



**T.C. İSTANBUL T CARET
ÜNİVERSİTESİ**

FEN B LİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NB-IOT VE LORA HABERLEŞME TEKNOLOJ LERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ**

Sümeyye YASİNT MUR

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Vedat TAVAS**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İSTANBUL – 2021**

KABUL VE ONAY SAYFASI

Sümeyye YASİNTİMUR tarafından hazırlanan "**NB-IoT ve LoRa Haberleşme Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Performans Analizi**" adlı tez çalışması 07/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde başarı ile savunularak, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Vedat TAVAS İstanbul Ticaret Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Serhan YARKAN İstanbul Ticaret Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Hacı İLHAN Yıldız Teknik Üniversitesi	

Onay Tarihi : 29.07.2021

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünün 29.07.2021 tarih ve 2021/317 numaralı Yönetim Kurulu Kararının 2. maddesi gereğince, ders yüklerini ve tez yükümlülüğünü yerine getirdiği belirlenen "Sümeyye YASİNTİMUR" adlı öğrencinin mezun olmasına oy birliği ile karar verilmiştir.

Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK
Enstitü Müdürü

AKADEMİK VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20.07.2021

Sümeyye YASİNTİMUR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
3. TEORİ.....	18
3.1. LPWAN Teknolojilerine Genel Bir Bakış	18
3.2. LoRa ve LoRaWAN'a Genel Bir Bakış.....	23
3.2.1. LoRa yayılma faktörü (SF) ve Shannon-Hartley teoremi.....	23
3.2.2. LoRa ve LoRaWAN	25
3.2.3. IoT faktörleri çerçevesinde LoRaWAN	26
3.2.4. LoRa teknik özellikleri	29
3.2.5. Dünya geneli LoRaWAN kullanımı	31
3.3. NB-IoT'ye Genel Bir Bakış.....	32
3.3.1. NB-IoT çalışma modları	34
3.3.2. NB-IoT pil ömrünü etkileyen PSM ve eDRX faktörleri.....	35
3.3.3. NB-IoT ağ mimarisi	38
3.3.4. NB-IoT iletim şemaları	39
3.3.4.1. Aşağı bağlantı iletim şeması.....	40
3.3.4.2. Yukarı bağlantı iletim şeması	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	44
4.1. Testlerin Gerçekleştirildiği Pilot Bölge	44
4.2. NB-IoT Testi ve Analiz Sonuçları	47
4.3. LoRa Testi ve Analiz Sonuçları	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
5.1. Veri İletimlerinde Eşzamanlılık.....	63
5.2. Paket Kayıp Oranları	64
5.3. Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI)	64
5.4. Yayılma Faktörü (SF).....	67
5.4. Teknoloji Seçimi.....	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ.....	73

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NB-IOT VE LORA HABERLEŞME TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

Sümeyye YASİNTİMUR

**İstanbul Ticaret Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Vedat TAVAS
2021, 73 sayfa**

LPWAN teknolojilerinin güç gereksinimlerinin düşük oluşu, ölçeklenebilirlik özelliği, kapsama alanının genişliği, uzun menzil iletim kapasiteleri gibi unsurlar değerlendirildiğinde IoT uygulamalarındaki kullanım oranları gün geçtikçe artmaktadır. Bu tez çalışmasında Eyüpsultan ilçesi sınırları içerisinde yer alan bir sitede LPWAN çatısı altında bulunan NB-IoT ve LoRa teknolojilerinin performansı değerlendirilmektedir. Çalışmanın ana amacı her iki teknolojinin de bahsi geçen site içerisinde yer alan su ve gaz sayaçlarının bulunduğu alanlarda nasıl bir performans göstereceğinin belirlenmesidir. LoRa testleri koridorlarda bulunan gaz sayaçlarının üzerinde gerçekleştirilirken; NB-IoT testlerinde ise metal kapak ardındaki sayaç şaftları üzerinde gözlemler yapılmıştır. Katlarda LoRa testlerinde RSSI ve SF; NB-IoT’de ise RSSI değerleri kaydedilmiştir. Analizler LoRa için 14; NB-IoT için 16 paket üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar gönderilen 30 paketin de baz istasyonlarına kayıpsız bir şekilde ulaştığını gösterirken senkronizasyon problemi yaşandığı da gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: LoRa, LoRaWAN, LPWAN, NB-IoT.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF NB-IOT AND LORA COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Sumeyye YASINTIMUR

**Istanbul Commerce University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electronics and Communications Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Vedat TAVAS
2021, 73 pages**

Considering factors such as low power requirements of LPWAN technologies, scalability capability, wide coverage areas, and long range transmission capacities, usage rates in IoT applications are increasing day by day. In this thesis, the performance of NB-IoT and LoRa technologies under the roof of LPWAN in a site located within the borders of Eyüpsultan district is evaluated. The main purpose of the study is to determine how both technologies will perform in the areas where the water and gas meters are located within the mentioned site. While LoRa tests are carried out on the gas meters in the corridors; In the NB-IoT tests, observations were made on the counter shafts behind the metal cover. RSSI and SF in LoRa tests on floors; RSSI values are recorded in NB-IoT. Analyzes 14 for LoRa; It is made on 16 packages for NB-IoT. While the results show that all 30 packets sent to the base stations without any loss, it was also observed that there was a synchronization problem.

Keywords: LoRa, LoRaWAN, LPWAN, NB-IoT

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi, Vedat TAVAS'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırmanın uygulama aşamasında kullanılan test ortamının sağlanmasında katkılarından dolayı İBB (İstanbul Büyükşehir Belediyesi), İSKİ (İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi) ve İGDAŞ (İstanbul Gaz Dağıtım Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi)'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan, desteklerini ve emeklerini daima hissettiğim değerli aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Sümeyye YASİNTİMUR
İSTANBUL, 2021

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil 1.1. İGDAŞ Abone Sayısının Yıllara Göre Değişimi	1
Şekil 3.1. Dünya’da Toplam Aktif Cihaz Bağlantı Sayısı.....	19
Şekil 3.2. Radyo İletişim Teknolojilerinin Menzil Kapasitesine Göre Veri Hızı.....	20
Şekil 3.3. Sigfox, LoRa ve NB-IoT’nin Kıyas Diyagramı	21
Şekil 3.4. LoRaWAN Hiyerarşik Mimarisi.....	26
Şekil 3.5. LoRaWAN Küresel Ağ Kapsamı.....	32
Şekil 3.6. NB-IoT Çalışma Modları.....	34
Şekil 3.7. DRX ve eDRX Döngüleri	38
Şekil 3.8. NB-IoT Ağ Mimarisi	39
Şekil 3.9. NB-IoT Aşağı Bağlantı Çerçeve Yapısı	40
Şekil 3.10. NB-IoT Yukarı Bağlantı Çerçeve Yapısı	42
Şekil 4.1. Testlerin Gerçekleştirildiği Site Planı	45
Şekil 4.2. Blok İçerindeki Gaz Sayacının Konumu	46
Şekil 4.3. Blok İçerisindeki Su Sayacı Şaft Tünelinin Kapalı ve Açık Konumu	47
Şekil 4.4. NB-IoT Testlerinin Gerçekleştirildiği Blok	48
Şekil 4.5. NB-IoT Test Konumu ile Baz İstasyonları Arasındaki Mesafe	49
Şekil 4.6. NB-IoT Testi RSSI Değerleri	52
Şekil 4.7. 12. Katta Metal Kapağın RSSI Değerlerine Etkisi	53
Şekil 4.8. LoRaWAN Ağ Geçidinin Konumu	55
Şekil 4.9. LoRa Test Senaryosu Topolojisi.....	56
Şekil 4.10. LoRa Testlerinde Kullanılan Manyetik Alan Okuyuculu LoRa Sensörü	57
Şekil 4.11. Testlerde Kullanılan LoRaWAN Ağ Geçidi	58
Şekil 4.12. LoRa Testi RSSI Değerleri	59
Şekil 4.13. LoRa Testi SF Değerleri	61

ÇİZELGELER

	Sayfa
Çizelge 3.1. LoRaWAN ve NB-IoT Teknolojilerine Genel Bakış	29
Çizelge 4.1. NB-IoT Teknolojisinde RSSI Referans Değerleri	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

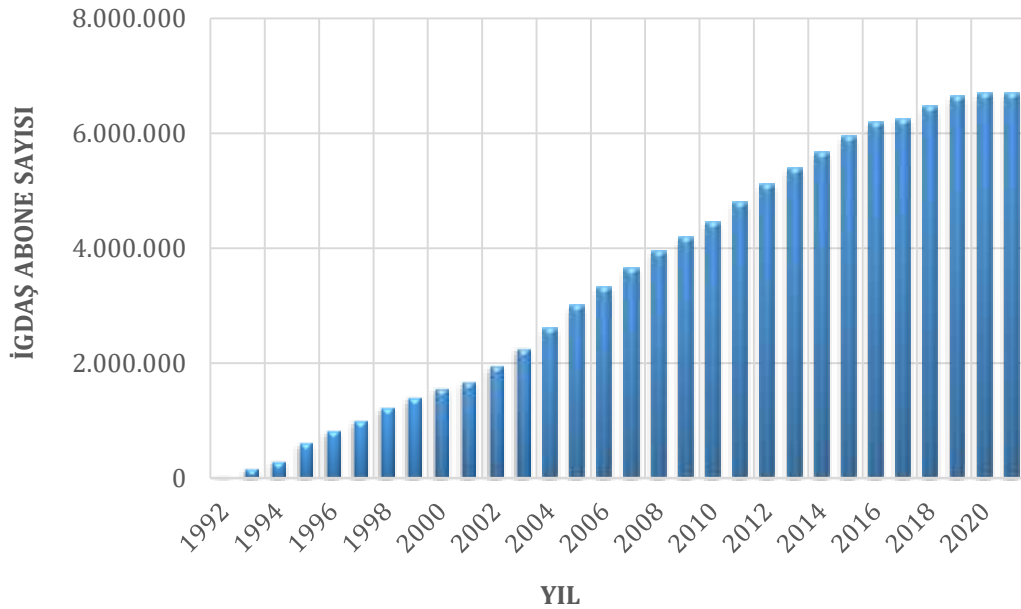
AES	Gelişmiş Şifreleme Standardı (Advanced Encryption Standard)
B	Kanal Bant Genişliği
C	Kanal Kapasitesi
CSS	Chirp Yayılı Spektrum (Chirp Spread Spectrum)
dBm	Desibel Miliwatt (Decibel Milliwatt)
DL	Aşağı Bağlantı (Downlink)
DMRS	Demodülasyon Referans Sinyali (Demodulation Reference Signal)
eDRX	Artırılmış Kesintili Alım (Extended Discontinuous Reception)
FSK	Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency-shift keying)
IoT	Nesnelerin/Şeylerin İnterneti (Internet of Things)
ISM	Sınai, Bilimsel ve Tıbbi Cihaz (Industrial Scientific Medical)
LoRa	Uzun Menzil (Long Range)
LPWAN	Düşük Güç Geniş Alan Ağı (Low Power Wide Area Network)
LTE	Uzun Vadeli Evrim (Long-Term Evolution)
N	Ortalama Gürültü veya Girişim Gücü
NB-IoT	Dar Bant Nesnelerin İnterneti (Narrowband IoT)
NPBCH	Dar Bant Fiziksel Yayın Kanalı (Narrowband Physical Broadcast Channel)
NPDCCH	Dar Bant Fiziksel Aşağı Bağlantı Kontrol Kanalı (Narrowband Physical Downlink Control Channel)
NPDSCH	Dar Bant Fiziksel Aşağı Bağlantı Paylaşımlı Kanal (Narrowband Physical Downlink Shared Channel)
NPRACH	Dar Bant Fiziksel Rastgele Erişim Kanalı (Narrowband Physical Random Access Channel)
NPSS	Dar Bant Birincil Senkronizasyon Sinyali (Narrowband Primary Synchronization Signal)
NPUSCH	Dar Bant Yukarı Bağlantı Paylaşımlı Kanal (Narrowband Uplink Shared Channel)
NRS	Dar Bant Referans Sinyali (Narrowband Reference Signal)
NSSS	Dar Bant İkincil Senkronizasyon Sinyali (Narrowband Secondary Synchronization Signal)
OFDM	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PRB	Fiziksel Kaynak Bloğu (Physical Resource Block)
PSM	Güç Tasarruf Modu (Power Saving Mode)
QAM	16-Karesel Genlik Modülasyonu (16-Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	Hizmet Kalitesi (Quality of Service)
QPSK	Dört Fazlı Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
RRC	Radyo Kaynak Kontrolü (Radio Resource Control)
RSRP	Alınan Referans Sinyali Gücü (Reference Signal Receive Power)
RSRQ	Alınan Referans Sinyali Kalitesi (Reference Signal Received Quality)
RSSI	Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (Received Signal Strength Indicator)
S	Ortalama Alınan Sinyal Gücü

SC-FDMA	Tek Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Single Carrier Frequency-Division Multiple Access)
SF	Yayılma Faktörü (Spreading Factor)
SIM	Abone Kimlik Modülü (Subscriber Identity Module)
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-noise ratio)
TDOA	Varış Zaman Farkı (Time Difference of Arrival)
UL	Yukarı Bağlantı (Uplink)

1. GİRİŞ

İGDAŞ'ın yayınladığı bir rapora göre İstanbul'da doğalgaz abone sayısının yıllara göre bir artış sergilediği görülmektedir (İGDAŞ, 2021). Bu durum birçok problemi beraberinde getirmektedir. Hiç kuşkusuz bunlardan biri de sayaçların geleneksel yöntemlere göre okunmasıdır. Bu yöntemde bir sayaç okuma personeli sayacın bulunduğu konuma gitmekte ve okunan son endeks değeri ile bir önceki ay okunmuş olan değerin farkını alarak aboneyi ücretlendirmeye tabi tutmaktadır (Tankut vd., 2019).

Şekil 1.1'de de görülebileceği üzere abone sayısının artmasıyla yıllardır süre gelen bu geleneksel okuma sisteminin zorlayıcı bir etki oluşturacağı aşikârdır. Maliyet, uzak noktada bulunan sayaçlara erişim, adres yetersizliği ve insan kaynaklı okuma hataları gibi parametreler göz önünde bulundurulduğunda daha teknolojik çözümler aramaya yönelim başlamıştır. Bu noktada kablolu ve kablosuz teknolojileri içeren uzaktan sayaç okuma yöntemleri incelenmiş ve tüm teknolojiler kendi içinde değerlendirilmiştir.



Şekil 1.1. İGDAŞ Abone Sayısının Yıllara Göre Değişimi (İGDAŞ, 2021)

Bu tez çalışmasında uzaktan sayaç okumak için LPWAN (Low Power Wide Area Network, Düşük Güç Geniş Alan Ağı) çatısı altında bulunan ve Dünya’da popülaritesi yüksek olan LoRa (Long Range, Uzun Menzil) ve NB-IoT (Narrowband IoT, Dar Bant Nesnelerin İnterneti) haberleşme teknolojileri üzerinde durulmuştur. LPWAN teknolojilerinin seçilmiş olmasının birçok gerekçesi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir; düşük güç gereksinimleri, enerji verimliliği, geniş alan kapsayıcılığı, uzun mesafeye iletim ve ölçeklenebilirlik (Kabalci ve Ali, 2019).

LPWAN teknolojilerinin bu vaatleri gerçekleştirebilmek adına hücresel ve Wi-Fi sistemlerinin alışlagelmiş bazı yeteneklerinden feragat etmeleri gerektiği de belirtilmelidir. Bunların başında ise veri iletiminin çok yüksek hızlarda oluşu ve gecikmelerin en az düzeye indirgenmesi gelmektedir. Elbette bu iki parametrenin gerekliliği akıllı ulaşım, lojistik, video izleme (Adelantado vd., 2016) gibi birçok uygulamada mecburiyet oluştursa da gecikmeye duyarlı olmayan ve günün belirli zaman dilimlerinde veri gönderilmesinin yeterli olduğu uygulamalar için birincil öncelik değildir.

Bu tez çalışmasının temelini oluşturan akıllı sayaçlar da gecikmeye duyarlı olmayan, günün belirli zaman dilimlerinde veri göndermesi talep edilen uygulamalar arasındadır ve veri iletim hızı, paket kayıp oranı, gecikme, ölçeklenebilirlik, kapsayıcılığın yanı sıra sayaçların pil ömrünün uzun olması da aranan temel ölçütlerden biridir. Teorik olarak LoRa ve NB-IoT uç cihazlarının en az 10 yıl pil ömrüne sahip olması; LoRa’nın kapsayıcılığının kentte 2-5 km iken kırsal alanda 10-20 km, NB-IoT’nin ise kentte 1 km iken kırsal alanda 10 km oluşu gibi hususlar bu tez çalışması için ilgili iki teknolojinin değerlendirilmesini sağlamıştır (Lalle vd., 2019).

Bu doğrultuda Eyüpsultan’da bulunan ve şehir içi iç mekân ölçümleri için bir örneklem oluşturacağı düşünülen dört bloklu; her blokta on iki kat, her katta farklı adetlerde su ve doğalgaz sayaçları bulunan bir sitede NB-IoT ve LoRa haberleşme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin asıl amacı NB-IoT ve

LoRa'nın bahsi geçen site içerisindeki performansını gözlemlemek adına somut çıktılar elde etmektir.

İlgili iki teknolojinin testinde de sinyal kalitesinin gözlemlenebilmesi adına RSSI (Received Signal Strength Indicator, Alınan Sinyal Gücü Göstergesi) değerleri ölçülmüştür. Buna ilaveten LoRa için SF (Spreading Factor, Yayılma Faktörü) değerleri de gözlemlenmiştir. Kullanılan LoRa ve NB-IoT özellikli uç düğümlerin farklı katlardaki sinyal gücü göstergelerinin belirlenmesi, bu sonuçların kendi özellerinde değerlendirilmesi ve nedenlerinin tartışılması sonucunda elde edilen çıktılar aracılığı ile LPWAN çatısı altında yer alan, Türkiye'de kullanımı yaygın olmayan LoRa ve NB-IoT haberleşme teknolojilerine bakış açısının ilgili bölge özelinde somutlaşması sağlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Çalışmanın temelini LPWAN teknolojisi ve bu teknoloji çatısı altında bulunan LoRa ve NB-IoT iletişim yöntemleri oluşturduğundan bu bölümde LPWAN, LoRa ve NB-IoT ile ilgili yapılmış teorik ve uygulamalı örnekler incelenmiştir.

Bu bölümde LPWAN başlığı altında bulunan iletişim yöntemlerinin daha iyi anlaşılması, ayrıca bu yöntemlerin diğer kısa menzil haberleşme teknolojileri ile kıyası noktasında yapılmış teorik ve uygulamalı çalışmaların kısa bir özeti verilmiştir. Bundan amaç seçilen NB-IoT ve LoRa radyo iletişim yöntemlerinin başka konular için davranışları ve seçilmeyen diğer kısa menzil haberleşme yöntemlerinin neden seçilmediğinin tam olarak anlaşılmasıdır.

Petäjäjärvi vd. (2015), LoRa teknolojisinin kapsamını ölçmek adına bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Deneyler Finlandiya'nın Oulu şehrinde yapılmıştır. Hem deniz hem de kara ölçümlerinin yapılabilmesi adına zeminde bir arabanın tavanına, denizde ise radyo anteninin üzerine yerleştirilmiş iki adet düğüm kullanılmış ve bu düğümlerden alınan veriler Oulu üniversitesinin anten kulesine sabitlenmiş bulunan LoRa baz istasyonuna belirli periyotlarda iletilmiştir. Hem arabanın hem de teknenin hareket halinde bulunması farklı mesafelerdeki kapsamın gözlemlenebilmesi adına önemlidir.

Ölçüm sonuçlarına göre zeminde 5 km'ye kadar mesafede başarılı alınan paket oranı %80'nin üzerindedir. 5-10 km mesafede bu oran %60'lara inmektedir. 10 km'yi aşan mesafelerde ise çoğu paketin kaybolduğu gözlemlenmiştir. Suda ise 0-15 km ve 15-30 km'de başarılı alınan paket oranı hemen hemen aynı olup %70 civarındadır.

Ayrıca yazarlar ilgili çalışmada elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda bir kanal zayıflatma modeli de önermektedirler. Bu modelin LoRa baz istasyon yoğunluğunun tahmini için kullanılabileceği ifade edilmiştir. Çalışmanın 2015 yılında yapıldığı göz önünde bulundurulursa eğer LoRa teknolojisinin standartlaştırılması akabinde gerçekleştirilen ilk deneylerden olduğu sonucuna

varılabilir. Deneyin hem deniz hem de kara ölçümlerini kapsaması LoRa teknolojisinin birbirinden çok farklı parametrelerin mevcut olduğu durumlarda değerlendirilmesini sağlamıştır.

Gregora vd. (2016), LoRa teknolojisinin iç mekân performansını gözlemlemek için Çek Cumhuriyeti'nin Prag kentinde betonarme yapılı bir binada bazı testler gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde bir adet alıcı (ağ geçidi) hem binanın çatısına hem de bodrum kata yerleştirilirken bir adet vericinin konumu her ölçüm için değiştirilmiştir. Bina yedi girişli, zemin ve bodrum katta dâhil olmak üzere sekiz katlıdır. Her giriş için sekiz iletim konumu belirlenmiş ve ağ geçidine her konumdan on mesaj gönderilmiştir. Her mesaj baz istasyonu kimlik numarası, zaman bilgisi, yük, frekans, yayılma faktörü, RSSI ve SNR gibi parametreleri içermektedir.

Tüm sonuçların RSSI değerlerine göre görselleştirildiği bu çalışmada alıcının binanın çatısına yerleştirildiği durumda LoRa sinyalinin daha kolay ve kapsamlı yayıldığı ve komşu girişlerin dairelerinin de sinyal kapsama alanı içine girdiği gözlemlenmiştir. Ağ geçidinin bodrumda olduğu durumda ise gözle görülür bir kapsama farkı oluşmuştur. Sonuçlar alıcının çatı konumuna yerleştirilmesinin gerekliliğini gözler önüne sermektedir. Literatürde genel olarak alıcının değil de vericinin konumunun değiştirildiği ölçümlerin yanı sıra bu çalışmada farklı konumlardaki alıcı değerlendirilmektedir. Bu da teoride bilinen alıcı konumunun sinyalin kalitesini etkilediğinin uygulamalı bir çıktısını oluşturmaktadır.

