

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**VERİ DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI VE
ZİGBEE TABANLI UYGULAMASI**

Gürkan ÇELİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARALIK 2018

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**VERİ DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI VE
ZİGBEE TABANLI UYGULAMASI**

Gürkan ÇELİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARALIK 2018

ANTALYA

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

VERİ DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI VE ZİGBEE TABANLI UYGULAMASI

Gürkan ÇELİK

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bu tez TÜBİTAK 3001 Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı
tarafından 115E198 nolu proje ile desteklenmiştir.**

ARALIK 2018

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

VERİ DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI VE ZİGBEE TABANLI UYGULAMASI

Gürkan ÇELİK

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 31/12/2018 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ümit Deniz ULUŞAR (Danışman)

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğretim Üyesi Yılmaz Kemal YÜCE

ÖZET

VERİ DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI VE ZİGBEE TABANLI UYGULAMASI

Gürkan ÇELİK

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ümit Deniz ULUŞAR

Aralık 2018; 50 sayfa

Gelişen teknolojiyle birlikte artan iletişim yükü ve enerji tüketimi, değişen güvenlik ve kullanıcı ihtiyaçları, iletim birimlerinin birbirleriyle haberleşirken akıllı davranışlar sergilemelerini gerektirmektedir. Bu davranışları gerçekleştirebilmek için ağ bileşenlerinin kendi arasındaki bağlantı gücü ve kalitesi gibi parametreleri değerlendirerek, ağın organize edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç doğrultusunda akıllı ve düşük maliyetli veri iletimini sağlayan ağlar bünyesinde, yaygınlaştırmasını verimli kılan optimize edilmiş veri dağıtım düğümleri gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, birlikte çalışabilirlik, performans, kaynak yönetimi ve fiyat açısından önemli uygulama gereksinimlerini ve çeşitli kullanıcı beklentilerini karşılayabilecek inovatif tümleşik platformlar, veri dağıtım tekniklerini konusunda konumlandırma yöntemi önerilerinde bulunulmuştur. Yeni nesil internet için akıllı bir veri dağıtım sisteminde ağa bağlı şekilde bulunan modüllerin enerji durumunu kontrol eden, birbirleriyle olan mesafelerini göz önünde bulunduracak sistemin gerekliliği ortaya konulmuştur. ZigBee tabanlı ağ ile ölçümler yapılarak uçuş süresi (ToA-Time of Arrival) ve alınan işaret gücü göstergesi (RSSI-Received Signal Strength Indicator) yöntemleri karşılaştırılmıştır. Gerçek ortam testleri için ZigBee tabanlı düğümler tasarlanmıştır. Ölçümler ile elde edilen bulgulara dış mekânda ToA tabanlı ölçümlerde referans ölçümden 1,13 kat daha düşük iç mekânda 1,17 kat daha yüksek tahminler elde edilmiştir. RSSI tabanlı ölçümlerle dış mekânda referans mesafeden ortalama olarak 2,4 kat iç mekânda 2,6 kat fazla değer elde edilmiştir. ToA değerlerinin hata oranları daha uzun mesafeler için daha düşük sonuçlar vermiştir yani mesafe arttıkça tahminler beklenen değere yaklaşma eğilimi göstermiştir. Bu değerlerin hata oranını azaltmak için çeşitli filtreleme ve istatistiksel yöntemler kullanılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Kablosuz sensör ağları, nesnelerin interneti, RSSI, ToA, konumlandırma, ZigBee

JÜRİ: Doç. Dr. Ümit Deniz ULUŞAR

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğretim Üyesi Yılmaz Kemal YÜCE

ABSTRACT

DATA DISTRIBUTION SYSTEM DESIGN AND ZIGBEE BASED APPLICATION

Gürkan ÇELİK

M.Sc. Thesis in Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ümit Deniz ULUŞAR

December 2018; 50 pages

The increasing communication burden and energy consumption, changing security and user needs together with the developing technology require the transmission units to display intelligent behaviors while communicating with each other. To accomplish this, the network components for storing, processing and transmitting data; there is a need to evaluate the network situation and to organize the communication with each other well. For this purpose, optimized data distribution nodes are required within the networks that provide intelligent and low-cost data transmission, making their deployment efficient.

