRYPT (a Bosch Company) and Erik Wood , Cypress Semiconductor Corp., End-To-End Secure LoRaWAN: Secure Devices with Key Management from Provisioning to Operations, Cypress. url: <https://www.cypress.com/file/425331/download>.

- [62] Shenzhen Rakwireless Technology Corporation., RAK811 Lora Module Datasheet V1.4.,url:http://docs.rakwireless.com/en/LoRa/RAK811/Hardware_Specification/RAK811_LoRa_Module_Datasheet_V1.4.pdf , 12 June 2019.
- [63] Shenzhen Rakwireless Technology Corporation., RAK831 Lora Gateway Datasheet V1.3., url: <http://docs.rakwireless.com/en/LoRa/RAK831-LoRa-Gateway/Hardware-Specification/RAK831%20Datasheet%20V1.3.pdf> , 12 June 2019.
- [64] <https://www.thethingsnetwork.org/tech-stack#section1> ., Technology Stack., LoRaWAN Network Server.,01 Eylül 2019.
- [65] G. DOĞAN, G. YILDIRIM and Y. TATAR, "Empirical Observations on LoRa Performance for Different Environments," *2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID)*, Elazig, Turkey, 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICAAID.2019.8934983
- [66] E. Gündüzalp, "A Simulator Design to Model Electromagnetic Wave Propagation by 3D Ray Tracing Method in Indoor Environments", Master Thesis, Firat University, Elazig, 2018.
- [67] B. Reynders, W. Meert and S. Pollin, "Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication," 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), Thessaloniki, 2016, pp. 1-6.
- [68] <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/qfunc.html>, Q Function, 11 Eylül 2018.
- [69] Jun A.D. et al. (2017) Modeling and Simulation of LoRa in OPNET. In: Park J., Chen SC., Raymond Choo KK. (eds) *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering. FutureTech 2017*, MUE 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 448. Springer, Singapore.
- [70] Doğan, G. , Yıldırım, G. , Tatar, Y.. (2018). Opnet Modeler Ortamında WSN Protokollerinin Gerçekleştirme Süreçlerinin İncelenmesi . *Academic Perspective Procedia*, 1 (1), 105-114. DOI: 10.33793/acperpro.01.01.23
- [71] Semtech Corporation., SX1308 Datasheet.,V1.2., June 2017., url: <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1308.pdf> .
- [72] Semtech Corporation., Recommended SX1272 Settings for EU868 LoRaWAN Network Operation., SX1272 Settings for LoRaWAN., AN1200.23 ., January 2015.
- [73] https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_propagation_model, Radio propagation model, 16.09.2019.
- [74] Naseem, Z., Nausheen, I., & Mirza, Z. (2018). Propagation Models For Wireless Communication System.
- [75] <https://www.riverbed.com/gb/>, 17 Eylül 2019.
- [76] Mathuranathan Viswanathan., Log Distance Path Loss or Log Normal Shadowing Model., 2013., url: <https://www.gaussianwaves.com/2013/09/log-distance-path-loss-or-log-normal-shadowing-model/> .
- [77] I. K. Eltahir, "The Impact of Different Radio Propagation Models for Mobile Ad hoc NETWORKS (MANET) in Urban Area Environment," *The 2nd International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications (AusWireless 2007)*, Sydney, NSW, 2007, pp. 30-30.

ÖZGEÇMİŞ

Gürkan DOĞAN

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri	: ELAZIĞ
Doğum Yılı	: 1992
Uyruğu	: TÜRKİYE CUMHURİYETİ
Adres	: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
E-posta	: gurkan.dogan@hotmail.com.tr
Yabancı Diller	: İngilizce (Düzey: YÖKDİL : 80.00)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans	: Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 2015
Lise	: Mehmet Âkif Ersoy Lisesi, Elazığ, 2010

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ **Programlama Dilleri ve Teknolojiler** : JAVA(Çok İyi), C#, ASP.NET, JSP(Çok İyi), JSF(Çok İyi), AJAX(Çok İyi), VHDL(Çok İyi), Hibernate(Orta), PrimeFaces(Çok İyi), SQL(Çok İyi), Assembly Gömülü Programlama(PIC Programlama)(Çok İyi), C(Çok İyi), PHP(Orta)
- ✓ **İşletim Sistemleri** : Windows 10/8/7/ XP/ Vista, Linux (Ubuntu, Kali)
- ✓ **Paket Programlar** : OPNET Modeler, Eagle, Matlab, Microsoft Office, Adobe Photoshop, GNS3

AKADEMİK FAALİYETLER

Bildiriler:

1. Doğan, G. , Yıldırım, G. , Tatar, Y.. (2018). [Opnet Modeler Ortamında WSN Protokollerinin Gerçekleştirme Süreçlerinin İncelenmesi](#) . Academic Perspective Procedia, 1 (1), 105-114. DOI: 10.33793/acperpro.01.01.23 .
2. G. DOĞAN, G. YILDIRIM and Y. TATAR, "[Empirical Observations on LoRa Performance for Different Environments](#)," 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID), Elazig, Turkey, 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICAAID.2019.8934983