Li vd. (2017), LoRa haberleşme teknolojisini deniz sahasında çalışan Yelken İzleme Sistemine uygulamaktadırlar. İlk olarak Çin'in Şangay kentinde bir gölde, hareketli bir bot üzerine suyun 1.5 m yukarısına denk gelecek şekilde YL-900IL modülünün anteni ve suyun 4 metre yüksekliğinde bulunan bir baz istasyonu modül anteni yerleştirilmiştir. Bu test sonucunda seçilebilecek en iyi SF değerinin 7, BW (bant genişliği)'nin ise 125 kHz olduğu tespit edilmiştir.

Asıl testler ise Rio yelken sahasında gerçekleştirilmiştir. Bu sahada iki senaryo test edilmiş olup ilk senaryoda antrenör teknesinde bulunan ağ geçidi su

seviyesinden 4 m yüksekliğe ve sporcu yelkenlisinde bulunan diğer modül ise 1 m yüksekliğe sabitlenmiştir. Bu testin sonucunda 400 m mesafede veri kaybı oranının %0,34 olduğu görülmüştür. İkinci senaryoda ise ağ geçidi sahile 1 km mesafede bulunan 20 m yüksekliğinde bir binanın tepesine sabitlenmiştir. Anten ise deniz seviyesinden 4 m yüksekliğinde sabit tutularak hareket halinde bulunan bir tekneye monte edilmiştir. Ölçüm alanı engeller göz önünde bulundurularak dört farklı bölgeye ayrılmıştır. Bu senaryonun sonucunda ise LoRa teknolojisi düşük güç tüketimi, uzun menzil, iletim kalitesi gibi performanslar değerlendirildiğinde iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ancak binaların, ağaçların, tepelerin ve dalgaların performansı etkilediği sonucuna da varılmıştır.

Bu testler sonucunda LoRa haberleşme teknolojisinin Yelkenli İzleme Sistemi için uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir. Bu çalışmada farklı ağ geçidi konumları, farklı yüksekliklerde ve hareket halinde bulunan uç düğümler ile birçok sonuç elde edilmiştir. Ayrıca son ölçümde ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki alanların dört ayrı bölgeye ayrılmış olması da sinyalin hangi engellerden ne kadar etkilendiğini açıkça gözler önüne sermiştir.

Wibisono vd. (2017), Bali Eco Smart Grid hedefini desteklemek için Bali'deki bir enerji tedarik şirketi olan ulusal enerji şirketi PLN'nin 1 Haziran 2016'da Bali Eko Akıllı Şebeke programını başlattığına ve bu kapsamda Bali'nin Kuta bölgesinde testler gerçekleştirildiğine değinmektedir. Bu testler kapsamında 1000 adet LoRaWAN'lı sayaç mevcut sayaçlarla değiştirilerek çift yönlü sayaç izlemesi yapılmıştır. LPWAN teknolojileri arasından NB-IoT ya da SigFox'tan ziyade LoRaWAN'ın seçilmesine ise piyasada bulunan mevcut cihaz durumu, frekans tahsisi ve lisanslamaya ilişkin Endonezya yönetmeliği gerekçe gösterilmiştir.

Testin sonuçları incelendiğinde, çift yönlü çalışan LoRaWAN'lı sayaçları kullanan müşterilerin memnuniyetinin %100 olduğu ve sayaç okuma performansının da aynı şekilde %100 başarı gösterdiği gözlemlenmiştir. Seçilen pilot bir bölgedeki sayaçların akıllandırılmasını kapsadığı için bu tez ile benzerliği bulunmaktadır. Ancak teknik olarak yeteri kadar detaylandırılmadığı için sayaç okuma

performansının %100 oluşunu belirleyen ölçüm sonuçlarına ve parametrelere ulaşamamaktadır.

Adelantado vd. (2017), çalışmalarında LPWAN teknolojilerinden bazılarını kısaca değindikten sonra LoRaWAN'ın detaylı bir değerlendirmesini yapmaktadırlar. Çalışmanın amacı ilgili ağ protokolünün kapsamı ve sınırlamalarını gözler önüne serip beklentileri uygun hale getirmek olarak ifade edilmiştir. İlk olarak LoRaWAN'ın teknik detaylarına değinilen çalışmada teknolojinin avantaj ve sınırlarının anlaşılması adına birçok IoT uygulaması için uygulanabilirliği tartışılmaktadır.

Bu çalışmada belirli gecikme toleransına sahip akıllı aydınlatma, akıllı parklanma ve akıllı atık toplama gibi uygulamalar için LoRaWAN'ın uygun bir teknoloji olduğu belirtilmiştir. Bunların aksine akıllı ulaşım ve lojistik söz konusu olduğunda LoRaWAN'ın bu uygulamalar için tercih edilemeyeşinin gerekçesi olarak çoğu uygulamanın gecikme, titreme gibi parametrelere karşı toleransının bulunmayışı gösterilmiştir. Diğer bir örnek olarak verilen video izleme ise çok yüksek veri hızları talep edeceğinden LoRaWAN tarafından desteklenmeyecektir.

Son olarak ise henüz netleşmeyen bazı açık araştırma konularına değinilerek çalışma sonlandırılmıştır. LoRaWAN'a karşı beklentilerin belirlenebilmesi adına bu çalışma verimli bir çalışma olmasının yanı sıra teknik olarak da besleyici niteliği yüksektir. Ayrıca yazarların ifadelerine göre bu tezin de temelini oluşturan gecikme toleransına sahip, günün yalnızca belirli bir zaman aralığında veri gönderme ihtiyacı bulunan akıllı sayaç uygulamaları için teknik olarak LoRaWAN'ın uygun bir teknoloji olduğu sonucuna varılabilir.

Vatcharatiansakul vd. (2017), LoRaWAN'ın hem iç hem de dış mekân performansını değerlendirmek adına Tayland'ın Bangkok kentinde gerçek bir çevrede bazı deneyler yapmışlardır. Farklı konumlarda gerçekleştirilen iki deneyde de tek bir son cihaz ağ geçidine belirli uzaklarda konumlandırılmış, SNR ve paket kayıp oranları gözlemlenmiştir. İlk olarak dış mekânda yapılan testlerde uç cihazın ağ geçidine uzaklığı 0.5, 1, 1.5, ve 2 km olacak şekilde konumlandırılmış

ve sonuçlar grafiklerle ifade edilmiştir. Sonuçlar beklenildiği üzere uç cihazın ağ geçidinden uzaklaştıkça SNR değerinin düştüğünü ve paket kayıp oranının yükseldiğini göstermektedir.

İkinci olarak iç mekân testlerinde ise uç cihaz ağ geçidine 55, 95, 120 ve 150 metre mesafede konumlandırılmış ve yalnızca 55 ile 120 metre mesafedeki cihazlardan veri alınabildiği, o verilerin de paket kayıp oranlarının sırasıyla %56 ve %94 olduğu sonucuna varılmıştır. Bu haliyle gerçek bir uygulamada hiç şüphesiz ciddi paket kayıp oranları dolayısıyla verim alınamayacağı öngörülebilir. Ancak gözlemin daha çok paket üzerinde yapılması da sonuçları değiştirebilir.

Vejlgaard vd. (2017), LoRa, NB-IoT, SigFox ve GPRS'in kapsamı ve kapasitesinin kıyası üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu doğrultuda Danimarka'da 8000 km² bir alan ve 580.000 kişiyi kapsayan Kuzey Jutland bölgesi incelenmiştir. Bu alan kırsal bir bölgeye ve on şehri temsil eden on kentsel bölgeye ayrılarak bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda kentsel alandaki yoğunluk 1648 kişi/km² olurken kırsal alanda bu yoğunluk 44 kişi/km² olarak hesaplanmıştır.

Simülasyon sırasında tüm kullanıcıların dışarıda olduğu varsayıldığı için tüm iç mekân gözlemlerine 10, 20 ve 30 dB'lik bir penetrasyon kaybı eklenerek dengeleme sağlanmıştır. İlk olarak alınan sonuçlara göre iç mekân kapsayıcılığında GPRS %40 oranında kapsama yapamayarak sınıfta kalmış gibi görünmektedir. Bunun yanı sıra LoRa, NB-IoT ve SigFox 20 dB penetrasyon kaybında %95'den fazla kapsayıcılık sağlamıştır. Yukarı bağlantı oranı söz konusu olduğunda ise NB-IoT tüm teknolojileri geride bırakmış gibi görünmektedir. Yazarlar bunun nedenini en iyi kapsama alanı olarak görürken NB-IoT'nin en uzun yayında kalma süresine de dikkat çekmektedirler.

Bu durum enerji tüketimi ve cihaz maliyeti gibi kavramları da yeniden gün yüzüne çıkarmaktadır. Artan IoT dünyası ile birlikte bu iki performans göstergesi de yadsınamayacak kadar önemli bir durumdadır. Yazarlar da ilgili teknolojilerin bu iki kavram doğrultusunda değerlendirilmesi adına çalışmalar yapılması

gerektiğini ifade etmektedirler. Grafikler ve tablolarla desteklenen bu çalışma çok geniş alanı kapsaması, LPWAN teknolojisinin en popüler yöntemlerini içermesinin yanı sıra GPRS teknolojisini de barındırması sebebiyle çok kapsamlı bir çalışmadır.

Seye vd. (2017), yaptıkları çalışmada Senegal'in en küçük (83 km²) ve en kalabalık bölgesi olan Dakar Yarımadası'nda LoRaWAN'ın performansını değerlendirebilmek adına bir dizi testler gerçekleştirmişlerdir. Bu doğrultuda Yarımada'nın farklı bölgelerinde ve farklı yüksekliklerde bulunan dört binanın tepesine dört ayrı ağ geçidi konumlandırılmış ve bir adet mobil cihaz aracılığı ile sinyal kalitesi, kapsama alanı, paket kayıp oranları gibi parametreler gözlemlenmiştir. Bu mobil cihaz ile yaklaşık 40 km alan taranmıştır. Sonuçlara bakıldığında bu parametrelerin ağ geçidinin bulunduğu yükseklikten ve binaların etrafında bulunan engellerden etkilendiği görülmektedir.

Her ağ geçidi için kapsama alanı ve RSSI değerlerinin çizdirildiği çalışmada bunun yanı sıra tüm ağ geçitleri için paket kayıp oranları ve RSSI değerlerinin 2, 4, 6 ve 8 km mesafelerde nasıl değiştiği de belirtilmiştir. Tüm sonuçlar mesafe arttığında paket kayıp oranının arttığını ve sinyalin kalitesinin azaldığını göstermektedir. Çalışma literatürde bulunan çoğu çalışmanın aksine birden fazla ağ geçidi ile kapsam haritasının çıkarılabilmesi dolayısıyla farklı bir bakış açısı oluşturmaktadır. Şehrin kapsayıcılık haritasını oluşturabilmek değerli bir çıktıdır. Ancak çalışmada belirtildiği üzere SF değerinin sürekli olarak 12 olarak ayarlanması veri hızını yavaşlatıp cihazı çok fazla yoracağından bunun doğru bir değerlendirme yapılmasının önüne geçeceği düşünülmektedir. Ayrıca bu durum kanalın sürekli işgal olmasını ve pil ömrünün buna bağlı olarak etkilenmesini de beraberinde getirecektir.

Sinha vd. (2017), LPWAN teknolojilerinden olan NB-IoT ve LoRa'nın teknik özelliklerine (fiziksel özellikler, ağ mimarisi, MAC protokolü) değinmişlerdir. Ardından bu iki teknolojiyi belirli IoT faktörleri çerçevesinde kıyaslamışlardır. İlgili çalışmada IoT çözümleri kendi içinde dört temel kategoriye ayrılmış ve her kategoride bulunan alt başlıklar, nedenleriyle birlikte hangi teknoloji için daha

uygundur sorusuna yanıt verilmiştir. Örneğin ilgili makalede bu tezdeki çalışmanın da kapsamını oluşturan akıllı ölçümün mesafe, çeşitlilik, gecikme ve hizmet kalitesi parametreleri değerlendirildiğinde NB-IoT çözümü ile daha iyi sonuçlar vereceği ifade edilmiştir.

Çalışmanın bir bölümünde LoRaWAN ağına bağlı düğümlerin tek ve belirli bir ağ geçidi ile ilişkilendirilmediğine değinilmiştir. Bir düğüm tarafından iletilen bir veri birden çok ağ geçidi tarafından alınarak ağ sunucusuna iletilmektedir. Bu durumda yinelenen bu paketleri filtrelemek, güvenliği kontrol etmek gibi görevler de ağ sunucusunun üzerine atanmış bulunmaktadır. Aslına bakılırsa bu durum, bir kişinin konuşmasını dinlemek için birden fazla kişinin görevlendirilmesine benzetilebilir. Bir kişinin telefonla konuşması gerektiğinde diğerleri dinlemeye devam edeceklerinden söylenen hiçbir sözcüğün kaçırılmaması sağlanmış olacaktır. Bu da veri kayıplarını en aza indirgeyecektir. Ayrıca çalışmada, NB-IoT ve LoRa'nın çeşitli ülkelerdeki mevcut durumlarına değinildikten sonra iki çözümünde farklı uygulamalar için avantajları ve dezavantajları olduğu belirtilmiştir.

Fujdiak vd. (2018), Xirio, CRC (Kapsam Tahmin ve Analiz Yazılımı), MR (Mobil Radyo) ve TC (Kule Kapsamı) isimli dört adet simülasyon aracını LoRaWAN teknolojisi çerçevesinde değerlendirmişlerdir. Bu noktada ilgili simülasyon araçlarının hücresel teknolojiler gibi birçok farklı teknolojinin kapsam analizini kesin olarak tahmin etmek adına zaten mevcutta kullanıldıkları belirtilmelidir. Simülasyon yeri olarak Çek Cumhuriyeti'nde yer alan Brno Teknoloji Üniversitesi'nin kampüsü kullanılmıştır. Ayrıca kapsam analizinin tek ağ geçidi referans alınarak yapıldığını belirtmekte fayda bulunmaktadır. İlgili araçların detaylı analizi ve simülasyon modellerine değinildikten sonra belirtilen bölgede dört araçla da simülasyonlar yapılmış ve sonuçlar grafiklerle ifade edilmiştir.

Sonuçlar araçların çoğunun yeni LPWAN teknolojileri için henüz hazır olmadığını gözler önüne sermektedir. Yalnızca Xirio aracı kullandığı modülasyon teknikleri ile LoRaWAN teknolojisini daha doğru şekilde simule etmiş görünmektedir. Zaten diğer araçlara göre kapsamada çok daha ümit verici sonuçlar vermiştir.

Simülasyon araçlarının özellikle kullanılacak ağ geçidi sayısını belirlemek söz konusu olduğunda planlamanın ve maliyet analizinin en doğru şekilde yapılabilmesi için ne derece önemli olduğu su götürmez bir gerçektir. 2018 yılında yapılan bu çalışmada henüz hazır olmadığı belirtilen araçların güncel tarihli olarak yeniden incelenmesi ve giderek yaygınlaşan LPWAN teknolojileri için kullanılabilir olup olmadıklarının netleştirilmesi önem arz etmektedir.

Muzammir vd. (2019), çalışmalarında LoRaWAN'ın iç mekân performansını ölçmek adına bazı deneyler yapmışlardır. Çalışma, bir adet LoRa ağ geçidi ve Malezya'nın Shah Alam şehrinde bulunan bir binada farklı katlara yerleştirilmiş birden çok uç düğüm aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın asıl amacı farklı SF değerleri, RSSI ve paket kayıp oranlarını gözlemlemektir. Sonuçlar incelendiğinde 7 ile 12 arasında değerler alan SF arttığında buna periyodik olarak iletim süresinin de arttığı sonucuna varılabilir. Bu durum aslında ağ geçidi ile uç düğümler arasındaki mesafenin artmasının da paket aktarımını güçlendirdiğini göstermektedir. RSSI değerleri incelendiğinde ise ağ geçidi ile düğüm arasındaki mesafe azaldıkça sinyal kalitesinin güçlendiği gözlemlenmektedir. Son olarak ise paket kayıp oranının iletilen mesafe arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır.

Çalışmada deneylerin kaç kere tekrarlandığı, her düğüm için toplamda kaç paket gönderildiği, ağ geçidinin içeriye mi dışarıya mı konulduğu gibi soruların yanıtlarına yer verilmediği için ilgili çalışma kapsamlı bir fikir oluşturamamaktadır. Ancak gerek bir adet ağ geçidi gerekse de farklı katlarda konumlandırılmış uç düğümler aracılığı ile elde edilen SF ve RSSI değerlerine yer verilmiş olması bu tez ile benzerlikler kurulmasına neden olmaktadır.

Campo vd. (2019), güç dağıtım şebekelerindeki izleme sisteminin geliştirilmesi adına ortaya konmuş olan MAIGE (Gaz ve Elektrik Altyapıları ve Dağıtımı İçin Gelişmiş İzleme Sistemi) projesinden bahsetmektedirler. Bu proje kapsamında incelenen elektrik şebekesi tesislerinin bazı alanlarında güç ve internet altyapısı bulunmasına karşın bazı bölgelerinde ikisine de rastlanmadığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca bu alanlara yerleştirilen farklı tipteki sensörlerin veri gönderme sıklığı, veri hızı, çift yönlü iletişim talebi gibi gereksinimleri de birbirinden farklıdır. Bu sebeplerden dolayı yazarlar ilgili çalışmada hibrit bir 3G/4G, LoRa ve Sigfox iletişim mimarisi önermektedirler. Önerilen mimaride toplanan veriler SCADA (Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama) sistemine iletmeli ve bu sistemde tüm sensörlerden gelen veriler haberleşme teknolojilerinden bağımsız olarak tek bir standartta toplanmalıdır. Özellikle Sigfox ve LoRa teknolojilerinin ön planda bulunduğu çalışmada gelecekte 5G'nin yaygınlaşması ile birlikte NB-IoT'nin kapsamının da artacağı ve hangi LPWAN teknolojisinin ön plana çıkacağının saptanabilmesi adına detaylı bir çalışmanın gerekliliği ifade edilmiştir.

Kabalci ve Ali (2019), LPWAN çatısı altında bulunan LTE-M, NB-IoT, LoRa ve SigFox UNB (Ultra Narrow Band) haberleşme teknolojilerini incelemektedir. İlgili çalışmada bu teknolojiler lisanslı (SigFox UNB ve LoRa) ve lisanssız (NB-IoT ve LTE-M) spektrum olarak iki gruba ayrılmıştır. Bu tezin kapsamını oluşturan LoRa ve NB-IoT iletişim protokollerinin ayrıldığı en temel noktalardan birinin de spektrumun lisanslı olup olmamasıdır. Makalede lisanssız spektrumun en önemli üstünlüğünün lisanslı spektruma nazaran daha düşük maliyet avantajı olduğunun altı çizilirken, kontrol dışı müdahale garantisinin bulunmaması da lisanslı spektrumu ön plana çıkaran etken olarak ifade edilmektedir. Ayrıca çalışmada her bir çözümün teknik özelliklerine değinilmiş ve bu teknolojiler belirli kıstaslar doğrultusunda kıyaslanmıştır. Sonuç olarak enerji yönetimi, maliyet, ölçeklenebilirlik gibi belirsizliklerin netleşmemesi dolayısıyla hangi teknolojinin ön plana çıkacağının henüz öngörülmediği ifade edilmiştir.

Mekki vd. (2019), LPWAN çatısı altında bulunan NB-IoT, LoRa ve Sigfox haberleşme teknolojilerinin kapsamlı bir karşılaştırmasını yapmışlardır. İlgili çalışmada ilk olarak Sigfox, LoRa ve NB-IoT haberleşme teknolojilerinin teknik özellikleri açıklanmakta, sonrasında bazı kıstaslar çerçevesinde kıyaslanmakta ve en son olarak ise farklı IoT uygulamaları değerlendirilerek bu uygulamalar için en uygun çözümün hangisi olduğu tespit edilmektedir.

Bu çalışmada üç teknoloji de hizmet kalitesi, pil ömrü ve gecikme, ölçeklenebilirlik ve veri miktarı, ağ kapsamı ve menzil, dağıtım modeli ve maliyet gibi faktörler çerçevesinde kıyaslanmıştır. Sonrasında bazı IoT örneklerinden olan elektrikli ölçüm, akıllı tarım, otomasyon, akıllı bina, perakende satış noktası terminalleri ve lojistik için palet takibi gibi uygulamalar için hangi çözümün daha uygun olduğuna dair kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır.

Bu değerlendirmeler sonucunda bazı durumlarda LoRa, Sigfox ya da NB-IoT teknolojilerinden bir tanesinin daha avantajlı olduğu ifade edilirken bazı durumlarda ise hibrit çözümlerin uygunluğuna değinilmiştir. Mesela akıllı tarım uygulamalarında sensörlerin pil ömürlerinin önemi, birçok çiftlikte LTE hücrel kapsama alanlarının bulunmayışı ve cihaz güncelleme sıklığına dikkat çekilerek LoRa ve Sigfox teknolojilerinin NB-IoT'ye kıyasla daha yaygın kullanılabileceği ifade edilirken perakende satış noktası terminallerinin ise sürekli elektrikli güç kaynağına sahip oluşu dolayısıyla pil ömrü üzerinde herhangi bir kısıtlama olmayışı, düşük gecikme gereksinimi ve garantili hizmet kalitesi gerekliliği dolayısıyla NB-IoT'nin daha uygun olduğuna dikkat çekilmiştir. Otomasyon sistemlerinde ise çeşitli sensör türleri ve iletişim gereksinimleri dikkate alınarak hibrit çözümün gerekliliği gözler önüne serilmektedir.

Cho vd. (2019), IALA tarafından gemi trafiğinin güvenli seyrini sağlamak için geliştirilen AtoN (Marine Aid to Navigation) AIS (Automatic Identification System) sisteminin bazı dezavantajlarını ortadan kaldırmak için NB-IoT teknolojisini AtoN sistemine uygulamaktadırlar. İlgili teknoloji iki farklı senaryoda test edilmiştir. İlk senaryo akıllı bir fabrikada bulunan sensör verilerinin son kullanıcıya ulaşmasını kapsamaktadır. İkinci senaryoda ise demiryoluna kurulan sistem Demiryolu İzleme Merkezi tarafından tren konumlarının izlenmesini sağlamaktadır. Testlerin sonucunda AtoN NB-IoT sisteminin AtoN AIS sistemine nazaran birçok avantajı olduğu ifade edilmektedir. Ancak önerilen bu sistemin başarımlı parametreleri teknik olarak detaylandırılmamaktadır. Bu sebepten dolayı teknik olarak yeterlilik düzeyi kısıtlıdır.