In this study, recommendations for positioning methods in terms of interoperability, performance, resource management and innovative integrated platforms that can meet various user expectations and data distribution techniques were made. ZigBee based nodes for real environment testing were designed and produced. Results of measurements that check the energy status of the modules on the network in a smart data distribution system for the next generation internet and take into account their distance from each other. With the experiments; time of arrival (ToA) and the received signal strength indicator (RSSI) methods are compared. The findings indicate that in ToA based measurements are on average 1.13 times lower under outdoor conditions and 1.17 times higher under indoor conditions. RSSI based measurements on average 2.4 and under indoor conditions 2.6 times higher under outdoor conditions than the reference distance. The difference of the ToA values gives more accurate results for longer distances, so the estimates are closer to the expected value as the distance increases. Several filtering and statistical methods were used to reduce the error rate of these values.

KEYWORDS: Wireless sensor networks, internet of things, RSSI, ToA, localization, ZigBee

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ümit Deniz ULUŞAR

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Asst. Prof. Dr. Yılmaz Kemal YÜCE

ÖNSÖZ

Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanan bu bilimsel çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) “3001” kodlu “Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı” tarafından 115E198 numaralı proje desteği ile gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında, yeni nesil internet tasarımında oldukça kritik bir öneme sahip olan konumlandırma ile ilgili detaylı ve karşılaştırılmalı çalışma yapılmıştır. ZigBee tabanlı sensör modülleri üretilmiş ve gerçek ortamda çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince bana her türlü desteği veren, gelecekteki akademik kariyerime rol model olan danışman hocam Doç. Dr. Ümit Deniz ULUŞAR başta olmak üzere, proje çalışmasına sensör tasarımında ve üretiminde destek veren ComNets Lab bünyesindeki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Son olarak her zaman yanımda olduklarını bildiğim, beni daima motive eden sevgili eşime ve değerli aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Tez çalışmasının ve gerçekleştirilen yayınların bilimsel çalışmalara katkı sağlamasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Yol Kaybı – Path Loss (PL)	6
2.2. Alınan Sinyal Gücü – Received Signal Strength (RSS)	8
2.3. Veri İletim Süresi – Time of Arrival / Time of Flight (ToA / ToF)	12
2.4. Bağlantı Kalite Göstergesi – Link Quality Indicator (LQI)	13
2.5. Yönlendirme – Routing	13
2.6. Heterojen Ağlar – Heterogenous Networks (HetNets)	14
2.7. Ağ Tasarımı için Zorluklar ve Etmenler	14
2.7.1. Erişebilirlik	15
2.7.2. Ölçeklenebilirlik	15
2.7.3. Enerji Tasarrufu ve Tüketimi	15
2.7.4. Maliyet	15
2.7.5. Güvenlik	16
2.7.6. Gizlilik	16
2.7.7. Güvenilirlik	16
2.7.8. Gecikme	16
3. MATERYAL VE METOD	17
3.1. Donanım ve Yazılım	17
3.2. Ölçümler	19
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	22
5. SONUÇLAR	45
6. KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Veri Dağıtım Sistemi Tasarımı ve ZigBee Tabanlı Uygulaması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

31/12/2018
Gürkan ÇELİK



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	Işık hızı
d	Mesafe
d_0	Referans mesafe
f	Frekans
m	Metre
ps	Pikosaniye
r	Yarıçap
R	Çap
sn	Saniye
λ	Dalga boyu
π	Pi sayısı

Kısaltmalar

ACK	Onay mesajı – Acknowledge message
AoA	Veri iletim açısı – Angle of arrival
AoF	Veri uçuş açısı – Angle of flight
BS	Baz istasyonu – Base Station
CN	Bilişsel düğüm – Cognitive node
dB	Desibel
dBm	Desibelmili
FBS	Femtocell baz istasyonları – Femtocell base stations
G_{rx}	Alıcı antenin kazancı – Gain of receiver antenna
G_{tx}	Verici antenin kazancı – Gain of transmitter antenna
IoT	Nesnelerin interneti – Internet of things
ICSN	Bilgi merkezli sensör ağı – Information centric sensor network