Paredes vd. (2019), LoRa teknolojisinin kentsel ortamdaki performansını ölçmek adına bir dizi testler gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda İtalya'da seçilen pilot bölgelerde üç farklı senaryo üzerinde gözlemler yapılmıştır. İlk iki kurulum farklı noktalarda konumlandırılan alıcı ve vericilerden oluşan noktadan noktaya iletişim tekniği, üçüncü kurulum ise bir alıcı ve birden çok vericiden oluşan bir yıldız topolojisi modelidir. İlk iki kurulum bu tezin kapsamına dair bir örnek oluştururken üçüncü kurulum şehrin geneline yayılmış sayaçların akıllandırılması noktasına bir örnek teşkil etmektedir. Tüm bu testlerde SNR (Sinyal Gürültü Oranı, Signal-to-noise ratio), RSSI, kayıp paket oranı, spektrum analizi ile alınan güç gibi parametreler kaydedilmiştir. Sonuç olarak LoRa tabanlı bir ağın kentsel ortamda farklı amaçlar için kullanılabilirliği gözlemlenmiştir.

Tang vd. (2019), UPIoT (güçlü nesnelerin interneti) kavramından bahsetmektedirler. Çin Devlet şebekesi tarafından önerilen bu kavram akıllı şebeke için seçilebilecek en iyi teknolojiyi ifade etmektedir. İlgili çalışmada UPIoT misyonu doğrultusunda şebeke arıza durumu izleme sistemi için hibrit bir NB-IoT ve LoRa ağı önerilmektedir. Önerilen bu sistem sensör, alt düğüm, ana düğüm ve sunucu olarak dört temel bileşenden oluşmaktadır. Sensör akım ve voltaj verilerini toplayarak bunu seri port aracılığıyla alt düğüme iletir. Alt düğüm bu verileri LoRa iletişim protokolüyle ana düğüme gönderir. Ana düğüm ise gönderilen bu verileri işledikten sonra NB-IoT iletişim modülü aracılığıyla bulut sunucusuna gönderir. Yazarların bu önerisi mevcut literatüre nazaran farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Normal şartlar altında LoRa ağ geçidine iletilen veriler bir ana taşıyıcı aracılığıyla (hücreli, Wi-Fi, uydu ya da Ethernet) bulut tabanlı ağ sunucusuna iletilirken yazarların önerisinde bu aşamada NB-IoT'den faydalanılabileceği sonucuna varılmaktadır. Bu önerinin uygulanabilirliği noktasında soru işaretleri bulunmaktadır. Çalışmada yapılan tüm analizler sonucunda LPWAN'ın ve hatta hibrit LoRa/NB-IoT çözümünün UPIoT için gelecek vadettiği sonucuna varılmıştır.

Malik vd. (2019), NB-IoT'nin dış mekân, iç mekân, derin iç mekândaki kapsam analizini yapmak adına Tallinn Teknoloji Üniversitesi (Estonya) ve komşu yerleşim alanlarını kapsayan yaklaşık 700 metrelik alanda deneyler

yapmışlardır. Ölçümler 20 adet NB-IoT destekli cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Her cihaz mesafe, RSSI ve SNR değerlerini içeren veri paketlerini her 10 dakikada bir baz istasyonuna iletmektedir. Çalışmada her bir parametre için ısı haritalarına, tablolara ve grafiklere yer verilmiştir.

Dış mekân ölçümlerine göz gezdirilecek olursa eğer RSSI değerlerinin -60,5 dBm ile -110 dBm arasında değiştiği ve neredeyse tüm alanın kapsanabildiği görülmüştür. İç mekânda sonuçlar -72 dBm ile -110 dBm aralığına ulaşmıştır ve kesintiye uğrayan cihaz sayısı dış mekânda 1 iken iç mekânda 3 olarak görülmektedir. Bunun nedeni olarak kullanılan yapı malzemesi, antene yakınlık ya da antenden yayılan ışının yönü gibi parametreler gösterilmiştir. Ayrıca bu ölçümler günün sabah ve akşam saatlerinde tekrarlandığında da farklı sonuçlar alınmıştır.

Derin iç mekân senaryosuna bakılacak olursa eğer sonuçların hiç iç açıcı olmadığı görülebilir. RSSI değeri -78 ile -110 dBm olarak kaydedilirken kesintili cihaz sayısı sekize yükselmiştir. Ayrıca 400 metreden sonra cihazların çoğuna ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Çalışmada dış mekândan iç mekâna, iç mekândan da derin iç mekâna ilerleyişlerde RSSI değerlerinin düşüşü ve paket kayıp oranlarının artışı teorik olarak da beklenen bir sonuçtur. Bina yapısının analiz edilmesi ve katlar arası sinyal geçişine engel teşkil eden durumların belirtilmesi de ilgili teknolojiyi değerlendirmede önemli bir çıktı oluşturacaktır.

Podar vd. (2020), NB-IoT ve SigFox'un kapsamına dair deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde NB-IoT için RSSI, RSRP (Reference Signal Receive Power, Alınan Referans Sinyali Gücü), RSRQ (Reference Signal Received Quality, Alınan Referans Sinyali Kalitesi) değerleri hesaplanırken SigFox için yalnızca RSSI değeri ölçülmüştür. Testler Estonya'nın iki kentinde bulunan iki üniversite kampüsünde gerçekleştirilmiş ve her bölge dış mekân, iç mekân, derin iç mekân olarak üç farklı senaryo çerçevesinde değerlendirilmiştir. Ayrıca NB-IoT'de iki farklı operatörden destek alındığı için sonuçlar operatör A ve operatör B diye iki ayrı şekilde ifade edilmiştir.

Grafiklerle desteklenen bu çalışmada sonuçlara göz atmak gerekirse dış mekân ve iç mekân ölçümlerinde hem Sigfox'un hem de NB-IoT'nin umut verici sonuçlar doğurduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra NB-IoT, derin iç mekân söz konusu olduğunda iki kampüste farklı paket kayıp oranlarına sahip olmuştur. Ayrıca derin iç mekânda NB-IoT'nin paket kayıp oranının Sigfox'a göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde yer alan birçok çalışma bu gibi deneysel gözlemlerde yalnızca RSSI veya SNR değerlerini içermektedir. Yazarlar özellikle RSSI değerinin tek başına yeterli olamayacağını öne sürerek RSRP ve RSRQ değerlerini de gözlemlemiştir. Bu değerlerin dış, iç ve derin iç mekân olarak farklı konumlarda değerlendiriliyor oluşu ilgili teknolojilere geniş bir çerçeveden bakılabilmesini sağlamıştır. Bu doğrultuda oldukça kapsamlı bir çalışmadır.

Jia vd. (2020), akıllı kentleşmenin önemli bileşenlerinden birinin de kentten çıkarılan çöplerin takibinin akıllandırılması olduğunu savunmaktadırlar. Bu doğrultuda sensörlerle donatılmış olan Akıllı Çöp Kutularının takibini sağlamak için NB-IoT haberleşme teknolojisinden destek alınmıştır. Çin'de farklı bölgelerde bulunan on çöp kutusundaki veriler NB-IoT aracılığı ile toplanmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Çalışmada Akıllı Çöp Kutusu sistemi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiş olmasının yanı sıra NB-IoT teknolojisinin diğer LPWAN teknolojilerine göre avantajlarına değinilmiş ve bu teknolojinin seçilme gerekçeleri ifade edilmiştir. Uygulamanın sonucunda uzun mesafeli veri iletimi, düşük güç tüketimi ve düşük maliyet gibi parametreler değerlendirildiğinde NB-IoT'li Akıllı Çöp Kutularının iyi bir uzaktan izleme yapmaya olanak tanıdığı gözlemlenmiştir.

Winalisa ve Nashiruddin (2020), Endonezya'da bulunan, yüzölçümü 1.038.84 km² ve nüfusu 1.107.551 olan Batam Adası'nda halka açık hizmetler için NB-IoT simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı NB-IoT ağ planlamasının yapılabilmesidir. Simülasyon için Forsk Atol 3.2.2 isimli bir yazılım kullanılmış ve uzun vadede bir planlama için on yıllık tahmini cihaz sayısı belirlenmiştir. Simülasyon öncesi ihtiyaç duyulacak olan ağ geçidi sayısının hesaplanabilmesi adına toplam hizmet sayısı, hane yoğunluğu/km², cihaz sayısı/hane gibi parametreler değerlendirilmiş ve sonrasında Londra Modeli aracılığı 32 hücrenin

yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Bu durumda Batam Adası'nda bulunan halka açık cihazları kapsamak için 11 baz istasyonu yeterli olacak gibi görünmektedir.

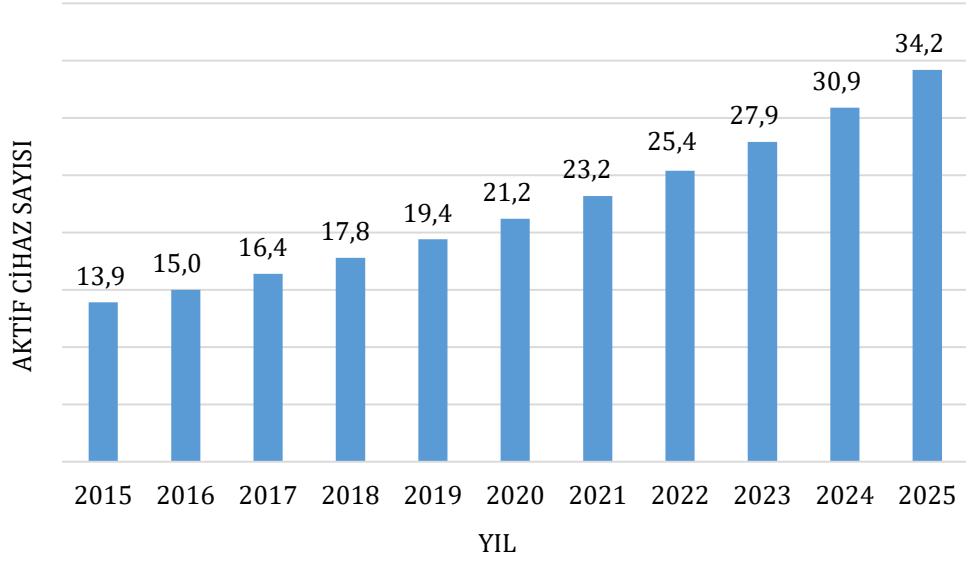
Bu tespit sonrasında Forsk Atol aracı ile kapsam tahmini ve RSSI değerleri hesaplanmış, ardından RSSI seviye histogramı çizdirilmiştir. Sonuçlar ümit verici düzeydedir ve tüm grafiklere bakılarak önerilen ağ tasarımının gereksinimleri karşıladığı sonucuna varılabilir. Tabii bunun bir simülasyon olduğu ve daha iyi sonuçlar için gerçek bir test ortamının kurulmasının gerektiği belirtilmelidir. Ancak geniş alanlarda uygulanması planlanan bu ve benzeri teknolojiler için kaç tane baz istasyonunun gerekeceğinin teorik olarak önceden hesaplanabilmesi ağ planlaması ve maliyet analizi yaparken çok önemlidir.

3. TEORİ

Bu bölümde LPWAN çatısı altında bulunan LoRa ve NB-IoT haberleşme teknolojilerinin detaylı bir araştırmasına yer verilmiştir. Çalışmanın daha iyi kavranabilmesi ve seçimlerin nedenlerinin algılanabilmesi adına bu alanda ilgili teknolojilerin teknik detaylarına değinilmiştir. İlgili bölüm kendi içinde üç ana parçaya ayrılmış ve bu parçalar da sırasıyla LPWAN teknolojisi, LoRa ve NB-IoT haberleşme teknolojilerini içerecek şekilde düzenlenmiştir.

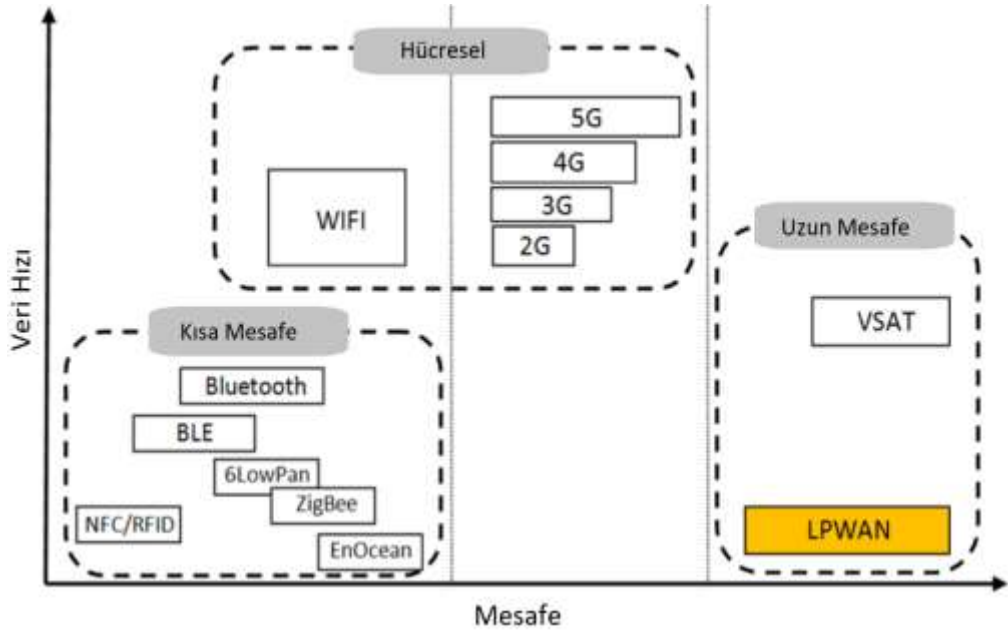
3.1. LPWAN Teknolojilerine Genel Bir Bakış

Dünya çapında internete bağlı cihaz sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 3.1’de de görüleceği üzere 2020 yılında 21 milyarı aşkın internete bağlı cihaz sayısının 2025 yılında 34 milyarın üzerine çıkacağı öngörülmektedir (Lueth, 2018). IoT (Internet of Things, Nesnelerin/Şeylerin İnterneti) pazarının her geçen gün kalabalıklaşması ve internete bağlı IoT’li cihazların öngörülebilir talepleri değerlendirildiğinde özellikle enerji verimliliği yüksek ve uzun mesafelere veri iletimi yapabilen haberleşme teknolojilerine ihtiyacın ne denli önemli olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu talepler doğrultusunda birçok çözüm düşünülmüş ve hayata geçirilmiştir. Bu çözümlerden biri de LPWAN teknolojisidir. Bu teknoloji isminden de anlaşılacağı üzere temelde düşük güç tüketimini ve geniş bir alan kapsayıcılığını hedefleyen bir çatı işlevi görmektedir.



Şekil 3.1. Dünya’da Toplam Aktif Cihaz Bağlantı Sayısı (Lueth, 2018)

Bu noktada LPWAN’ın diğer haberleşme teknolojileri ile kıyasının yapılabilmesi adına Şekil 3.2 incelenebilir. Bu görselden de anlaşılacağı üzere hücreli (Wi-Fi, 2G, 3G, 4G ve 5G) ve kısa menzil (Bluetooth, BLE, 6LowPan, ZigBee, EnOcean, NFC/RFID) radyo iletişim yöntemlerine nazaran LPWAN oldukça yüksek menzilli bir veri iletimi yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tabii bu durum LPWAN çatısı altında bulunan her teknoloji için kentte ve kırsal alanda farklıdır. Ayrıca bu başarıyı elde edebilmek adına bu teknolojilerin bazı parametrelerden feragat etmesi de gerekmektedir. Bunlardan biri de hiç kuşkusuz veri hızıdır.



Şekil 3.2. Radyo İletişim Teknolojilerinin Menzil Kapasitesine Göre Veri Hızı
(Mekki vd., 2019)

Şekil 3.2'deki veri hızları değerlendirilecek olursa eğer LPWAN'ın hüreselin çok gerisinde kaldığı; kısa mesafe iletişim yöntemlerinden birçoğu ile de arasında hız farkı bulunduğu sonucu çıkarılabilir. Bu sonuç aslında yüksek veri hızı ve çok düşük gecikme oranı talep eden akıllı ulaşım, lojistik, video izleme (Adelantado vd., 2016) gibi birçok farklı uygulamada LPWAN teknolojilerinin kullanılamayacağı, kullanılsa dahi verimli sonuç alınamayacağını göstermektedir. Bu sebepten dolayı teknolojilerin seçileceği uygulamalar için veri hızı, iletim mesafesi, pil ömrü gibi parametreler içerisinde bir önceliklendirme yapılması ve bu önceliklendirme listesine uygun haberleşme teknolojisinin seçilmesi günün sonunda her anlamda verimli bir çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

LPWAN teknolojisi altında birbirinden farklı iletişim protokolleri bulunmaktadır. Bunlardan her biri kendi içinde bant genişlikleri, menzil mesafeleri, pil ömürleri, kullandıkları spektrum türleri, fiyatlandırma politikaları gibi değişkenler değerlendirildiğinde farklı IoT çözümleri için pazarda rekabet halinde bulunmaktadır. Çalışmanın bu kısmında Dünya çapında kullanımına en çok rastlanan LoRa, Sigfox ve NB-IoT'nin kıyasına yer verilmiştir. Bu kıyasın LPWAN'a daha geniş perspektiften bakılabilmesini kolaylaştıracağı düşünülmektedir.

LoRaWAN 2009 yılında Cyclo adlı bir Fransa girişimi aracılığıyla ilan edilmiş ve 2012 yılında Semtech tarafından satın alınmıştır. Ayrıca 2015 yılında LoRa-Alliance tarafından standartlaştırılması tamamlanmıştır. LoRaWAN'ın tanıtılmasından yaklaşık bir yıl sonra yani 2010 senesinde Fransa'da bir şirket olan Sigfox şirketi Sigfox'u duyurmuştur. NB-IoT ise bir 3GPP standardıdır ve 2016 yılında 13. Sürüm olarak yayınlanmıştır. Üç radyo iletişim teknolojisi de şu anda Dünya genelinde kullanılmaya devam etmektedir (Lalle vd., 2019).

Şekil 3.3 incelendiğinde Sigfox, LoRa ve NB-IoT'nin farklı IoT faktörleri çerçevesinde kıyaslandığı görülebilir. Şekilde ifade edilen ölçeklenebilirlik, mesafe, kapsayıcılık, yayılım/dağıtım, maliyet, pil ömrü, hizmet kalitesi, yük uzunluğu ve gecikme faktörleri bir IoT uygulaması için gerekli olan neredeyse tüm parametreleri içermektedir.



Şekil 3.3. Sigfox, LoRa ve NB-IoT'nin Kıyas Diyagramı (Mekki vd., 2019)

Detaylandırılmaya geçilmeden önce LoRa ve Sigfox'un lisanssız ISM (Industrial Scientific Medical, Sınai, Bilimsel ve Tıbbi Cihaz) bandını, NB-IoT'nin ise lisanslı bir spektrum kullandığını belirtmek gerekmektedir (Mekki vd., 2019). Yani LoRa ve Sigfox Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu Avrupa'da 868, Kuzey Amerika'da 915 ve Asya'da 433 MHz ISM bandında; NB-IoT ise lisanslı LTE (Long-Term

Evolution, Uzun Vadeli Evrim) frekans bandında çalışmaktadır. Bu, NB-IoT teknolojisini tercih edecek olanların fazladan lisanslı frekans bedeli ödemesi gerekeceğini gösterse de Şekil 3.3'e bakıldığında bu durum QoS (Quality of Service, Hizmet Kalitesi) faktörü çerçevesinde değerlendirildiğinde NB-IoT'yi öne taşımıştır.

Şekil 3.3'de pil ömrü, maliyet, dağıtım, kapsayıcılık ve mesafe faktörlerine bakılacak olursa eğer NB-IoT'nin QoS'nin aksine LoRa ve Sigfox'a göre geride kaldığı görülebilir. Yük uzunluğu, gecikme ve ölçeklenebilirlikte ise tam aksi bir seyir göstermiştir. Bunların gerekçeleri detaylandırılabilir. Ancak bu tez çalışmasının çerçevesinin dışına çıkmamak adına bu kadar açıklama yeterli görülmektedir. Fakat gerçekleştirilmesi planlanan uygulamadan beklentinin ne olduğunun belirlenmesinin doğru teknoloji seçimini kolaylaştıracağı da belirtilmelidir.

Örnek olarak pil ömrü ya da maliyet gibi faktörlerin geri planda kaldığı ve hizmet kalitesinin, gecikme periyodunun ve veri hızının ilk öncelik olduğu uygulamalarda Şekil 3.3'deki görsel üzerinde teorik bir değerlendirilme yapılacak olursa eğer NB-IoT'nin tercih edilmesi daha uygun görülmektedir. Bunun yanı sıra pil ömrü ve maliyet gibi faktörlerin ilk öncelik olduğu, hizmet kalitesinin pek önem arz etmediği durumlarda ise LoRa ya da Sigfox'un tercih edilmesinin daha doğru olacağı görülmektedir. Ancak tüm bunların teorik değerlendirmeler olduğu ve gerçek bir uygulamada teori ile örtüşen ya da çarpışan alanların bulunabileceği ihtimalinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasının çıktıları da gerçek ölçüm sonuçları ile teori arasındaki bağlantıyı ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır.

Bu bölümün amacı LPWAN teknolojisine dair genel bir bakış açısının oluşmasını sağlamak olduğu için bu çatı altında bulunan teknolojilerin kullanımı en yaygın olan üç iletişim yöntemine değinmek uygun görüldü. Teorik bir özeti barındıran bu kısımda LoRaWAN, Sigfox ve NB-IoT'den bahsedildi. LoRa ve NB-IoT için detaylı bilgilendirmeye sırasıyla Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'de yer verilecektir. Sigfox için çalışmanın ana ögesi olmadığı için bu kadar bilgilendirme yeterlidir.

3.2. LoRa ve LoRaWAN'a Genel Bir Bakış

Bölüm 3.1'de de bahsedildiği gibi LoRa 2009 yılında Cyclo adlı bir Fransa girişimi aracılığıyla ilan edildi ve 2012 yılında Semtech tarafından satın alınarak patentlendi. Ayrıca 2015 yılında LoRa-Alliance tarafından standartlaştırılması tamamlandı. Şu anda 162 ülkede açık topluluk, özel ya da bir ağ operatörü aracılığı ile yönlendirilen olmak üzere toplamda 148 LoRaWAN ağ operatörü bulunmaktadır (LoRa Alliance, 2021). Bundan önceki bölümlerde de değinildiği gibi LoRa, LPWAN çatısı altında gösterilebilecek bir iletişim yöntemidir ve bu haliyle temelde düşük güç tüketiminin yanı sıra uzun menzil iletişimi de desteklemek gibi bir amaca hizmet etmektedir. LoRa Avrupa'da 868 MHz, Kuzey Amerika'da 915 MHz ve Asya'da 433 MHz lisanssız ISM bandında çalışmaktadır. LoRa bir fiziksel katman radyo teknolojisidir. LoRaWAN ise LoRa'nın MAC katmanıdır. LoRaWAN, LoRa Alliance tarafından önerilmiştir.

3.2.1. LoRa yayılma faktörü (SF) ve Shannon-Hartley teoremi

LoRa teknolojisini iyi kavrayabilmek adına LoRa'nın yayılma faktörüne değinmekte fayda bulunmaktadır. LoRa CSS (Chirp Spread Spectrum, Chirp Yayılı Spektrum) modülasyonunu kullanan bir yayılı spektrum şemasıdır. Ayrıca sabit bir kanal bant genişliği içinde veri hızını ve hassasiyetini seçebilme yeteneğine sahiptir (Semtech, 2015). Yani ağ performansını en iyi düzeyde tutabilmek adına değişken bir veri hızı uygulayabilmektedir. SF, Avrupa'da 7 ile 12 arasında toplamda 6 adet değişken değere sahip olabilmekte ve bu da veri iletiminde 6 farklı veri hızının seçilebilir olduğunu göstermektedir. Bu kavramı biraz daha açmak adına Semtech tarafından yayınlanan raporda bahsedilen Shannon-Hartley teoremini incelemek gerekecektir.

Shannon-Hartley teoremi temelde gürültülü ortamda verinin belirli bir bant genişliğine sahip bir kanal üzerinde gönderilebileceği azami hızı ifade eder. İlgili teorem aslında iletişim bağlantıları için kanal kapasitelerinin ve gürültü faktörünün bulunduğu ortamlarda belli bir bant genişliğinde verinin

iletilebileceği azami hızın belirlenmesinde kullanılır (Semtech, 2015). Denklem 3.1’de Shannon-Hartley teoreminin formüle edilmiş haline ulaşılabilir.

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

Burada C ve B sırasıyla kanal kapasitesi (bit/saniye) ve kanal bant genişliğini (Hertz, Hz), S ortalama alınan sinyal gücünü (watt), N ortalama gürültü veya girişim gücünü ifade eder. S/N ise sinyal gürültü oranı hesabı için kullanılmaktadır (Semtech, 2015).

Formül yeniden düzenlenecek olursa eğer Denklem 3.2’de gösterildiği hali alacaktır.

$$\frac{C}{B} = 1,433 \times \frac{S}{N} \quad (3.2)$$

Yaygın uygulamalar düşünüldüğünde $S/N \ll 1$ olduğu sonucuna varılabilir. Bu da sinyal gücünün genellikle gürültünün altında kalmasından kaynaklanmaktadır (Semtech, 2015). Bu doğrultuda Denklem 3.2’de yazılı olan ifade bir adım ileriye taşınacak olursa eğer aşağıdaki hali alacaktır:

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

Denklem 3.3 incelendiğinde sinyal bant genişliğinin artması ile bir radyo kanalındaki sinyal gürültü oranında meydana gelecek bozulmaların iyileştirilebileceği çıkarılabilir. Ya da tersten bakıldığında kanal kapasitesi (C) yani bir iletişim kanalının iletebileceği maksimum veri hızı arttıkça sinyal gürültü oranındaki bozulmaların önüne geçme olasılığının düştüğü söylenebilir.

LoRa’nın farklı SF değerlerinde iletim yapma durumu da tam olarak burada ortaya çıkmaktadır. Veri iletiminde bir sıkıntı varsa, ortamdaki gürültüden etkilenme fazlaysa, ağ geçidi ile uç düğümler arasındaki iletişimde aksaklıklar varsa LoRa veri hızını yavaşlatmaktadır. Bunu bir örneğe benzetmek gerekirse

eğer uzak noktadaki birinin söylenenleri algılaması için daha yavaş konuşulmasının, kelimelerin üzerine daha çok basılmasının gerekliliği düşünülebilir. Bu durumda SF değeri 12'ye yaklaştıkça aslında veri hızının düştüğü ve LoRa'nın paket kaybını minimize etmek için çabaladığı anlaşılabılır. Bu durum veri iletiminde paket kayıplarının en aza indirgenmesi noktasında telafi ediciliği yüksek bir durum olarak değerlendirilebilir. Ancak SF değerinin sürekli olarak 12 olması da aslında iletilen veri ile ağ geçidi arasındaki iletişim kopukluğunun bir göstergesi olacağından durumun nedenleri iyice değerlendirilmelidir.

Bunların yanı sıra SF değerlerinin değişkenliği ağın toplam kapasitesini verimli kullanmak ve pil ömrünü dengelemek için de LoRa'nın başvurduğu yöntemlerden biridir. Çünkü tek bir kanalda farklı SF değerlerine sahip sinyaller aynı anda birbirlerini manipüle etmeden çalışabilmektedir. Ağ geçidine yakın olan veya veri iletiminde herhangi bir sıkıntı yaşamayan bir düğümün oldukça yavaş bir veri hızı kullanarak kanalı sürekli işgal etmesinin hiçbir anlamı bulunmamaktadır. Hızlı bir şekilde veri iletilir ve veri iletiminde sıkıntı yaşayan diğer cihazlar için kanal hazır bırakılır. Bu da bir denge oluşturmaktadır.

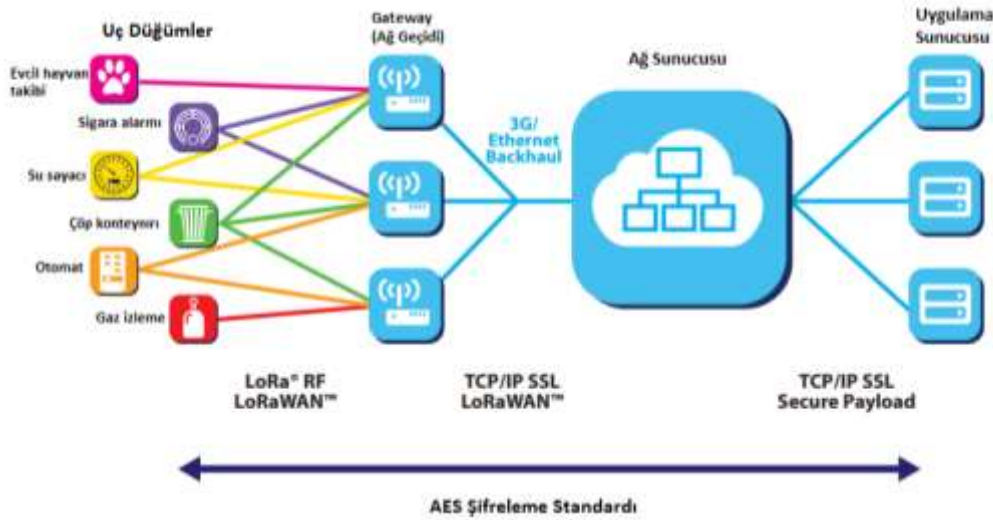
3.2.2. LoRa ve LoRaWAN

LoRa, uzun mesafede iletim yapılması adına kullanılan fiziksel katman ya da kablosuz modülasyon yöntemidir. LoRa, geleneksel kablosuz teknolojilerin fiziksel katmanda kullandığı FSK (Frequency-shift keying, Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) modülasyonun aksine iletişim aralığının gözle görülebilir bir farkı bulunan CSS modülasyonunu kullanmaktadır. CSS modülasyon FSK modülasyon gibi düşük güç tüketimi yeteneğine sahip olmasının yanı sıra buna ilaveten iletim menziline çok daha iyi olanaklara sahiptir (LoRa Alliance, 2015).

LoRaWAN ise LoRa'nın iletişim protokolü ve ağ mimarisidir (LoRa Alliance, 2015). Protokol ve sistem mimarisi bir uç cihazın hizmet kalitesini, güvenliğini ve pil ömrünü belirlemede en önemli etkenlerden biri olduğu için LoRaWAN'ın

detaylı incelenmesinde fayda bulunmaktadır. Bu, ilgili teknolojiye dair birçok durumu gözler önüne serecektir.

LoRaWAN Yıldız Ağ Topolojisi kullanır. Bu düzende uygulama sunucuları da eklenirse eğer toplamda dört adet bileşen bulunmaktadır. Şekil 3.4 incelendiğinde bu mimarinin ilk bileşeninin uç düğümler (sensörler, sayaçlar ve dedektörler vs.) olduğu görülebilir. Bu düğümlerden alınan veriler ikinci bir bileşen olan ağ geçidine (gateway) iletilir. Bu noktada herhangi bir uç düğümün belirli bir ağ geçidi ile ilişkilendirilmediğinin de belirtilmesi gerekmektedir. Buna alternatif olarak her düğüm tarafından gönderilen veriler onu duyabilecek birden fazla ağ geçidi tarafından alınır ve tüm bu veriler üçüncü adımda yer alan bulut tabanlı ağ sunucusuna bir ana taşıyıcı aracılığıyla (hücresel, Wi-Fi, uydu ya da Ethernet) iletilir. Dinlenen çoklu paketlerin filtrelenmesi ve güvenlik kontrolleri bu adımda ağ sunucusunda yapılır ve her uygulamanın talep ettiği veriler yine ana taşıyıcı aracılığıyla ağ sunucusundan uygulama sunucusuna iletilir.



Şekil 3.4. LoRaWAN Hiyerarşik Mimarisi (LoRa Alliance, 2015)

3.2.3. IoT faktörleri çerçevesinde LoRaWAN

IoT çatısı altında yer alan uygulamaların ihtiyaçları özelinde haberleşme teknolojilerini değerlendirmenin gerekliliği düşünülerek bu bölümde bir IoT uygulamasından beklentilere LoRaWAN'ın nasıl yanıt verdiğine değinilmiştir.

Bir şehirde milyonlarca sayaç olduğu düşünülürse eğer bu sayaçların enerji tasarruflarının yüksek olması pil değiştirme işlemlerinin periyodunu kısaltmak ve maliyetleri düşürmek gibi parametreler değerlendirildiğinde çok önemli bir ölçüttür. Pil ömrünün azami olması noktasında LoRaWAN Aloha yöntemini kullanmaktadır (LoRa Alliance, 2015). Hücresel gibi eşzamanlılık esaslı birçok iletişim yönteminin aksine veriler belirli sıklıklarda iletildiğinden uç düğümlerin sürekli olarak uyanık kalması gerekmez. Düğümlerin sürekli olarak uyanması aslında enerji tüketimini ciddi oranda artıracığından pil ömrü için olumsuz bir etki doğurmaktadır. LoRaWAN'ın uzun pil ömrü vaadi de burada ortaya çıkmaktadır. Uç düğümler yalnızca veri göndermeye hazır oldukları zamanlarda uyanarak enerji tasarrufunu azami düzeye çıkarmaktadır. İlgili teknoloji bu tez çalışması özelinde tercih ediciliği artırıcı yönde bir girdi oluşturmaktadır. Ancak sürekli olarak uyanık kalması gereken uygulamalar için pil ömrünün veri gönderme sıklığı ile orantılı olarak azalacağı da belirtilmelidir.

LoRaWAN'ın ağ kullanım metodu irdelenecek olursa eğer Bölüm 3.2.2'de de detaylı olarak bahsedilen kısma değinmek yeterli olacaktır. LoRaWAN ağ kapasitesini en iyi şekilde kullanmak için CSS modülasyonunu tercih ederek farklı yayılma faktörlerinde iletim gerçekleştirmektedir. Farklı yayılma faktörleri aslında farklı veri hızlarını ifade ettiğinden bu durum ağ geçidinin aynı kanal üzerinde aynı anda farklı veri hızlarında iletilen sinyalleri alabildiğini göstermektedir.

Veri hızının artması ile iletilen verinin yayında kalma süresi azalacağından kanal üzerinde bir tıkanıklığın önü açılacak ve iletimde sıkıntı yaşayan diğer düğümler için kanal kapasitesi daha kullanılabilir olacaktır. Zaten bir düğümün ağ geçidi ile bağlantısında herhangi bir sıkıntı bulunmadığı durumlarda veri hızının yavaşlatılarak yayında kalma süresinin artırılmasını gerektirecek bir durum yoktur. Bunun tersini yaparak yani veri hızını artırıp yayında kalma süresini azaltması diğer düğümlerin kanalda ilerleme kapasitesini artıracaktır. Tabii tüm bunlara rağmen kapasite sıkıntısı yaşanmaya devam ediyorsa eğer ağa yeni bir ağ geçidi eklenmesi bir alternatif olarak düşünülmelidir. Ancak bunun ağ geçidi

kapasitesini artırmasının yanında maliyeti artırıcı bir girdi olacağı da belirtilmelidir.

LoRaWAN'ın piyasada birbirinden farklı uç cihazları bulunmaktadır. Bunlar A sınıfı, B sınıfı ve C sınıfı olarak üç ana başlıkta sıralanabilir. Hangisinin seçileceği noktasında bir standart bulunmazken bu cihazların kullanılacağı uygulamalardan beklentinin ne olduğu doğru kararın verilmesi noktasında fayda sağlayacaktır. Tüm uç cihaz sınıflarının ortak özelliği hepsinin çift yönlü iletişim yapabilme yeteneğidir. A sınıfı cihaz bir yukarı bağlantı yaptığında iki kısa aşağı bağlantı yapma penceresi açar. Bu durum aşağı bağlantının her istenilen zamanda yapılamayacağı ve yukarı bağlantı zamanını beklemek zorunda olduğunu gösterir. Diğer zamanlarda uykuda olduğundan en düşük pil tüketen cihazlar bunlardır ve her LoRaWAN mimarisi A sınıfı cihazı destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. B sınıfı cihazlar ise A sınıfı cihazlara ek olarak ağ geçidinden aldığı işaretlerle planlanan zamanlarda fazladan alma pencereleri açar. A sınıfına nazaran daha fazla enerji tükettiğinden pil ömrü görece daha düşüktür. Son olarak C sınıfı cihazlarda sürekli olarak alma pencereleri açıktır. Yalnızca veri iletimi yapıldığında kapanır. En çok enerji tüketip en kısa pil ömrüne sahip olan cihazlardır (LoRa Alliance, 2015).

Son olarak güvenlik faktörü ele alınacak olursa eğer LoRaWAN iki güvenlik katmanı kullanır. Bunlardan ilki ağ ikincisi ise uygulama katmanındadır. Ağ güvenliği ağdaki uç düğümün güvenliğinden emin olmayı sağlarken uygulama güvenliği erişim izni olmayan son kullanıcıları engellemek içindir. Güvenlik için AES (Advanced Encryption Standard, Gelişmiş Şifreleme Standardı) ve bir IEEE EUI64 kullanan anahtarlama yöntemi ile birlikte kullanılır (LoRa Alliance, 2015).

Ayrıca lisanssız frekansta çalışan LoRaWAN'ın dışarıdan yetkisi bulunmayanlar tarafından dinlenmesine engel olmak için veri havada iletilmeden önce uç düğüm ile ağ arasında bir şifrelemeye tabii tutulur. Buna ilaveten uç düğüm ile uygulama sunucusu arasında da bir şifreleme sağlanır. Düğüm ile uygulama sunucusu arasında uçtan uca yapılan bu şifreleme yöntemi aracılığı ile iletilen veriye erişim yalnızca yetkili ve şifreyi çözebilme anahtarına sahip kişi ya da kurumlarca

yapılabilmektedir. Bu haliyle lisanssız bantlara dışarıdan erişimin önüne geçmek amaçlanmaktadır (LoRa Alliance, 2020).

3.2.4. LoRa teknik özellikleri

Bu bölümde LoRa haberleşme teknolojisinin veri hızı, günlük ilettiği maksimum mesaj, bant genişliği ve kapsamı gibi alanlar detaylandırılmıştır.

Çizelge 3.1 incelendiğinde NB-IoT ve LoRaWAN'ın birçok faktör çerçevesinde kıyaslandığı görülebilir. Tezin bu kısmına kadar LoRaWAN'la ilgili bahsedilen birçok teknik detay tabloda yer alsa da veri hızı, günlük maksimum mesaj, maksimum yük uzunluğu, bant genişliği ve menzil mesafesi gibi parametrelere değinmek LoRaWAN'a teknik olarak daha yakın bir mesafeden bakılmasını kolaylaştıracaktır. NB-IoT için ise ilerleyen bölümlerde detaylı anlatım yapılacağından bu kısımda yer verilmeyecektir.

Çizelge 3.1. LoRaWAN ve NB-IoT Teknolojilerine Genel Bakış (Mekki vd., 2019)

	LoRaWAN	NB-IoT
Modülasyon	CSS	QPSK
Frekans Bandı	Lisanssız ISM bandı	Lisanslı LTE bandı
Bant Genişliği	250 kHz ve 125 kHz	200 kHz
Maksimum Veri Hızı	50 kbps	200 kbps
Çift Yönlü İletişim	Evet	Evet
Maksimum Mesaj/Gün	Sınırsız	Sınırsız
Maksimum Yük Uzunluğu	243 bayt	1600 bayt
Kapsam	5 km (kent), 20 km (kırsal)	1 km (kent), 10 km (kırsal)
Parazit Azaltma	Çok yüksek	Düşük
Kimlik Doğrulama ve Şifreleme	AES 128b	LTE şifreleme
Uyarlanabilir Veri Hızı	Evet	Hayır
Son Cihaz Bağlantı Modeli	Çok sayıda baz istasyonu	Tek bir baz istasyonu
Lokalizasyon	Evet (TDOA)	Hayır
Özel Ağ İzni	Evet	Hayır
Standardizasyon	LoRa-Alliance	3GPP

LoRa'nın kanal kapasitesini optimize etmek için veri hızını sürekli olarak değiştirdiğine Bölüm 3.2.1 ve Bölüm 3.2.3'de değinilmişti. Bu noktada LoRa'nın değişken veri hızının ne olduğu belirtilecektir. LoRa farklı SF değerlerinde (7, 8, 9, 10, 11 ve 12) saniyede 300 bit ile 50 kilobit veri hızında yayın yapabilmektedir. Bu da LoRa'nın 0,3–50 kbps arasında değişken veri hızına sahip olabildiğinin göstergesidir (Mekki vd., 2019). Farklı SF değerlerinde iletilen bu mesajlar ulaşabileceği menzile içinde bulunan birden fazla ağ geçidi tarafından eşzamanlı olarak alınabilir ve bu mesajlar Çizelge 3.1'de de görüleceği üzere 243 bayt uzunluktadır. İletilen bu çoklu mesajların filtrelenmesi, güvenliğinin kontrol edilmesi, verinin uygulama sunucusuna iletilmesi gibi görevler ağ sunucusu tarafından yapılmaktadır.

LoRa'nın günlük mesaj iletme modelinde bir sınırlama yoktur. Yani günün her saatinde dilediği takdirde iletim yapabilir. Ancak Bölüm 3.2.3'de de bahsedildiği gibi farklı uç cihazların (A, B ve C tipi) farklı özellikleri vardır. Talep edilen uygulamaya uygun uç cihazın seçilmesi günlük mesaj iletim yönteminin de belirlenmesini beraberinde getirecektir. Tabii dilenilen takdirde günün her saatinde iletim yapılmasının enerji tüketimini artırarak pil ömrünü azaltacağı da hesaba katılmalıdır.

Çizelge 3.1 incelendiğinde LoRa'nın kapsama menzilinin kent içinde 5 km, kırsal alanda ise 10 km olarak ifade edildiği görülebilir. Bu hücresele (Wi-Fi, 2G, 3G, 4G ve 5G) ya da kısa menzile (Bluetooth, BLE, 6LowPan, ZigBee, EnOcean, NFC/RFID) haberleşme teknolojilerine nazaran çok yüksek bir iletim mesafesi vaadidir ve tercih edilirliliği artırmaktadır. Ancak teorik olarak belirtilen bu ifadenin farklı ülkeler, şehirler, mahalleler, binalar, katlar ve evlerde nasıl bir sonuç doğuracağı yalnızca gerçek deneysel ortamların çıktısı ile gözlemlenebilir. İletim mesafesinin binalarda kullanılan malzeme, ağ geçidine olan uzaklık, uç düğüm ile baz istasyonu arasında sinyal geçmesine engel olan parazitler, anten kapasitesi, sinyalin geçiş yönü, kanal kullanıcı sayısı ve hatta mevsimlerin geçişinden dahi etkilendiği düşünülürse hangi ortamda nasıl bir tepki doğuracağının uygulamalı olarak gözlemlenmesi daha doğru bir sonuç ortaya koyacaktır.

Daha önce de belirtildiği üzere LoRaWAN'lı uç cihazlar aracılığı ile iletilen veriler menzil içerisindeki birden fazla LoRa ağ geçidi tarafından eşzamanlı olarak dinlenir. Bu durum paket kayıp oranını minimize etmek için bir alternatiftir. Sonuç itibariyle verilerin birden fazla ağ geçidi tarafından alınması paketlerin kaybolmasının önüne geçilmesini sağlayacaktır. Fakat amaç paket kayıp oranını azaltmak için yeni bir ağ geçidinin sisteme dâhil edilmesi ise bu durumun maliyeti artırıcı bir girdi oluşturacağı da göz ardı edilmemelidir. İletilen bu çoklu mesajların filtrelenmesi, güvenliğinin kontrol edilmesi, verinin uygulama sunucusuna iletilmesi gibi görevler ağ sunucusu tarafından yapılmaktadır. Ayrıca uç cihazların lokalize edilmesi için iletilen bu çoklu mesajlardan faydalanılır ve Çizelge 3.3'de de görüleceği üzere zaman senkronizasyonunun sağlanması için LoRa TDOA (Time Difference of Arrival, Varış Zaman Farkı) yöntemini kullanır.

3.2.5. Dünya geneli LoRaWAN kullanımı

Tüm Dünya'da birçok farklı alanda LoRaWAN iletişim yöntemi kullanılarak IoT özellikli cihazların takibi yapılabilmektedir. Tarım, binalar, şehirler, sanayi, lojistik ve araçlar gibi birçok farklı alanın akıllandırılması amacıyla LoRaWAN'ın kullanım örneklerine rastlanmaktadır. Bu da LoRa'nın ortaya çıktığı ilk günden bu yana Dünya'da birçok farklı ülkede ve şehirde LoRaWAN ağ kapsayıcılığına rastlanmasını doğurmuştur. Şu anda LoRa Alliance tarafından uyarlanmış iki adet ağ kapsamı bulunmaktadır. Bunlardan ilki şebeke operatör ağıdır. Şebeke operatörü tüm hizmetlerden açıkça para kazanmayı hedefleyen herhangi bir LoRaWAN ağıdır. İkincisi ise LoRaWAN'ın geliştirilmesini amaçlayan açık topluluklardır (LoRa Alliance, 2021).