LQI	Bağlantı kalite göstergesi – Link quality indicator
MBS	Makrocell Baz İstasyonları – Macrocell base stations
MCMP	Çoklu kısıtlı çok yollu – Multiple constraint multi path
mW	Miliwatt
OL	Gözlemlenen gecikme – Observed latency
PL	Yol kaybı – Path loss
Pr	Başarılı veri iletim olasılığı – Probability of successful data reception
P _{ref}	Referans güç
P _{rx}	Alınan güç – Received power
P _{tx}	Verici gücü – Transmitted power
QoI	Bilgi kalitesi – Quality of information
QoS	Servis kalitesi – Quality of service
RAT	Radyo erişim teknolojileri – Radio access technologies
RN	Aktarma düğümü – Relay node
RSS	Alınan işaret gücü – Received signal strength
RSSI	Alınan işaret gücü göstergesi – Received signal strength indicator
RTLD	Gerçek zamanlı haberleşme için durumsuz protokol – Real time with load disturbed routing
SAR	Sıralı atama yönlendirme – Sequential assignment routing
SPEED	Gerçek zamanlı yük ayrılmış yönlendirme – The stateless protocol for real-time communications in sensor networks
TDoA	Veri iletim farkı süresi – Time difference of arrival
TDoF	Veri uçuş farkı süresi – Time difference of flight
ToA	Veri iletim süresi – Time of arrival
ToF	Veri uçuş süresi – Time of flight
USB	Evrensel Seri Veri yolu – Universal serial bus
WPAN	Kablosuz kişisel alan ağı – Wireless personal area network

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Serbest yayılım uzayı yol kaybı modellemesi	7
Şekil 2.2. Mesafeye bağlı olarak değişen PL grafiği	8
Şekil 2.3. Alınan güç değerinin mesafeye bağlı değişimi grafiği	9
Şekil 2.4. RSS değerinin farklı mesafelere göre değişimi	10
Şekil 2.5. RSS – Prx ilişkisi grafiği ($P_{ref}=1mW$ kabul edildiğinde).....	10
Şekil 2.6. Verici ve alıcı düğümler arası veri transferi ve ToA hesabı şeması	12
Şekil 2.7. FBS, MBS ve mobil kullanıcı içeren bir heterojen ağ şeması	14
Şekil 3.1. a) USB alıcı düğüm (JN5169), b) Programlanan verici düğüm (JN5168)	18
Şekil 3.2. a) Ağ düğümü yandan görünüş, b) Ağ düğümü üstten görünüş.....	18
Şekil 3.3. Alıcı ve verici düğümler arası haberleşme şeması.....	19
Şekil 3.4. Dış mekân ölçüm ortamı	20
Şekil 3.5. İç mekân ölçüm ortamı.....	20
Şekil 3.6. Altıgen biçiminde yerleştirilmiş düğümler ile kurulan ağ.....	21
Şekil 4.1. Dış mekânda mesafeye bağlı LQI güvenilirliği grafiği.....	25
Şekil 4.2. Dış mekânda beklenen ve ölçülen RSS değerleri grafiği.....	26
Şekil 4.3. Dış mekânda güçlendirilmiş ölçülen ve teorik RSS değerleri grafiği.....	27
Şekil 4.4. Dış mekân RSSI, ToA temelli mesafe ölçümünün referansa bağlı grafiği	27
Şekil 4.5. Dış mekân RSSI ve ToA değerlerinin hata oranı grafiği	28
Şekil 4.6. Dış mekânda RSSI değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması	28
Şekil 4.7. Dış mekânda ToA değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması	29
Şekil 4.8. İç mekânda mesafeye bağlı LQI güvenilirliği grafiği	33
Şekil 4.9. İç mekân RSSI, ToF temelli mesafe ölçümünün grafiği.....	34
Şekil 4.10. İç mekân RSSI ve ToF tabanlı ölçümlerin hata oranı	34
Şekil 4.11. İç mekân beklenen ve ölçülen RSSI değerleri grafiği.....	35
Şekil 4.12. İç mekânda güçlendirilmiş ölçülen ve teorik RSS değerleri grafiği	35
Şekil 4.13. İç mekânda RSSI değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.14. İç mekânda ToF değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması	36
Şekil 4.15. İç mekânda ToF değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması	43
Şekil 4.16. Zamana bağlı batarya durumu grafiği	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. CISCO tarafından oluşturulan RSS – RSS% (RSSI) dönüşümü	11
Çizelge 4.1. Dış mekân 25 metre mesafede haberleşme parametreleri	22
Çizelge 4.2. Dış mekân 50 metre mesafede haberleşme parametreleri	23
Çizelge 4.3. Dış mekân 75 metre mesafede haberleşme parametreleri	23
Çizelge 4.4. Dış mekân 100 metre mesafede haberleşme parametreleri	24
Çizelge 4.5. Dış mekân 125 metre mesafede haberleşme parametreleri	25
Çizelge 4.6. İç mekân 3 metre mesafede haberleşme parametreleri	30
Çizelge 4.7. İç mekân 7 metre mesafede haberleşme parametreleri	30
Çizelge 4.8. İç mekân 13 metre mesafede haberleşme parametreleri	31
Çizelge 4.9. İç mekân 17 metre mesafede haberleşme parametreleri	32
Çizelge 4.10. İç mekân 23 metre mesafede haberleşme parametreleri.....	32
Çizelge 4.11. İç mekân 5 metre mesafede haberleşme parametreleri	37
Çizelge 4.12. Dış mekân 5 metre mesafede haberleşme parametreleri	37
Çizelge 4.13. İç mekân 10 metre mesafede haberleşme parametreleri.....	38
Çizelge 4.14. Dış mekân 10 metre mesafede haberleşme parametreleri	39
Çizelge 4.15. İç mekân 15 metre mesafede haberleşme parametreleri.....	39
Çizelge 4.16. Dış mekân 15 metre mesafede haberleşme parametreleri	40
Çizelge 4.17. İç mekân 20 metre mesafede haberleşme parametreleri.....	41
Çizelge 4.18. Dış mekân 20 metre mesafede haberleşme parametreleri	41
Çizelge 4.19. İç mekân 25 metre mesafede haberleşme parametreleri.....	42
Çizelge 4.20. Dış mekân 25 metre mesafede haberleşme parametreleri	42