Şekil 3.5'te LoRaWAN'ın açık topluluk ya da ağ operatörü aracılığı ile sunulan modellerinden bağımsız olarak küresel ağ etkinliği olan ülkeler sarı renk ile işaretlenmiştir. 2020 yılı itibariyle toplamda 162 ülkede 148 LoRaWAN ağ operatörü bulunmaktadır. Şekil 3.5 incelendiğinde bütün kıtalarda ve birçok ülkede LoRaWAN ağ etkinliklerinin bulunduğu görülebilir. Bu da Dünya genelinde LoRaWAN'a ilginin yoğunluğunun göstergesidir.



Şekil 3.5. LoRaWAN Küresel Ağ Kapsamı (LoRa Alliance, 2021)

3.3. NB-IoT'ye Genel Bir Bakış

NB-IoT, LPWAN çatısı altında gösterilebilecek bir diğer haberleşme teknolojisidir. 2016 yılında 3GPP'nin 13. Sürümde bahsedilmiş ve standartlaştırılmıştır (Lalle vd., 2019). Hücreli teknolojilerine alternatif olan NB-IoT'nin en büyük vaatlerinden biri az enerji tüketimi ile daha uzun süreli pil ömrü sağlamak iken diğeri daha uzun menzilde iletim yapabilme özelliğidir. Bunlara ilaveten düşük cihaz maliyeti, çok sayıda cihaz desteği (ölçeklenebilirlik), düşük gecikme periyodu ve düşük dağıtım maliyeti gibi faktörlerden de bahsedilebilir.

NB-IoT'nin en büyük avantajlarından biri mevcut baz istasyonlarını kullanabiliyor olmasıdır ve bu haliyle ilk kurulum maliyetini sıfıra indirmektedir. NB-IoT, GSM ve LTE ağları ile birlikte var olabilme yeteneğine sahiptir. NB-IoT'yi LoRa'dan ayıran en temel noktalardan biri de bu durumdur. LoRa şebeke ağını kurmak için sıfırdan bir çaba talep eder. Ta ki şehrin her yerini kapsayabilecek kadar ağ geçidi/baz istasyonu kurulumu yapılana kadar. Bu da

çok uzun soluklu ve maliyetli bir süreçtir. Hücrelerin altında yer alan teknolojiler zaten yıllardır kullanılageldiği için özellikle kent içi alanlarda baz istasyonu sıkıntısı oluşmayacağından NB-IoT ağından faydalanılmak istendiğinde mevcut hücresel ağ kullanılabilecektir.

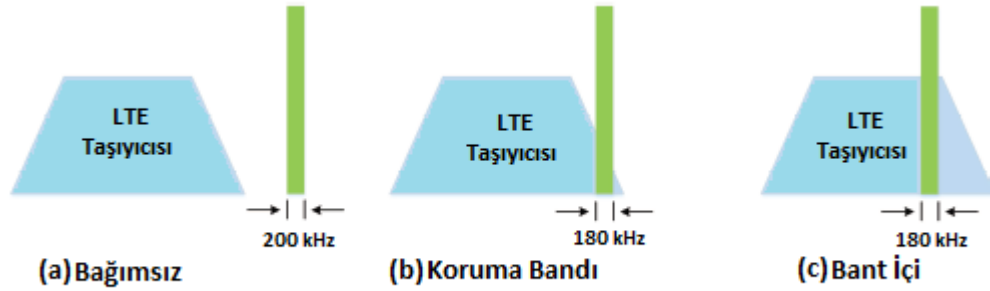
Bu durum ilk kurulum maliyeti düşünüldüğünde bir avantaj oluştursa da söz konusu kırsal alanlar olduğunda bunun dezavantaj oluşturduğu da söylenebilir. Şehirden uzak alanlarda baz istasyonlarının olmayışı dolayısıyla NB-IoT ağının kullanımı söz konusu olamamaktadır. Özellikle şehirden uzak noktalarda gerçekleştirilen tarımsal faaliyetlerde takip edilmek istenen nem, sıcaklık, yağış, toprağın durumu, sulama sistem takibi, çiftçilerin meteorolojik tüm durumlardan haberdar olmasının sağlanması gibi ölçüme ihtiyaç duyulan parametrelerde NB-IoT kullanımı baz istasyon kapsayıcılığının bulunmaması dolayısıyla tercih edilebilirlik oranını düşürmektedir.

Ayrıca NB-IoT kullanımını sağlamak için tüm uç cihazlara bir adet SIM (Subscriber Identity Module, Abone Kimlik Modülü) kart takılması abone kimlik bilgilerinin teyidi için mecburiyet oluşturmaktadır. Bu da ilgili operatöre her ay bir SIM kart bedeli ödenmesini doğuracaktır. Bunun yanı sıra NB-IoT ağına katılmak için anlaşmaya varılan operatör bir başka operatör ile değiştirilmek istendiğinde tüm uç cihazlardaki SIM kartların cihazın olduğu konuma gidilerek tek tek değiştirilmesi gerekecektir. Bu durum cihaz sayısı az olduğunda ciddi bir sıkıntı doğurmasa da sayı arttıkça yönetilebilir bir durum olmak zorlaşacaktır.

Tüm şehrin NB-IoT'li sayaçlarla donatılması senaryosunda ağ sağlayıcı operatörün değiştirilmesi akabinde, şehir geneline yayılmış olan bütün sayaçların içerisinde yer alan SIM kartların değiştirilmesinin uzun soluklu, maliyetli ve yorucu bir iş olacağı öngörülebilir. Bu noktada bir operatör bağımlılığı bulunduğu altını çizmek tüm senaryoların değerlendirilmesi için gerekli görülmüştür. Ancak bu olumsuz durumun yakın bir zamanda Türkiye'de gündeme gelen eSIM yapısına geçiş senaryosunda tamamen ortadan kalkacağı da ifade edilmelidir.

3.3.1. NB-IoT çalışma modları

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere NB-IoT lisanslı bir frekans olan LTE bandını kullanmaktadır. Şekil 3.6'da da görüleceği üzere NB-IoT'nin üç farklı çalışma tercihi bulunmaktadır.



Şekil 3.6. NB-IoT Çalışma Modları (Chen vd., 2017)

Bunlardan ilki bağımsız çalışma modudur. Bu mod hücresel hizmetlerin bulunmadığı veya dar bant spektrumunun optimize edilmek istendiği durumlarda kullanılır. NB-IoT frekanslarının yerleşimi bir veya daha çok fiziksel kaynak bloğu (PRB) alan mevcutta bulunan frekans spektrumuna ayrılır. Bu fiziksel kaynak blokları 200 kHz bant genişliğine sahiptir (Winalisa ve Nashiruddin, 2020).

İkinci mod ise koruma bandı modudur. Burada aslında bağımsız çalışma modunun aksine hücresel hizmetlere ulaşım söz konusudur. Ancak NB-IoT LTE kaynaklarını kullanmadan direkt olarak LTE taşıyıcılarının koruma bandına konuşlanır. Bu senaryoda, bağımsız çalışma modunda olduğu gibi NB-IoT frekanslarının yerleşimi bir veya daha çok fiziksel kaynak bloğu (PRB) alan mevcutta bulunan frekans spektrumuna ayrılır. Ancak bağımsız çalışma modundan farklı olarak fiziksel kaynak blokları 180 kHz bant genişliğine sahiptir (Winalisa ve Nashiruddin, 2020).

Son olarak ise bant içi çalışma modundan bahsetmek gerekmektedir. Bu modda hem hücresel hizmetlerin mevcudiyetini hem de NB-IoT'nin LTE kaynaklarını

paylaşarak LTE operatöründe konumlandığı görülmektedir. Bu dağıtım senaryosunda, NB-IoT frekansı, 180 kHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla Fiziksel Kaynak Bloğu (PRB) alan mevcut LTE frekans bloğu içinde kullanılır (Winalisa ve Nashiruddin, 2020).

3.3.2. NB-IoT pil ömrünü etkileyen PSM ve eDRX faktörleri

NB-IoT de diğer LPWAN teknolojileri gibi uzun pil ömrü vaadi ile ortaya çıkmıştır. NB-IoT bir 3GPP standardıdır ve LTE frekans bandını kullanır. Ancak buna rağmen pil ömrünü azami düzeye çıkarabilmek için LTE'den farklı güç gereksinimleri bulunmaktadır ve çok daha gelişmiş güç tasarrufu şemalarına ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada NB-IoT enerji verimliliğini sağlamak ve dolayısıyla da pil ömrünü verimli kullanabilmek adına eDRX (Extended Discontinuous Reception, Artırılmış Kesintili Alım) ve PSM (Power Saving Mode, Güç Tasarruf Modu) yöntemlerinden faydalanmaktadır (Chen vd., 2017). Bu iki durum pil ömrünün uzun olmasının gerekçeleri olarak gösterilebilir. Bu noktada eDRX ve PSM yöntemlerine değinmekte fayda bulunmaktadır.

PSM modunda ağda bulunan cihazlar faaliyetlerinden çoğunu durdurarak derin uyku durumuna geçerler. Bu durumdayken cihaza ağ üzerinden ulaşmak mümkün değildir. Fakat veri iletimi talep edildiğinde cihaz dilediği zamanda uyanabilme kabiliyetine sahiptir. Bir PSM döngüsü iki temel parçaya bölünebilir. İlki iletilen verilerin periyodik olarak alınması ikincisi ise derin uyku durumudur.

PSM durumundaki bir cihaz UL (Uplink, Yukarı Bağlantı) paketi göndermek istediğinde gerekli izinlerin sağlanması için çağrı durumuna geçer. Onay verildiği takdirde cihaz bağlandı durumuna geçecek, reddedildiğinde ise PSM döngüsünü sürdürecektir. Yine PSM döngüsündeki cihaza DL (Downlink, Aşağı Bağlantı) paketi gönderilmek istenirse ağ paketi hafızasında tutarak cihazın PSM modundan çıkmasını bekler. Cihaz uyandığında ise gerekli bilgilendirme sağlanır (Sultania, 2018).

3GPP tarafından geliştirilen ve 3GPP Rel.13'te tanımlanan eDRX'te ise cihazlar belirli bir süre boyunca bekleme moduna geçerler. Aslında bu, derin uyku durumuna geçmeden önce gelme ihtimali bulunan veriler için kulak kabartmaya benzer. eDRX, cihaz RRC (Radio Resource Control, Radyo Kaynak Kontrolü) durumlarından herhangi birindeyken kullanılabilir. eDRX iletilmeyi bekleyen verilerde herhangi bir ağ göstergesini dinlemek için, uyanmadan önce derin uyku modundan çok daha düşük güçte uykuda kalacağı süreyi ayarlamasına imkân tanır (Sultania, 2018). Kısacası eDRX durumunda cihaz tam manasıyla bir ağ bağlantısı kurmadan veri göstergelerini dinleyebilir. Bu dinleme periyodu süresince geçen süre tam bir ağ bağlantısı süresince geçen süreden çok daha azdır ve bu durum da hiç kuşkusuz cihazın tam bir ağ bağlantısına nazaran çok daha az güç tüketmesine ve aygıtın pil ömrünün uzamasına yardımcı olmaktadır.

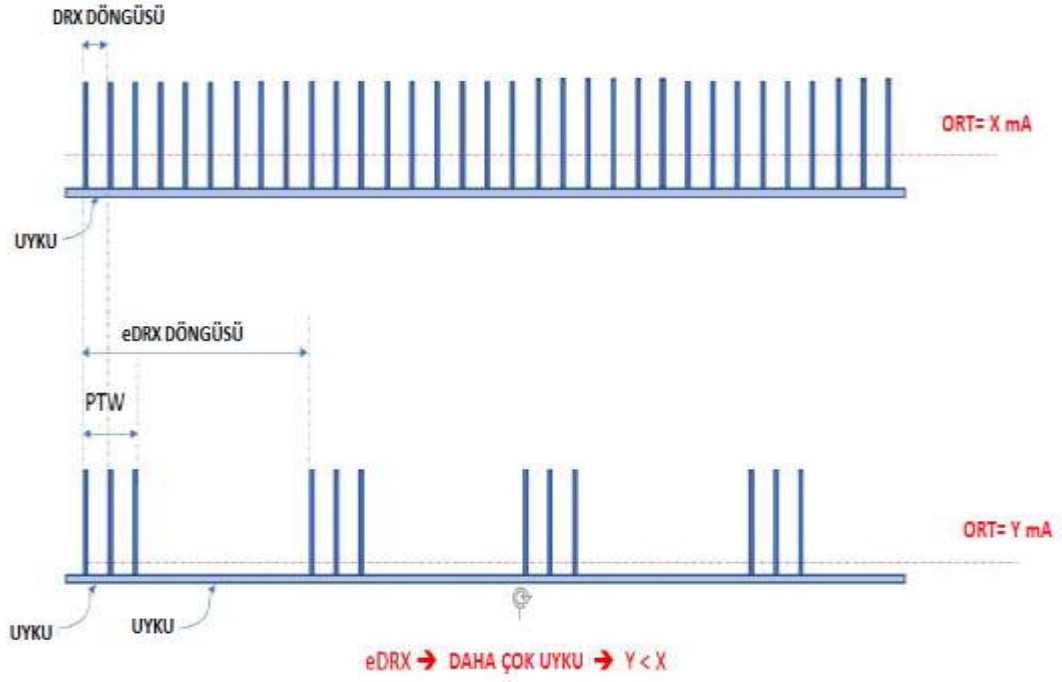
eDRX modunda azami uyku süresi üç saate kadar çıkabiliyorken, asgari uyku süresi 10,24 saniye olabilmektedir (Sultania, 2018). Tipik LTE sistemlerinde kullanılan DRX modelinde uyanmadan önce uykuda kalınacak süre ağ tarafından belirlenmekteydi. Ancak eDRX'te bu durum cihazın eDRX döngüsü boyunca uyuyacağı süreyi kendisinin seçmesine olanak tanımaktadır (Vos, 2020). Bu da aslında her uygulama için farklı bir eDRX seçimini beraberinde getireceğinden cihaz pil ömrünün her uygulama için esnek olmasını da sağlayacaktır. Birbirinden çok farklı taleplere sahip binlerce IoT uygulaması düşünüldüğünde bu sürenin ayarlanabiliyor olması hassasiyeti yüksek cihazlar için eDRX'in düşürülmesine ve dolayısıyla pil ömrünün azaltılmasına; hassasiyeti düşük uygulamalarda ise eDRX'in yükseltilmesine ve dolayısıyla pil ömrünün uzatılmasına sebebiyet verecektir.

eDRX ve PSM arasındaki farka da değinilecek olursa eğer PSM uyku süresinin eDRX'e nazaran çok daha uzun olduğu sonucuna varılabilir. Bu da cihazların daha derin uyumalarına ve daha düşük güçte uyku moduna girmelerine sebebiyet verir. PSM uyku gücü birkaç mikroamperken, eDRX uyku gücü 10 ile 30 mikroamper arasında değişir. Ancak bu durumun getirisi de PSM modundaki cihazların uykudan uyanmalarının zorlaşmasıdır. Yani eDRX'li cihazların uyanması için 1 ms yeterli olurken PSM'li aygıtların 100 ile 200 ms arasında

değişen bir zaman dilimine ihtiyacı vardır (Vos, 2020). Bu durumda aygıt için hangi modun daha iyi olacağına karar vermek için ihtiyaç duyulan cihaza ne kadar sürede bir erişilmek istendiğinin netleştirilmesi gerekecektir. Günde yalnızca bir veya birkaç kez erişilmek istenen bir cihaz düşünülürse eğer bu aygıtta PSM iyi bir tercih olurken günün belirli periyotlarında sürekli olarak veri gönderilmesi talep edilen bir cihaz için eDRX çok daha iyi bir sonuç doğuracaktır.

Bir alt başlık olarak NB-IoT pil ömrünün LTE sistemlerinden daha uzun olmasının açıklanması NB-IoT'yi yakından tanımak için uygun görülmektedir. Şekil 3.7 incelenecek olursa eğer standart LTE sistemlerinin kullandığı DRX metodu ile NB-IoT tarafından kullanılan eDRX yönteminin birbiri ile kıyaslandığı görülebilir. DRX'te uyanık olma durumunun eDRX'e nazaran çok daha fazla olduğu ya da diğer bir deyişle eDRX'te uykuda bulunma durumunun DRX'e kıyasla çok daha uzun olduğu görülebilir.

Bir cihazın uykuda bulunma durumunun artması ile enerji tüketimi arasındaki ters orantı düşünülürse eğer bunun hiç kuşkusuz eDRX kullanan cihazların pil ömrünün uzun olmasına sebep olduğu sonucuna varılabilir. Bu durum NB-IoT'nin pil ömrünün LTE sistemlerinden neden çok daha uzun olduğunu açıklamaktadır. Ancak unutulmaması gereken en önemli durumlardan biri daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere seçilecek teknolojinin mevcut uygulamanın beklentisini karşılamak zorunda olduğudur.



Şekil 3.7. DRX ve eDRX Döngüleri (Telit, 2020)

3.3.3. NB-IoT ağ mimarisi

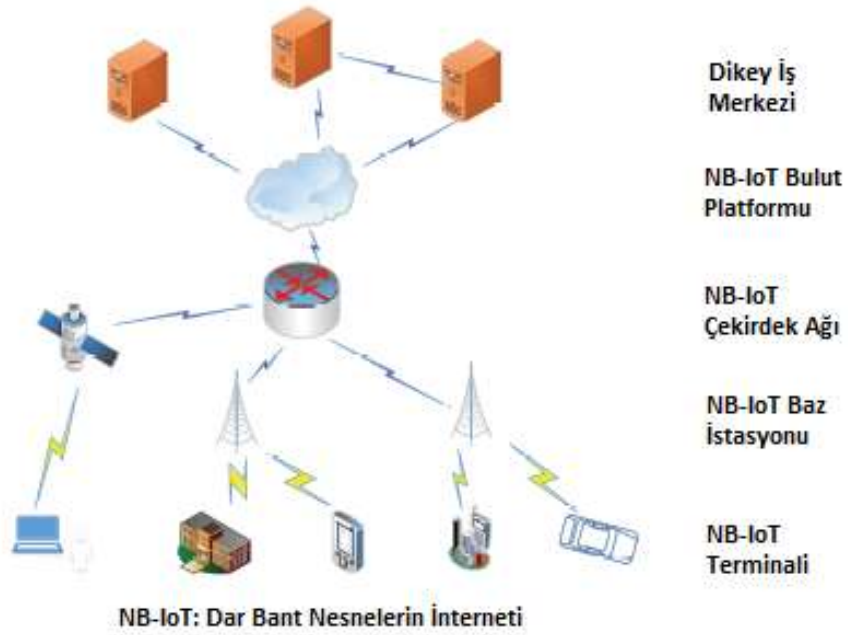
NB-IoT'nin ağ mimarisi özetlenecek olursa eğer beş katmandan oluşan bir ağ yapısına sahip olduğu sonucuna varılabilir. Şekil 3.8'de de görüleceği üzere ilk katmanın NB-IoT terminalleri olduğu görülecektir. Bu katmanda IoT özellikli cihazlar bulunmaktadır ve NB-IoT iletişim yöntemini kullanmak isteyen tüm cihazlar belirli prosedürleri benimseyerek ağın ilk adımını tamamlamış olacaklardır. Bu noktada LoRa'daki uç düğümler ile eşdeğer oldukları söylenebilir.

İkinci katmanda NB-IoT baz istasyonları bulunmaktadır. İlgili baz istasyonları ağ sağlayıcı operatörler tarafından temin edilir ve süreklilik oluşturmak amaçlı hizmet sağlar. Bu istasyonlar Bölüm 3.3.1'de de bahsedildiği üzere Bağımsız, Koruma Bandı ve Bant İçi çalışma modlarını desteklemek durumundadır. LoRa'daki ağ geçitlerinin amacı ile paralel bir amaca hizmet etmektedirler.

Üçüncü katmanda NB-IoT çekirdek ağı yer almaktadır. Bu katmanın temel amacı NB-IoT baz istasyonları ile NB-IoT bulut platformu arasında sürekli bir iletişim sağlamaktır.

Dördüncü adım olan NB-IoT bulut platformu temelde verilerin toplandığı ve işlendiği alandır. Bu platform aracılığı ile NB-IoT'li cihazlardan iletilen veriler bir sonraki adım olan dikey iş merkezine iletebilir veya yeniden cihazlara iletim gerçekleştirilebilir. LoRa'nın ağ sunucusu aracılığı ile yönettiği süreçlerle paralel bir amaca hizmet etmektedir.

Son olarak ise dikey iş merkezleri bulunmaktadır. Bu alanda iletilen tüm verilerin merkezi bir sistemde saklanması sağlanmaktadır.



Şekil 3.8. NB-IoT Ağ Mimarisi (Chen vd., 2017)

3.3.4. NB-IoT iletim şemaları

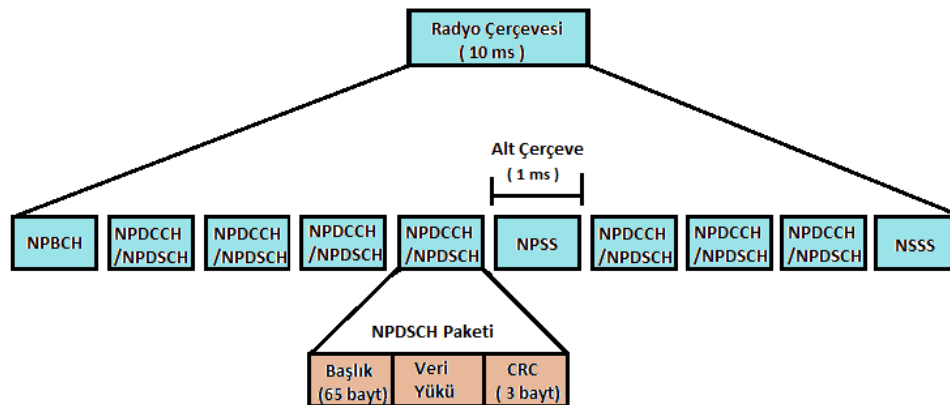
NB-IoT yukarı ve aşağı olmak üzere iki yönlü veri iletimi yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. NB-IoT aşağı yönlü iletimde de yukarı yönlü iletimde de en az 180 kHz bant genişliğine ihtiyaç duyar (Wang vd., 2017). Bu bant genişliği seçimleri

Bölüm 3.3.1’de de bahsedildiği gibi NB-İoT’nin bağımsız, koruma bandı veya bant içi dağıtım seçeneklerinin ortaya çıkmasını sağlar.

TR45.820’den çıkarılan kontrol kanallarıyla aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı çerçeve yapısı (Malik vd., 2018) Bölüm 3.3.4.1 ve Bölüm 3.3.4.2’de detaylandırıldığı gibidir.

3.3.4.1. Aşağı bağlantı iletim şeması

NB-İoT aşağı bağlantı iletim şemasında her çerçeve 10 alt çerçeveden oluşur ve bu çerçeveler 1 ms uzunluğundadır. Bu haliyle LTE’nin 10 ms uzunluğundaki çerçeve yapısı ile benzerdir. Bu 10 alt çerçevenin her biri 7 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama) uzunluğunda iki yuvanın birleşimidir. En küçük iletim birimi olan bir kaynak elemanı bir alt taşıyıcı x bir sembolden oluşmaktadır. Kaynak elemanı, QPSK (Quadriphase Shift Keying, Dört Fazlı Kaydırmalı Anahtarlama) için 2 bit, 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation, 16-Karesel Genlik Modülasyonu) için 4 bit ve 64-QAM için 6 bittir (Malik vd., 2018). Şekil 3.9 aracılığı ile aşağı bağlantıda NB-İoT’nin çerçevelerini farklı fiziksel kanallara ve sinyallere nasıl bölüştürdüğü görülebilir.



Şekil 3.9. NB-İoT Aşağı Bağlantı Çerçeve Yapısı (Malik vd., 2018)

Şekil 3.9’da görüldüğü üzere NB-IoT’nin aşağı bağlantı iletim şemasında üç adet fiziksel kaynağı bulunmaktadır. Bunlara ilaveten iki adette fiziksel sinyali vardır. Her birine kısaca değinmekte fayda bulunmaktadır.

NRS (Narrowband Reference Signal, Dar Bant Referans Sinyali), aşağı bağlantı demodülasyonunda faz referansını sağlamak için kullanılmakta ve her bir anten portu için 8 kaynak elemanı kullanarak tüm alt çerçevelerde iletilmektedir (Malik vd., 2018).

NPSS ve NSSS (Narrowband Primary and Secondary Synchronization Signals, Dar Bant Birincil ve İkincil Senkronizasyon Sinyalleri) hücre araması gerçekleştirmek için kullanılmaktadırlar ve bunu yaparken frekans ve zaman senkronizasyonu ve hücre kimliği algılamasından faydalanmaktadırlar. NPSS, her 10 ms çerçevede alt çerçeveye beşte iletilirken NSSS ise 20 ms çerçevede dokuzda iletilir (Malik vd., 2018).

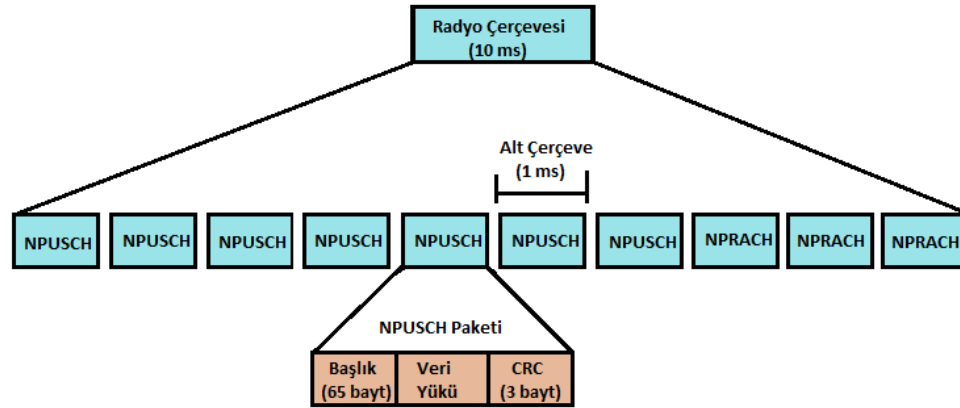
NPBCH (Narrowband Physical Broadcast Channel, Dar Bant Fiziksel Yayın Kanalı) yukarıda bahsi geçen üç adet fiziksel kaynaktan biridir ve ana bilgi bloğunu taşımaktadır. Bir ana bilgi bloğu 640 ms boyunca değişmeden kalabilmektedir (Malik vd., 2018).

Diğer bir fiziksel kaynak ise literatürde NPDCCH (Narrowband Physical Downlink Control Channel, Dar Bant Fiziksel Aşağı Bağlantı Kontrol Kanalı) olarak yer almaktadır. NPDCCH içerisinde iletim modülasyon tekniği, yukarı bağlantı/aşağı bağlantı ataması gibi parametreleri taşımaktadır. Bu sebepten dolayı kontrol kanalları arasında en temel öge olarak değerlendirilmektedir. Baz istasyonu ve kullanıcı ekipmanı arasında gerçekleşen veri aktarımının kontrolünü sağlar (Malik vd., 2018).

Son olarak ise NPDSCH (Narrowband Physical Downlink Shared Channel, Dar Bant Fiziksel Aşağı Bağlantı Paylaşımlı Kanal) kanalından bahsedilebilir. Bu kanal ana veriyi taşımaktadır Şekil 3.9 aracılığı ile içerisinde ne tür bilgiler barındırdığı görülebilir.

3.3.4.2. Yukarı bağlantı iletim şeması

NB-IoT, yukarı bağlantı iletim şemasında tek ve çok perdeli iletimleri desteklemektedir. Çok perdeli iletimde SC-FDMA (Single Carrier Frequency-Division Multiple Access, Tek Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) şeması kullanılmaktadır. Bu şema 15 kHz alt taşıyıcı aralığı ve 0,5 ms yuvalı 180 kHz toplam bant genişliğine sahiptir. Tek perdeli iletimde ise hem 15 kHz hem de 3.75 kHz alt taşıyıcı aralığını desteklemektedir (Malik vd., 2018). Şekil 3.10 aracılığı ile yukarı bağlantıda NB-IoT'nin çerçevelerini farklı fiziksel kanallara ve sinyallere nasıl bölüştürdüğü görülebilir.



Şekil 3.10. NB-IoT Yukarı Bağlantı Çerçeve Yapısı (Malik vd., 2018)

Şekil 3.10'da görüldüğü üzere NB-IoT'nin yukarı bağlantı iletim şemasında iki adet fiziksel kaynağı bulunmaktadır. Buna ilaveten bir adette fiziksel sinyali vardır. Bunların her birine kısaca değinmekte fayda bulunmaktadır.

İlk olarak fiziksel sinyalden bahsedilecek olursa DMRS (Demodulation Reference Signal, Demodülasyon Referans Sinyali) yukarı bağlantı iletimine göre aralık başına bir ya da üç SC-OFDMA sembolü olarak iletilmektedir (Malik vd., 2018).

Fiziksel kaynaklardan ilki olan NPRACH (Narrowband Physical Random Access Channel, Dar Bant Fiziksel Rastgele Erişim Kanalı) 12, 24, 36 ve 48 alt taşıyıcıdan

oluşan bir kümeyi işgal ederek ayrı bir alt taşıyıcı aralığı kümesi üzerinde bulunur (Malik vd., 2018).

Fiziksel kaynaklardan ikincisi olan NPUSCH (Narrowband Uplink Shared Channel, Dar Bant Yukarı Bağlantı Paylaşımlı Kanal) aracılığı ile hem veri hem de kontrol bilgisi taşınmaktadır. Şekil 3.10 aracılığı ile içerisinde ne tür bilgiler barındırdığı görülebilir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında tezin ana temasını oluşturan deneysel çalışmalara yer verilmiş olup ilgili çalışma özelinde elde edilen verilerin analizine değinilmiştir. Testin gerçekleştirildiği binaya dair bilgilere, NB-IoT testlerinin ölçüm sonuçlarına ve bu sonuçların analizine, LoRa testlerinin ölçüm sonuçlarına ve bu sonuçların analizine sırasıyla Bölüm 4.1, Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.3’de yer verilmiştir.

4.1. Testlerin Gerçekleştirildiği Pilot Bölge

İlgili çalışmanın hem su hem de doğalgaz sayaçları için bir çıktı oluşturabilmesi için pilot bölge seçilirken her iki sayaç tipinin de yer aldığı bir alan olmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca kapsamlı bir çalışma olabilmesi ve bu çalışmadan elde edilen çıktıların genel bir değerlendirmeyi içerebilmesi adına İstanbul şehrinde yer alan binaların yapısı ile eşdeğer bir bina seçilmiştir. Bu bina İstanbul’da da sıklıkla görülebilen betonarme yapıdadır. Sitenin etrafında gürültüyü artırıcı etki oluşturacak ve veri iletimini olumsuz etkileyebilecek binalar yer almaktadır.

Bahsi geçen site dört blokludur. Her bloğunda 12 kat bulunmaktadır. Her katta farklı adetlerde hane olduğu için katlarda sabit bir doğalgaz ve su sayacı sayısı bulunmamaktadır. Ancak bina, site girişi referans alınarak sol ve sağ cephe olarak iki farklı kısımda incelenecek olursa eğer genellikle katlarda her cephede ikişer adetten toplamda dört adet sayaç bulunmaktadır. Sitenin planı Şekil 4.1 aracılığı ile gözlemlenebilir. Bloklar sitenin girişi referans alınarak soldan sağa doğru A1, A2, A3 ve A4 olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 4.1. Testlerin Gerçekleştirildiği Site Planı

Her blok yatayda 55 metre uzunluğuna sahiptir. Yatay genişlik 22 metre olarak hesaplanırken sitenin genişliği 160 metre olarak ölçülmüştür. Özellikle LoRa testlerinde ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki mesafenin anlaşılabilmesi adına bloklar arası uzunluğun da belirtilmesinde fayda bulunmaktadır. İki yan yana bulunan blok arasındaki mesafe bina girişleri referans alındığında yaklaşık olarak 45 metre olarak ölçülürken duvardan duvara mesafe yaklaşık 23 metre olarak hesaplanmıştır.

Binaların içerisinde bulunan gaz sayaçları herhangi bir kutu ile muhafaza altına alınmadan koridorlarda açık olarak duvara monte bir vaziyette bulunmaktadır. Binada bulunan bir gaz sayacı örnek olması adına Şekil 4.2’de yer almaktadır. İstanbul’daki birçok binada yer alan gaz sayaçlarının konumu ile benzerlik taşımaktadır.



Şekil 4.2. Blok İçerindeki Gaz Sayacının Konumu

Binaların içerisinde bulunan su sayaçları ise katlarda yer alan şaft tünelleri içerisinde bulunmaktadır. Bu tüneller metal kalın kapak ile muhafaza edilmektedir. Su sayacının içerisinde bulunduğu şaft tünelinin kapağının kapalı ve açık konumlarına Şekil 4.3. aracılığı ile ulaşılabilir. İstanbul'da yer alan görece yeni binalardaki sayaçların genellikle sayaç şaft tünelleri içerisinde konumlandırıldığı görülmektedir. Bu sebepten dolayı ölçümlerin bu tünellerin içerisinde yapılmış olmasının İstanbul için örneklem oluşturan bu alan için değerli bir çıktı oluşturması planlanmaktadır.



Şekil 4.3. Blok İçerisindeki Şaft Tünelinin Kapalı ve Açık Konumu

4.2. NB-IoT Testi ve Analiz Sonuçları

NB-IoT testleri Şekil 4.4’de işaretlenmiş olan A4. blokta gerçekleştirilmiştir. Bu blok sitenin son bloğu olduğu için bir cephesi açıktır. Gözlemler 0, 1, 2, 3, 6, 9 ve 12. katlarda yapılmıştır. Ayrıca tüm testler bina girişi referans alınarak sol ve sağ cephe olmak üzere katlarda ikişer kez tekrarlanmıştır. Su sayaçlarının performansını gözlemlemek adına NB-IoT teknolojisinden faydalanılacağı için uç düğüm Şekil 4.3’de görülen sayaç şaft tüneli içerisine bırakılarak testler yapılmıştır. Her ölçüm alanında sayaç bir el ile tetiklenerek bu sinyalin baz istasyonuna ulaşip ulaşmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 4.4. NB-IoT Testlerinin Gerçekleştirildiği Blok

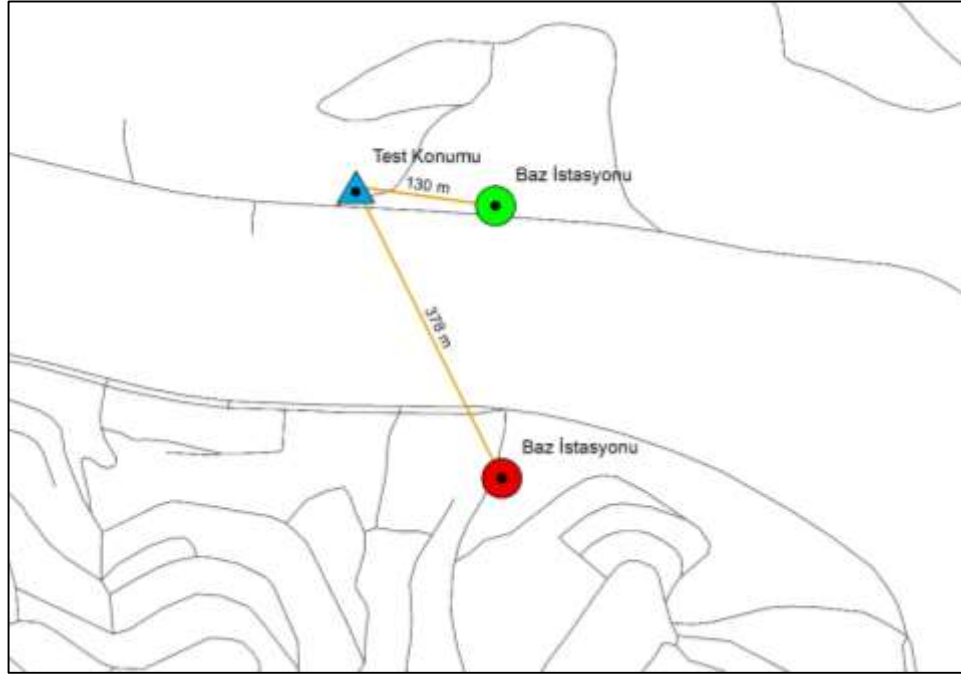
NB-IoT ölçümlerinde NB-IoT teknolojisine sahip ön ödemeli sayısal su sayacı kullanılmıştır. Bu sayacın teknik özellikleri aşağıda maddeler halinde belirtildiği gibidir;

- NB-IoT özellikli sayısal sayaç mevcutta bulunan GSM baz istasyonlarını altyapı olarak kullanmaktadır. Bu sebepten dolayı modem, ağ geçidi gibi herhangi bir ek cihaza ihtiyaç duymamaktadır. Bu özelliği ile LoRa'daki durumun aksine ilk kurulum için ek bir kurulum eforu ya da maliyetini barındırmamaktadır.
- Kullanılan NB-IoT teknolojisinin bant genişliği 200 kHz'dir.
- NB-IoT özellikli sayacın yayın yaptığı sinyalin gücü yaklaşık 23 dBm seviyesindedir.
- NB-IoT özellikli sayacın minimum alıcı hassasiyeti -129 dBm seviyesindedir.
- Sayaç yayın yaptığı zamanlarda yaklaşık 110mA güç tüketmektedir.
- Sayaç yayın yapmadığı durumlarda, bir diğer ifade ile uyku durumunda 20µA güç tüketmektedir.
- Sayaç içerisinde kullanılan pil 3.6 Volt ve 8.5Ah lityumdur.

NB-IoT özellikli sayısal su sayacı içerisinde Türkiye'de hizmet veren yerel bir ağ operatörüne ait SIM kart bulunmaktadır. Bu cihaz mevcut GSM baz istasyonunu kullandığı için testin gerçekleştirildiği alana yakın baz istasyonlarının konumunu

belirtmek gerekmektedir. İlgili yerel ağ operatörüne ait baz istasyonlarının konumu araştırıldığında bölgeye yakın iki adet istasyon olduğu belirlenmiştir.

Test esnasında kullanılan sayacın altyapı olarak bu iki istasyonu da kullanmış olabileceği düşünülmektedir. Şekil 4.5’de test konumu ile bahsi geçen istasyonlar arasındaki mesafe görülmektedir. Bu mesafe bir istasyon için yaklaşık olarak kuşbakışı 130 metre iken diğer istasyon için yaklaşık 380 metredir.



Şekil 4.5. NB-IoT Test Konumu ile Baz İstasyonları Arasındaki Mesafe

Testler yaz aylarının sonuna doğru, Dünyayı etkisi altına almış olan Korona salgınından dolayı evden çalışma ve uzaktan eğitimin yaygın olduğu bir zaman diliminde ve mesai saatleri içerisinde yapılmıştır. Bu sebepten dolayı ilgili baz istasyonlarını kullanım oranının salgının olmadığı dönemlere nazaran daha çok olduğu düşünülmektedir. Bu ve benzeri durumlardan dolayı sinyallerin yoğun kullanım oranlarından etkilenmemesi adına gerçek abonelerle yapılacak olan ana çalışmada veri iletim zamanlarını baz istasyonlarını kullanım oranlarının az olduğu zaman dilimlerine göre ayarlamak gerekmektedir.

Katlar arasında ölçüm yapılırken cep telefonları aracılığı ile kontrol edilen sinyal kalitesinin tüm operatörler için ideal aralıkta bulunmadığı, telefonla konuşurken veya telefon internetlerinden faydalanırken sorunlar yaşandığı da gözlemlenmiştir. Bu noktada operatörlerin ilgili alanda sinyal kalitesini iyileştirme çalışması yapmasının gerekliliği belirtilmelidir.

Testler 0, 1, 2, 3, 6 ve 9. katlarda bina girişi referans alınarak sol ve sağ cephe olarak ikişer kere tekrarlanırken 12. katta sayaç shaft tüneline koruyan metal kapağın sinyalin kalitesine etkisini görmek adına metal kapak dışı ölçümler de eklenerek dörder kere tekrarlanmıştır. Bu değerler de dahil edildiğinde ölçümlerde kullanılan sayısal su sayacından baz istasyonuna toplamda 16 paket gönderilmiştir.

Kullanılan sayacın ekranından ve ağ sunucusundan gönderilen paketlerin durumu kontrol edilmiştir. Bu kontroller sonrasında 16 paketin de herhangi bir kayıp yaşamadan baz istasyonlarına ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak bunun yanı sıra her paket için sayaç tarafından iletilen sinyalin baz istasyonlarına ulaşması noktasında eşzamanlılık problemi yaşandığı gözlemlenmiştir.

Bu testlerde sinyalin kalitesini gözlemlemek adına RSSI değerleri ölçülmüştür. Bu sebep dolayısıyla ölçüm sonuçlarına yer vermeden önce ilgili kavramdan kısaca bahsetmekte fayda bulunmaktadır.

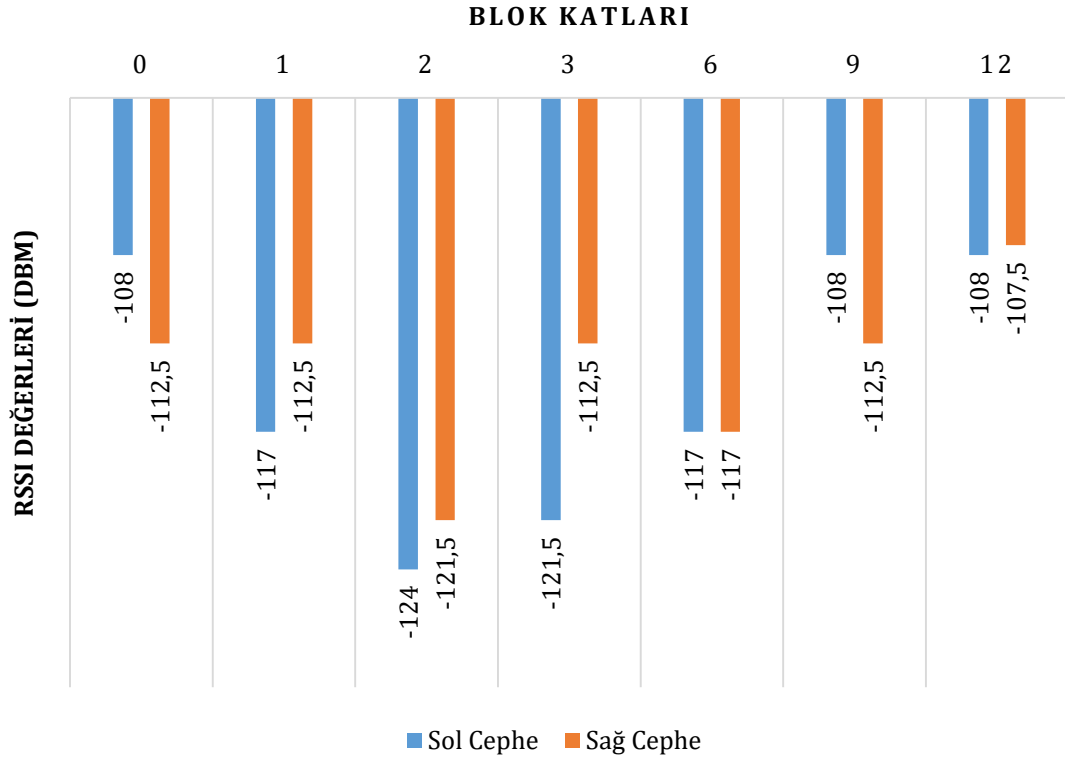
RSSI alınan sinyal gücünün göstergesidir. Toplam güç olarak da ifade edilebilen bu kavram genellikle dBm (Decibel Milliwatt, Desibel Miliwatt) cinsinden hesaplanmaktadır (Poddar vd., 2020). Sinyalin kalitesini belirlemede çok önemli bir parametre olduğu için kullanılan uç düğümlerde bu değer yazıyor oluşu, sinyaldeki değişimlerin hassasiyetini gözlemlemede yardımcı olmaktadır. Bu sebepten dolayı IEEE 802.11 standardına sahip cihazlarda genel olarak bu değer görünür olması sağlanmıştır (Vikipedi, 2020). RSSI değeri ne kadar büyükse tercih edilirliliği o kadar artmaktadır. Dolayısıyla negatif olarak ölçülen bu değer sıfıra yaklaşıyor oluşu alınan sinyalin gücünün artıyor oluşunu göstermektedir.

Her teknoloji için RSSI referans değerleri farklılık göstermektedir. Bu testler NB-IoT teknolojisinin ölçümlerini kapsayacağından Çizelge 4.1’de NB-IoT özelinde referans değerlere yer verilmiştir. Bu çizelgeye göre -65 dBm ve üzeri değerler ilgili teknoloji özelinde mükemmel bir sinyal kalitesine işaret ederken -85 dBm ve aşağısında kalan değerlere göre sinyalin kalitesi kötü olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.1. NB-IoT Teknolojisinde RSSI Referans Değerleri (Poddar vd., 2020)

Referans Değer	Durum
> -65 dBm	Mükemmel
-65 ile -75 dBm	İyi
-75 ile -85 dBm	Orta
< -85 dBm	Kötü

Sayaç şaft tüneli içerisindeki ölçümlerde, bir diğer deyişle kullanılan su sayacının metal kapak ile muhafaza edilerek yayın yaptırıldığı durumda elde edilen RSSI değerlerine Şekil 4.6 aracılığı ile ulaşılabilir.



Şekil 4.6. NB-IoT Testi RSSI Değerleri

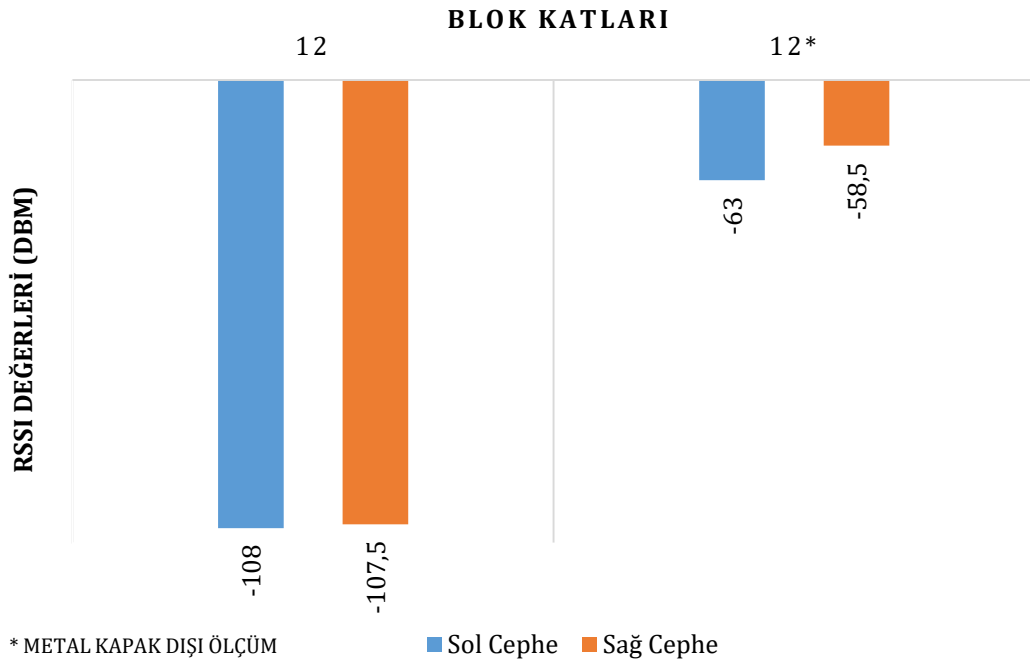
Metal kapak içi ölçümlerde elde edilen bu sonuçlar irdelenecek olursa eğer aynı cephedeki ölçümlerde katlar arası geçişlerde doğrusal bir bağlantı olmadığı görülebilir. Bunun yanı sıra iki cephe arasında da doğrusal bir artış ya da azalış ilişkisi kurulamamaktadır. Ölçümün yapıldığı noktalarda kullanılan sayacın bölgeye yakın iki baz istasyonunu da altyapı olarak kullanmış olabileceği düşünülmektedir. Ancak hangi katta hangi istasyonun kullanıldığı bilgisine ulaşamadığı için iki cephe arasında kurulacak olan ilişki anlamlı olmamaktadır.

Şekil 4.5’de sinyalin ulaşma ihtimali bulunan baz istasyonlarının bölgeye oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ancak sinyal özelinde bir değerlendirme yapılacaktır olursa eğer kuş bakışı bir yakınlıktan ziyade aradaki engel sayısının ve niteliğinin daha önemli olduğu bilinmektedir. Her iki baz istasyonu ile testin gerçekleştirildiği bölge arasında sinyalin geçişine engel olacak ve yansımayı artıracak engeller olduğu görülmektedir. Çeşitli yükseklikteki binalar, ağaçlar, duvarlar ve insanlar bu duruma örnek gösterilebilirken aynı zamanda Şekil 4.5’de kırmızı ile işaretlenmiş olan baz istasyonu ile test noktası arasında bulunan yol

da araç geçişi esnasında engel oluşturabilecek bir durum olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 4.6’da yer alan değerler Çizelge 4.1 aracılığı ile değerlendirilecek olursa eğer genel olarak tüm katlardaki RSSI değerleri -85 dBm değerinin altında kaldığından ideal aralıkta olmadığı sonucuna varılabilir. Ancak -124 dBm değerinde bile tüm paketlerin iletildiği de önemli bir çıktı olarak değerlendirilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi metal kapağın sinyalin kalitesine etkisini gözlemlemek adına 12. katın sol ve sağ cephesinde metal kapak dışı testler de gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7 aracılığı ile 12. katta aynı noktalarda elde edilen metal kapak dışı ve metal kapak içi ölçümlerin RSSI değerlerine ulaşılabilir.



Şekil 4.7. 12. Katta Metal Kapağın RSSI Değerlerine Etkisi

Şekil 4.7’de yer alan ölçüm sonuçları irdelenecek olursa eğer metal kapağın sinyal kalitesini ne denli etkilediği görülebilmektedir. Sol cephede sayaç, bina tesisat shaftı içerisinde yer aldığına RSSI değeri -108 dBm iken shaft tünelinden çıkarıldığında bu değer -63 dBm olarak ölçülmüştür. Bu da metal kapağın etkisinin sol cephede 45 dBm bir kayıp yaşattığını gözler önüne sermektedir.

Aynı şekilde sağ cephede sayaç, şaft tünelinin içerisindeyken -107,5 dBm olarak ölçülen RSSI değeri sayaç şaft tüneli dışına çıkarıldığında -58,5 dBm olarak kaydedilmiştir. Bu da metal kapağın sağ cephede 49 dBm bir kayıp yaşattığını göstermektedir.

12. katta yapılan ölçümler Çizelge 4.1'e göre değerlendirilecek olursa eğer sayaç bina tesisat şaftı içerisindeyken sol ve sağ cephede sinyalin kalitesi kötü olarak değerlendirilmekte iken aynı noktalarda şaft dışına çıkarılan sayacın sinyal kalitesi mükemmel durumuna geçmektedir. Bu test metal kapağın ilgili katta sinyalin kalitesini ne denli etkilediğine dair bir çıktı oluşturmaktadır.

Bina tesisat şaftı dışında gerçekleştirilen bu test yukarıda bahsi geçen baz istasyonu ile uç düğüm arasında yer alan bina, ağaç, duvar ve araç engellerinin sinyalin kalitesini bu kat için engellemediğini gösterirken; RSSI değerinin yalnızca metal kapaktan etkilendiğini gözler önüne sermiştir.

Ancak görece yeni binalarda su sayaçlarının bina tesisat şaftı içerisinde metal ya da ahşap kapaklarla muhafaza bir şekilde bulunmasının yaygınlaştığı görülmektedir. Ahşap kapağın sinyalin geçişine ne denli engel olacağı bu testin çıktısı ile değerlendirilemez. Ancak metal kapağın bu test için etkisi düşünüldüğünde ilgili göstergenin İstanbul için yadsınamaz bir durum oluşturacağı aşıkardır. Bu noktada sayaç üreticilerinin metal kapak parametresini göz ardı etmemesinin gerekliliğı değerlendirilmektedir.

4.3. LoRa Testi ve Analiz Sonuçları

LoRa testleri Şekil 4.8'de görülen A1. blokta gerçekleştirilirken LoRaWAN ağ geçidi ise A2. bloğun bina girişı referans alınarak sol cephesine konumlandırılmıştır. Bu ağ geçidi Şekil 4.8'de işaretlenen alana bırakılırken gerekli olan tüm kablolamalar yapılmış ve herhangi bir montaj aparatı kullanılmamıştır.



Şekil 4.8. LoRaWAN Ağ Geçidinin Konumu

Gözlemler 0, 1, 2, 3, 6, 9 ve 12. katlarda yapılmıştır. Ayrıca tüm testler bina girişi referans alınarak sol ve sağ cephe olmak üzere her katta ikişer kez tekrarlanmıştır. Gaz sayaçlarının performansını gözlemlemek adına LoRa teknolojisinden faydalanılacağı için uç düğüm Şekil 4.2’de görülen gaz sayaçlarının olduğu alana bırakılarak testler yapılmıştır.

LoRa ölçümlerinde manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü kullanılmıştır. Bu sensör doğalgaz sayacının son hanesinde bulunan mıknatıs her döndüğünde ürettiği manyetik alanı okuyarak içerisine önceden atanan endeks değerinin üzerine eklemektedir. Bu endeks değerini LoRa aracılığıyla LoRaWAN ağ geçidine iletmektedir. LoRaWAN ağ geçidi ise almış olduğu veriyi MQTT protokolü aracılığı ile buluta çıkarmakta ve IoT Platformu’na aktarmaktadır. Bahsi geçen bu topolojiye Şekil 4.9 ile de ulaşılabilir.



Şekil 4.9. LoRa Test Senaryosu Topolojisi

Manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü aracılığı ile mevcutta bulunan analog gaz sayaçlarının sayısal sayaçlar ile değiştirilmesi yerine sayaca dahil edilen bir modül ile analog sayacı sayısal sayaca dönüştürmek vaat edilmektedir.

Testlerde kullanılan manyetik alan okuyucu LoRa sensörüne Şekil 4.10 aracılığı ile ulaşılabilir. Bu aygıtın teknik özellikleri aşağıda maddeler halinde sıralandığı gibidir;

- -138 dBm alıcı hassasiyetine sahiptir.
- Varsayılan veri gücü 25 mW iken maksimum veri gücü 100 mW'tır.
- Sınırlı kentsel koşullarda 5 km'ye kadar radyo kapsama alanı, görüş alanı içerisinde ise 15 km'ye kadar bir radyo kapsama alanı vaadi bulunmaktadır.
- A sınıfı LoRaWAN cihazıdır.
- -40 °C ile +85 °C arasında bir çalışma sıcaklığı kapsamı bulunmaktadır.



Şekil 4.10. LoRa Testlerinde Kullanılan Manyetik Alan Okuyuculu LoRa Sensörü

LoRa testlerinde kullanılan LoRaWAN ağ geçidine Şekil 4.11 aracılığı ile ulaşılabilir. Bu cihazın teknik özellikleri ise aşağıda maddeler halinde sıralandığı gibidir;

- LoRaWAN ağ geçidi aynı anda birden fazla kanalda çalışılmasına izin veren Semtech SX1301 yonga setini kullanmaktadır.
- Alıcı hassasiyeti -140 dBm'dir.
- Çıkış gücü maksimum 27 dBm seviyesindedir.
- 8 kanallıdır ve Avrupa'da yayın yaptığı frekans bandı 863 ile 870 MHz arasında değişmektedir
- 10 km geniş kapsama alanı vaadi bulunmaktadır.



Şekil 4.11. Testlerde Kullanılan LoRaWAN Ağ Geçidi

Şekil 4.11’de gösterilen LoRaWAN ağ geçidi Şekil 4.8’de LoRaWAN ağ geçidi olarak işaretlenmiş olan alana bırakılmıştır ve A1. bloğun 0, 1, 2, 3, 6, 9 ve 12. katlarında manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü ile ölçümler yapılmıştır. Ölçümler her katta bina girişi referans alınarak sol ve sağ cephe olarak ikiye kez tekrarlanmıştır.

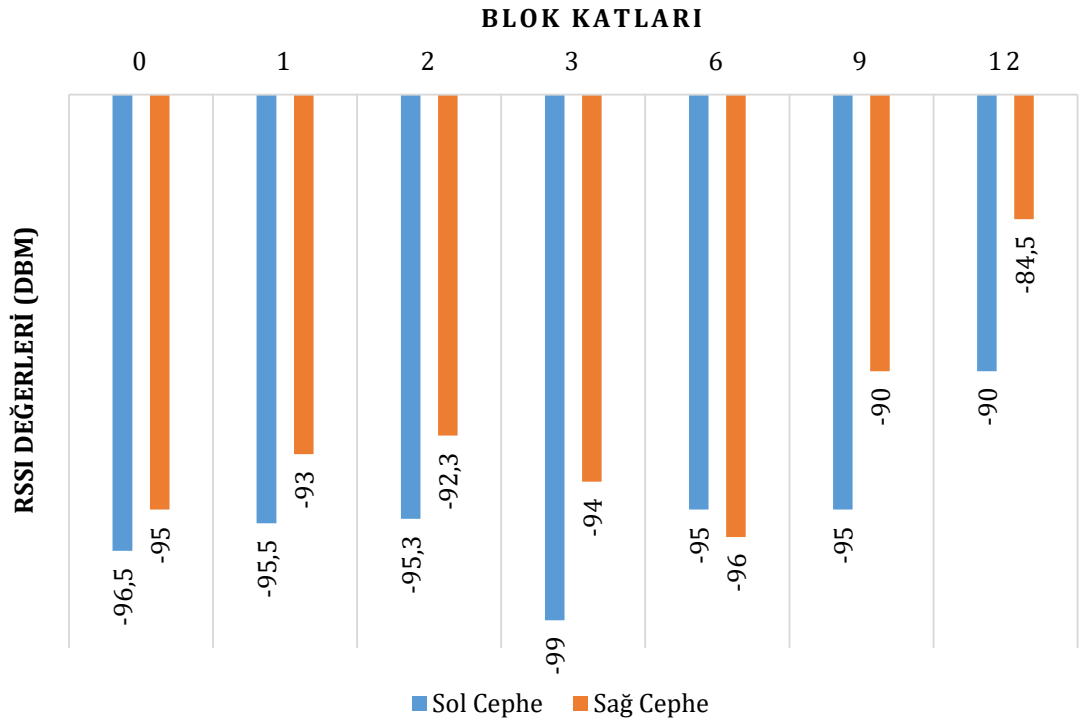
Manyetik alan okuyuculu LoRa sensörüne her ölçüm alanında yeni bir endeks değeri atanmıştır. Her ölçüm alanında bu değer ağ sunucusu arayüzüne ve IoT Platformu’na ulaşıp ulaşmadığı izlenmiştir.

Ölçüm süresince manyetik alan okuyuculu LoRa sensöründen toplamda 14 adet paket gönderilmiştir. Her bir test noktasında bu paketlerin hem ağ geçidine hem de IoT Platformu’na ulaştığından emin olunmuştur.

Bu kontroller sonrasında gönderilen 14 paketin de herhangi bir kayıp yaşamadan ağ sunucusuna ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak bunun yanı sıra her paket için manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü tarafından iletilen sinyalin baz istasyonlarına ulaşması noktasında bir eşzamanlılık problemi yaşandığı gözlemlenmiştir.

Tüm ölçüm noktalarında NB-LoT’de olduğu gibi LoRa teknolojisinde de RSSI değerleri kaydedilmiştir. Bu kavramın açıklamasına Bölüm 4.2’de yer verilmiştir. RSSI değerinin yanı sıra tüm ölçüm noktalarında LoRa için önemli bir diğer faktör olan SF de ölçülmüştür. LoRa’nın yayılma faktörü olan SF, Bölüm 3.2.1’de detaylı olarak anlatılmıştır.

Ölçüm noktalarındaki RSSI değerlerine Şekil 4.12 aracılığı ile ulaşılabilir.



Şekil 4.12. LoRa Testi RSSI Değerleri

Şekil 4.12 incelendiğinde her iki cephede de ara katlar hariç yukarı katlara çıktıkça sinyalin gücünün artmakta olduğu görülebilir. Ancak sol ve sağ cephede katlar arası geçişlerde doğrusal bir bağlantı kurulamadığı da değerlendirilmektedir.

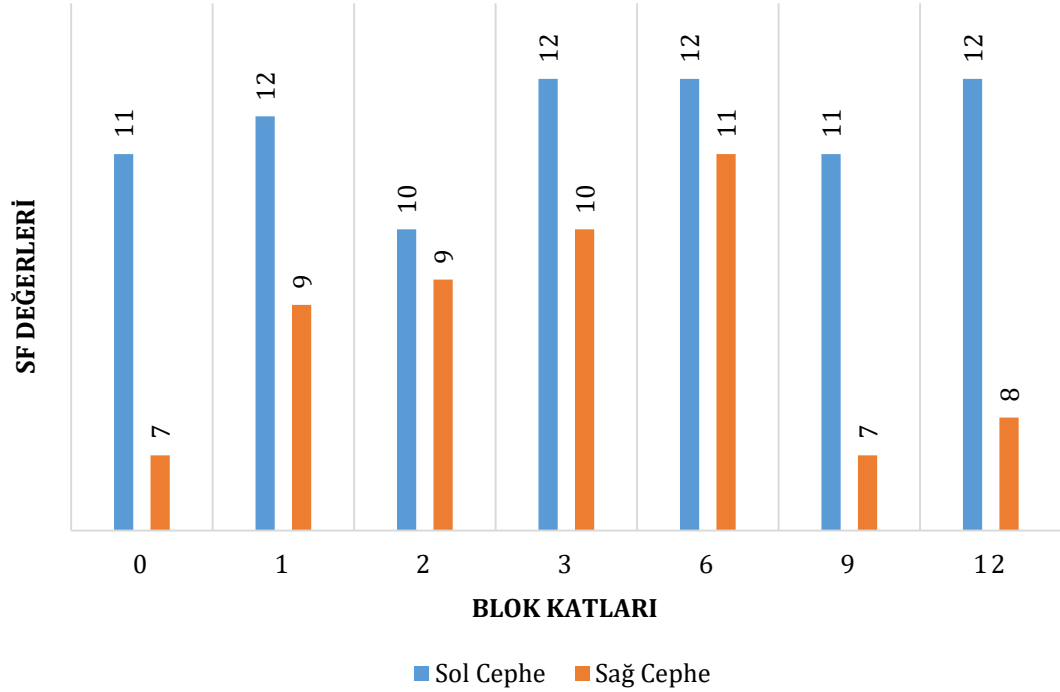
Daha önce de belirtildiği gibi LoRaWAN ağ geçidi A2. bloğun çatı katının sol cephesine doğru konumlandırılırken ölçümler A1. blokta yapılmıştır. Bu doğrultuda Şekil 4.8 incelendiğinde görülebileceği üzere A1. bloğun bina girişi

referans alınarak sağ cephesi ile A2. blok birbirine daha yakın bulunmaktadır. Bu da A1. bloğun sağ cephesinde yapılan ölçümlerde sinyalin ağ geçidine ulaşırken sol cepheye nazaran daha az engelden geçeceğini göstermektedir. Bu durum Şekil 4.12’de de görülen sağ cephedeki sinyalin sol cephedeki sinyalden daha iyi olmasını açıklamaktadır.

Genel olarak ara katlar hariç yukarı katlara çıktıkça sinyalin gücünün artması betonarme yapılı binalarda katlar arası geçişlerde sinyalin engellendiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra hem sol hem de sağ cephede aşağı katlardan yukarı katlara çıktıkça sinyalin gücünün iyileşiyor oluşu ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki mesafenin sinyal kalitesini olumsuz olarak etkilediğı çıktısını da vermektedir. Yani uç düğüm ile ağ geçidi arasındaki mesafe arttıkça beklenildiğı üzere sinyalin kalitesi kötüleşirken bu mesafe azaldığında kalitenin iyileştiğı sonucuna varılabilir.

Ara katlar olarak değerlendirilecek üç ve altıncı katlarda ise NB-IoT’de olduğu gibi LoRa’da da sinyalin gücünün düştüğü gözlemlenmiştir. Uç düğüm ile anten arasındaki mesafe azalmasına rağmen sinyalin gücünün iyileşmiyor oluşu bu parametrenin yalnızca mesafe ile ilişkili olmadığını uygulamalı olarak da göstermektedir. Ayrıca aynı cephedeki ölçümler değerlendirildiğinde yukarı katlara çıkıldıkça uç düğüm ile ağ geçidi arasındaki engelin niteliğinin değişmediğı düşünülürse bu durumun aradaki engel ile ilişkili olmadığı da görülebilir. Bu durumun nedeninin uç düğümün anteni ile ağ geçidinin anteni arasındaki açı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Sinyalin bu görüş açısındaki değişimlerden etkilendiğı görülmektedir.

Ölçüm noktalarındaki SF değerlerine Şekil 4.13 aracılığı ile ulaşılabilir.



Şekil 4.13. LoRa Testi SF Değerleri

Bölüm 3.2.1’de detaylı olarak bahsedilen SF, LoRa’nın veri hızını ifade etmektedir. LoRa, farklı veri hızlarında iletim yapabilmekte ve bu sayede ağ kapasitesinin optimizasyonunu sağlayabilmektedir. Veri iletimi noktasında herhangi bir problemle karşılaşmayan sinyal veri hızını artırarak kanalı en asgari düzeyde işgal etmekte ve diğer sinyallere daha geniş bir alan bırakmaktadır.

Şekil 4.13 incelenecek olursa her iki cephede de katlar arası geçişlerde veri hızları arasında doğrusal bir bağlantı bulunmadığı görülebilir. Sağ cephedeki ölçümlerde veri hızı sol cepheye nazaran tüm katlarda daha hızlıdır. Bu da LoRa’nın RSSI değerleri yorumlanırken belirtildiği gibi LoRaWAN ağ geçidinin konumunun A1. bloğun sağ cephesine daha yakın bulunmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla iletilen verinin ağ geçidine ulaşması noktasında karşılaşılan engel sayısı sol cepheye göre daha azdır.

Sağ cephede ara katlarda orta ve yavaş bandında seyreden veri hızı yukarı katlara çıktıkça hızlı durumuna geçmektedir. Bu da yukarı katlarda ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki iletişimin sorunsuz olarak yapılabildiğini göstermektedir. Herhangi

bir problemle karşılaşmayan sinyal veri hızını artırarak kanalı işgal etmemekte ve diğer veriler için kanalı açık bırakmaktadır.

Sol cephede ise genel olarak tüm katlarda veri hızı yavaş olarak ölçülmüştür. Bu da verinin ağ geçidine ulaşırken sorun yaşadığını göstermektedir. Bu haliyle bir kurulum yapıldığı takdirde uç düğümden iletilen verinin kanalı sürekli işgal edeceği öngörülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Haberleşme teknolojilerinin değerlendirilmesinde birçok farklı etken bulunmaktadır. Bunların başında gecikme toleransı, uç düğüm aracılığı ile iletilen sinyallerin ağ geçidine/baz istasyonuna ulaşırken kaybettiği paketlerin oranları, sinyalin kalitesini belirleyen etkenlerden biri olan RSSI ölçümleri ve LoRa haberleşme çözümü için LoRa'nın kanal kapasitesini en iyi düzeyde kullanmak adına farklı veri hızı seçeneklerini ifade eden yayılma faktörü kavramları gelmektedir. Bu bölümde her iki teknoloji için de bu etkenler çerçevesinde bir değerlendirme yapılmaktadır.

Bu bölüm Veri İletimlerinde Eşzamanlılık, Paket Kayıp Oranları, Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI) ve Yayılma Faktörü (SF) olarak sırasıyla Bölüm 5.1, Bölüm 5.2, Bölüm 5.3 ve Bölüm 5.4'de özetlenmiştir. Son olarak ise Bölüm 5.5'de Teknoloji Seçimi başlığı altında hangi teknolojinin seçileceği noktasında bir değerlendirme yapılmaktadır.

5.1. Veri İletimlerinde Eşzamanlılık

Uç düğümden iletilen verinin herhangi bir zaman kayması yaşamadan baz istasyonlarına ulaşması haberleşme sistemlerinde tercih ediciliği artırıcı bir girdi oluşturmaktadır.

NB-IoT testlerinde kullanılan sayısal su sayacı aracılığı ile iletilen 16 paketin baz istasyonlarına ulaşması noktasında gecikme problemi yaşandığı gözlemlenmiştir.

Aynı şekilde LoRa testlerinde kullanılan manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü aracılığı ile iletilen 14 paketin ağ geçidine ulaşması noktasında gecikme problemi yaşandığı gözlemlenmiştir.

Ancak günün belirli saatlerinde veri göndermesi beklenen, titreşime ve gecikmeye duyarlı olan uygulamalar için bu parametrenin birincil öncelik

taşımadığı belirtilmelidir. Bu tez çalışmasının temelini oluşturan akıllı sayaç uygulamaları da bu çatı altında gösterilebileceğinden LoRa ve NB-IoT ölçümlerinde rastlanan gecikme sorunu bu tez çalışması kapsamında ilgili teknolojileri değerlendirmede öncelik oluşturmamaktadır.

5.2. Paket Kayıp Oranları

Haberleşme sistemlerinde iletilen paketlerin herhangi bir kayıp yaşamadan baz istasyonlarına ulaşması sistemin başarısının ölçütlerinden biridir.

NB-IoT testlerinde kullanılan sayısal su sayacı aracılığı ile iletilen 16 paketin de herhangi bir kayıp yaşanmadan baz istasyonlarına iletildiği gözlemlenmiştir. Bu noktada gönderilen 16 paket için %100 bir başarı söz konusu olduğu belirtilebilir.

LoRa testlerinde kullanılan manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü aracılığı ile iletilen 14 paketin de herhangi bir kayıp yaşanmadan ağ geçidine iletildiği gözlemlenmiştir. Bu noktada gönderilen 14 paket için %100 bir başarı söz konusu olduğu belirtilebilir.

Ancak NB-IoT için 16 ve LoRa için 14 paketin ilgili teknolojileri paket kayıp oranları ölçeğinde değerlendirmede yeterli bir sayı olmadığı belirtilmelidir. Bu noktada çok daha fazla paket üzerinde yapılacak olan gözlemlerin bu oranı değiştirebileceği öngörülmektedir. Daha iyi bir paket kayıp oranı gözleminin cihazların farklı baz istasyonu kullanım yoğunluklarında ve farklı çevresel koşullarda bir süre incelenmesi ve iletilen paket sayısının artırılması ile sağlanacağı değerlendirilmektedir.

5.3. Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI)

NB-IoT ölçümlerinde kullanılan sayısal su sayacının bina tesisat shaftı içerisinde konumlandırılmış olması sinyalin metal kapaktan etkilenmesine sebep olmuştur. İlgili noktalarda sinyalin gücünün ideal aralıkta bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Metal kapağın sinyale etkisini görmek adına yapılan açık alan testlerinde aynı noktada metal kapağın ortalama 45 dBm kayıp yaşattığı gözlemlenmiştir.

LoRa ölçümlerinde ise sinyalin betonarme yapılı binada katlar arası geçişlerden etkilendiği görülmüştür. Bunun yanı sıra ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki mesafe ile sinyalin gücü arasında ters bir orantı olduğu sonucu da uygulamalı olarak gözlemlenmiştir.

Her iki teknoloji için de bazı noktalarda sinyal kalitesinin ideal aralıkta olmayışının birçok gerekçesi vardır;

Bunların başında sinyalin baz istasyonuna ulaşırken karşılaştığı metal kapak engeli gelmektedir. Bu durum LoRa ölçümlerinin koridorlarda yer alan açık alanlarda yapıldığı düşünülürse yalnızca NB-IoT ölçümleri için geçerlidir.

NB-IoT testlerinde sinyalin kalitesini ortalama 45 dBm etkileyen metal kapağın İstanbul genelindeki görece yeni olan birçok binada su sayaçlarını muhafaza ettiği bilinmektedir. Bu kapsamda ilgili gösterge İstanbul'da yer alan birçok binanın örneklemini oluşturmaktadır. Bu durum düşünüldüğünde metal kapağın NB-IoT teknolojisine etkisinin göz ardı edilemeyeceği belirtilmelidir.

Bunun yanı sıra binanın yapısının betonarme oluşu sinyalin her iki teknoloji özelinde de baz istasyonlarına ulaşırken engellendiği sonucunu ikinci önemli etken olarak gözler önüne sermektedir. Özellikle LoRa teknolojisinde uç düğümün ağ geçidine yaklaşırken sinyal gücünün iyileşiyor oluşu betonarme yapılı binalarda sinyalin katlar arası geçişlerden etkilendiğini göstermektedir.

NB-IoT için ise bölgeye yakın iki adet baz istasyonu olduğu düşünülürse uç düğümün hangi katta hangi baz istasyonu ile iletişim kurduğundan emin olunamamıştır. Bu sebepten dolayı sinyal kalitesinin katlar arası geçişlerdeki bağlantısı ve uç düğüm ile baz istasyonu arasındaki mesafenin sinyalin kalitesine etkisi arasında mutlak bir bağlantı kurulamamıştır.

Ancak İstanbul genelinde yer alan binaların genellikle betonarme yapıda olduğu düşünülürse eğer beton duvar engelinin her iki teknoloji özelinde de bazı sorunlar doğuracağı öngörülmektedir. Testin gerçekleştirildiği bina bu kapsamda İstanbul geneli için bir örneklem oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayı ilgili gösterge göz ardı edilemeyecek durumdadır.

Üçüncü öneme sahip etken ise NB-IoT testlerinde kullanılan sayısal su sayacının, LoRa testlerinde kullanılan manyetik alan okuyuculu LoRa sensörün ve LoRaWAN ağ geçidinin kurulumlarının eksik olmasıdır. İlgili teknolojilerin sitedeki performansının gözlemlenebilmesi için gerçekleştirilen testlerde herhangi bir kurulum yapılmamıştır. Bu durumda testlerde kullanılan her sayısal aygıt için kurulum şemalarının tamamlanmamış olmasının da sinyalin kalitesini etkilediği değerlendirilmektedir.

Diğer etken ise LoRa testleri esnasında kullanılan ağ geçidinin testin gerçekleştirildiği dış ortam için değil de genellikle iç ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmış olması olarak gösterilebilir. Literatürde picocell olarak yer bulmuş olan bu ağ geçitleri genellikle ofisler, alışveriş merkezleri gibi alanlarda kullanılmak için tasarlanmış olup dış mekân kullanımları için tercih edilme oranları düşüktür.

Son olarak ise NB-IoT teknolojisi için Koronavirüs salgını dolayısıyla uzaktan eğitim ve uzaktan çalışmanın olduğu bir dönemde ve mesai saatleri içerisinde gerçekleştirilen testlerde baz istasyonunu kullanım oranının fazla olması değerlendirilmektedir.

Ancak sayaçların uzaktan okunması söz konusu olduğunda uç düğümün abonenin ilgili hizmeti kullanım oranını günlük olarak iletmesi ve dolayısıyla sayaçlar tarafından günde birkaç defa veri gönderilmesi yeterli olmaktadır. Gerçek uygulamalarda bu gönderim sıklığının özellikle gece saatlerinde, baz istasyonlarının kullanım oranlarının asgari olduğu zaman dilimlerinde yapılması sağlanmaktadır. Bu durumda ilgili etkenin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılacağı da belirtilmelidir.

LoRa teknolojisi için ise ağ geçidi kullanım oranının fazla olması gibi bir durum şu an için söz konusu değildir. Bu durumun sorun teşkil etmesi için NB-IoT'de olduğu gibi LoRa haberleşme çözümü kapsamında kullanılan baz istasyonlarının da şehrin geneline yayılmış olması veya ilgili ağ geçitlerinin aktif bir şekilde kullanılıyor olması gerekmektedir.

Mevcut durumda daha geniş çerçevede Türkiye'de, daha dar kapsam da ise İstanbul'da böyle bir yayılım söz konusu değildir. Bu yayılımın söz konusu olması dahilinde ilgili gösterge değerlendirilebilir. Ancak LoRa haberleşme çözümü kapsamında kullanılan uç düğümlerin herhangi bir ağ geçidi ile ilişkilendirilmediği de bilinmektedir. Bu durumda uç düğümden çıkan sinyalin sıklıkla veri ilettiği ağ geçidinin yoğun olması durumunda onu duyabilecek yakınlıktaki diğer ağ geçitlerine ulaşması da söz konusu olacağından LoRa'nın bu sorunu asgari düzeye indirebileceği ihtimali de değerlendirilmektedir.

Bu noktada ufak bir ilave yapmak gerekirse eğer LoRa'nın NB-IoT çözümünün aksine ilk kurulum maliyeti gibi bir durumu bulunmaktadır. Ağ geçidi sayısının artıyor oluşu yoğun baz istasyonu kullanımlarında artı bir değer oluştursa da maliyet artırıcı bir girdi olarak da sürece dahil olmaktadır. Bu durumun da bütçe planlaması yapılırken değerlendirilmesi gerekmektedir.

5.4. Yayılma Faktörü (SF)

LoRa teknolojisinde yayılma faktörü ağın kanal kapasitesinin optimizasyonunun sağlanması noktasında önem teşkil etmektedir. Bu değer teknolojiyi değerlendirmede önemli bir etken olduğu düşünülmektedir.

Binada gerçekleştirilen LoRa testlerinde ölçülen SF değerleri bloğun sağ ve sol cephesinde farklı değerler almıştır. Ancak genel olarak özellikle binanın ağ geçidine görece daha uzak olan sol cephesinin tüm katlarında ve ağ geçidine daha yakın olan sağ cephesinin ara katlarında veri hızı yavaş olarak ölçülmüştür. Bu durumda ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki mesafenin artmasının görüş

hattındaki engellerden etkilenme oranını artırdığı ve sinyalin ağ geçidine ulaşırken zorlandığı gözlemlenmiştir.

Binanın ağ geçidine yakın olan sağ cephesinde ise ara katlar dışında kalan diğer alanlarda veri hızı orta ve hızlı bandında seyretmiştir. Binanın ağ geçidine uzak olan sol cephesine nazaran bu kanadın veri iletme hızının daha fazla olması uç düğüm ile ağ geçidi arasındaki mesafenin azalmasının görüş hattındaki engellerden etkilenme oranını düşürdüğünü ve yayında kalma süresini azalttığını göstermektedir.

Bu durumda manyetik alan okuyuculu LoRa sensöründen iletilen sinyalin LoRaWAN ağ geçidine ulaşması noktasında testin yaklaşık %65 gibi bir kısmında çok yavaş veri hızı ile kanalı sürekli olarak işgal ettiği görülmektedir. Kalan %35'lik kısmında ise uç düğüm ile ağ geçidi arasındaki engelin oldukça azaldığı gözlemlenmiştir. Betonarme yapı binalarda sinyalin katlar arasında engellenmesi, antenin görüş açısındaki değişimler, yansıma ve ağ geçidi ile uç düğüm arasındaki mesafenin bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir.

Bu şartlarda bir kurulum yapıldığı takdirde ölçümlerin gerçekleştirildiği noktaların %65 gibi bir kısmında manyetik alan okuyuculu LoRa sensörü aracılığı ile iletilen verilerin yayında kalma süresinin fazla olacağı ve ilgili noktalarda çok yavaş veri hızı ile kanalın işgal edileceği öngörülmektedir. LoRa'nın farklı yayılma faktörleri ile ağ performansını optimize etmesi durumu bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen testlerin %65 gibi bir kısmında gözlemlenememiştir.

5.5. Teknoloji Seçimi

Hangi teknolojinin seçileceği noktasında bir karar verilebilmesi için farklı çevre koşulları, farklı modemler, çok sayıda uç düğüm ile gözlemler yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen testler hangi teknolojinin daha uygun olduğuna dair kesin bir çıktı verememektedir.

Ancak farklı modemler ve çok sayıda uç düğüm şartının sağlanması durumunda gerçekleştirilecek olan testin yalnızca ilgili bölge için bir performans değerlendirmesi içereceğinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Çünkü İstanbul coğrafi yapısı ve mimarisi değerlendirildiğinde sinyal iletimi noktasında birçok farklı bölgeye ayrılabilir bir şehir olarak değerlendirilmektedir.

Bu noktada şehir özelinde bölgenin coğrafi yapısı, kent içi veya kırsal alanda bulunuşu, bölgede yer alan bina sayısı, bu binaların yüksekliği, görüş hattındaki binaların yapı malzemesi, sinyalin geçişini etkileyecek ağaç yoğunluğu, araç sayısı, insan kalabalığı, geçitler, köprüler, duvarlar gibi parametreler; haberleşme ölçeğinde ise sistemin kapsama alanı, ölçeklenebilirliği, güç gereksinimi, pil ömrü, menzil mesafesi, ilk kurulum maliyeti, işletme maliyeti, bant genişliği, bölgede baz istasyonunun mevcudiyeti, baz istasyonuna olan uzaklık, baz istasyonu ile test noktası arasındaki engelin niteliği ve yoğunluğu, antenin görüş açısı, yansıma katsayısı, baz istasyonu sayısı gibi parametreler İstanbul'un haberleşme düzeyini etkileyerek şehri bu kapsamda farklı bölgelere ayırabilmektedir.

Bu doğrultuda şehrin herhangi bir noktasında gerçekleştirilen haberleşme teknolojisi testinin İstanbul geneli için bir çıktı oluşturması beklenemez. Böyle bir genellemenin yapılması mümkün değildir. Ayrıca İstanbul'da tek bir haberleşme teknolojisinin seçimi yukarıda bahsi geçen nedenler dolayısıyla doğru olmayacaktır. Bu kapsamda birden çok teknolojiyi içeren hibrit bir çözümün şehrin genelini kapsanmasında daha iyi bir sonuç doğuracağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., Watteyne, T., 2017. Understanding the Limits of LoRaWAN. IEEE Communications Magazine, 55(9), 34–40.
- Campo, G. Del, Gomez, I., Canada, G., Santamaria, A., 2019. Hybrid LPWAN Communication Architecture for Real-Time Monitoring in Power Distribution Grids. 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 15-18 Nisan, İrlanda, 920–924.
- Chen, M., Miao, Y., Hao, Y., Hwang, K., 2017. Narrow Band Internet of Things. IEEE Access, 5(September 2017), 20557–20577.
- Cho, S., Kim, H., Lee, Y., Shin, J., 2019. On the NB-IoT Used for Aids to Navigation. 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 16-18 Ekim, Güney Kore, 1257–1259.
- Fujdiak, R., Mlynek, P., Misurec, J., Strajt, M., 2018. Simulated Coverage Estimation of Single Gateway LoRaWAN Network. 2018 25th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 20-22 Haziran, Slovenya.
- Gregora, L., Vojtech, L., Neruda, M., 2016. Indoor signal propagation of LoRa technology. 2016 17th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME), 7-9 Aralık, Çek Cumhuriyeti.
- İstanbul Gaz Dağıtım Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi (İGDAŞ), 2021. Grafiklerle İGDAŞ. Erişim Tarihi: 06.05.2021. <https://www.igdas.istanbul/grafiklerle-igdas>
- Jia, G., Zhu, Y., Han, G., Chan, S., Shu, L., 2020. STC: an intelligent trash can system based on both NB-IoT and edge computing for smart cities. Enterprise Information Systems, 14(9–10), 1422–1438.
- Kabalci, Y., Ali, M., 2019. Emerging LPWAN Technologies for Smart Environments: An Outlook. 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), 12-15 Haziran, Türkiye, 24-29.
- Lalle, Y., Fourati, L. C., Fourati, M., Barraca, J. P., 2019. A Comparative Study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for Smart Water Grid. 2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), 18-20 Aralık, Fransa, 1–6.
- Li, L., Ren, J., Zhu, Q., 2017. On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System. 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), 21-24 Şubat, Amerika, 77–80.

- LoRa Alliance, 2015. A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. Technical Marketing Workgroup 1.0, 20s.
- LoRa Alliance, 2020. LoRaWAN® SECURITY FREQUENTLY ASKED QUESTIONS. Erişim Tarihi: 27.11.2020. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2020-02/la_faq_security_0220_v1.2_0.pdf
- LoRa Alliance, 2021. LoRaWAN® Coverage. Erişim Tarihi: 26.02.2021. <https://lora-alliance.org/lorawan-coverage/>.
- Lueth, K.L., (2018). State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating. Erişim Tarihi: 23.02.2021. <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>.
- Malik, H., Khan, S. Z., Sarmiento, J. L. R., Kuusik, A., Alam, M. M., Le Moullec, Y., Parand, S., 2019. NB-IoT network field trial: Indoor, outdoor and underground coverage campaign. 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), 24-28 Haziran, Fas, 537–542.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F., 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express, 5(1), 1–7.
- Muzammir, M. I., Abidin, H. Z., Abdullah, S. A. C. ve Zaman, F. H. K., 2019. Performance Analysis of LoRaWAN for Indoor Application. 2019 IEEE 9th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), 27-28 Nisan, Malezya, 156–159.
- Paredes, M., Bertoldo, S., Carosso, L., Lucianaz, C., Marchetta, E., Allegretti, M., Savi, P., 2019. Propagation measurements for a LoRa network in an urban environment. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 33(15), 2022–2036.
- Petäjäjärvi, J., Mikhaylov, K., Roivainen, A., Hänninen, T., Pettissalo, M., 2015. On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), 2-4 Aralık, Danimarka, 55–59.
- Poddar, N., Khan, S. Z., Mass, J., Srirama, S. N., 2020. Coverage Analysis of NB-IoT and Sigfox: Two Estonian University Campuses as a Case Study. 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 15- 19 Haziran, Kıbrıs, 1491–1497.
- Semtech, 2015. LoRa™ Modulation Basics. Rapor No: AN1200.22, 26s.
- Seye, M. R., Gueye, B., Diallo, M., 2017. An evaluation of LoRa coverage in Dakar Peninsula. 2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and

- Mobile Communication Conference (IEMCON), 3-5 Ekim, Kanada, 478–482.
- Sinha, R. S., Wei, Y., Hwang, S. H., 2017. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3(1), 14–21.
- Sultania, A. K., Zand, P., Blondia, C., Famaey, J., 2018. Energy Modeling and Evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX. 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 9-13 Aralık, Birleşik Arap Emirlikleri.
- Tang, J., Li, J., Zhong, A., Xiong, B., Bian, X. ve Li, Y., 2019. Application of LoRa and NB-IoT in Ubiquitous Power Internet of Things: A Case Study of Fault Indicator in Electricity Distribution Network. 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), 6-9 Eylül, Çin, 380–383
- Tankut, E., Çelikkaya, B., Yurdakoç E., Sisalan, V., Catak, M., 2019. Akıllı Su Sayaçlarında Çift Yönlü LoRaWAN Protokolü ve IoT Uygulaması. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 2(3), 32-36.
- Telit, 2020. ME310G1/ME910G1/ML865G1 PSM Application Note. Rapor No: 80617NT11830A, 28s.
- Vatcharatiansakul, N., Tuwanut, P. ve Pornavalai, C., 2017. Experimental performance evaluation of LoRaWAN: A case study in Bangkok. 2017 14th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), 12-14 Temmuz, Tayland.
- Vejlgaard, B., Lauridsen, M., Nguyen, H., Kovacs, I. Z., Mogensen, P. ve Sorensen, M., 2017. Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT. 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 4-7 Haziran, Avusturalya.
- Vos, G., 2020. What is eDRX (Extended Discontinuous Reception). Erişim Tarihi: 20.04.2021. <https://www.sierrawireless.com/iot-blog/edrx-lpwa/>
- Wang, Y.-P. E., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., Blankenship, Y., Bergman, J., Razaghi, H. S., 2017. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT). *IEEE Communications Magazine*, 55 (3), 117-123.
- Wibisono, G., Permata, S. G., Awaludin, A., Suhasfan, P., 2017. Development of advanced metering infrastructure based on LoRa WAN in PLN Bali toward Bali Eco smart grid. 2017 Saudi Arabia Smart Grid (SASG), 12-14 Aralık, Arabistan, 1–4.
- Winalisa, S., Nashiruddin, M. I. (2020). Designing NB-IoT (Internet of Things) Network for Public IoT in Batam Island. 2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT), 24-26 Haziran, Endonezya.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sümeyye YASİNTİMUR

Eğitim Durumu

Lise : Özel Doğa Anadolu Lisesi, 2012

Lisans : Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans : İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yayınları

Yasintimur S., Tavas V., 2021. NB-IoT ve LoRa Haberleşme Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Performans Analizi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Basımda.