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle birlikte iletişimin artan yükü, enerji verimliliği değişen güvenlik ve kullanıcı ihtiyaçları iletimin parçalarını oluşturan birimlerin organize olurken akıllı davranışlar sergilemelerini gerektirmektedir. Bunu gerçekleştirmek için saklama, işleme ve iletim anında verinin değerlendirilmesi ve ağı oluşturan bileşenlerin birbirleriyle olan iletişimlerinin iyi organize edilmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda hızlı ve düşük maliyetli veri iletimini sağlayan ağlar bünyesinde, veri yaygınlaştırmasını verimli kılan optimize edilmiş veri dağıtım yapıları gerekmektedir (Ulusar vd. 2017a).

Mevcut veri dağıtım yaklaşımları bazı açılardan kullanıcı beklentilerini tam olarak karşılayamamaktadırlar. Bu beklentilerden ön plana çıkanlar iletimde farklı yönlerden esneklik sağlanması ve derinlemesine veri ulaşılabilirliği sunabilmesidir. Şimdiye kadar önerilen ve günümüzde uygulanan klasik yaklaşımlar sunucu tabanlı ağ mimarisi ve iletişim protokollerine dayanmaktadır. Bu sebepten dolayı bu yaklaşımlar, veri iletim zamanı, düğümlerin enerji kullanımı ve veri ulaşılabilirliği açısından ağır yönetilmesi açısından sınırlı kalmaktadırlar. Bu sınırlamayı aşabilmek için akıllı telefonlar, radyo frekans tanımlama sistemleri (RFIDs), yollardaki akıllı etiketler ve sensörler, araçlar, binalar ve yaşam alanları gibi çok yönlü veri kaynakları yeni nesil internetteki veri ve enerji temelli ağ taşıyıcılarını destekleyecek şekilde düzenlenebilir. Gelecekteki ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak, entegre teknolojiler, inovatif veri ve iletim düğümü türünü temel alan mimarilere ve iletişim protokollerine adapte edilmelidirler (Ulusar vd. 2017a).

Bu bilimsel çalışmada, birlikte çalışabilirlik, kaynak yönetimi ve fiyat açısından önemli uygulama gereksinimlerini ve çeşitli kullanıcı beklentilerini karşılayabilecek inovatif tümleşik platformlar, yerleşim ve veri dağıtım tekniklerini araştırılmıştır. Üzerinde çalışılan yöntemlerin test edilebilirliği, ZigBee kullanılarak oluşturulan sensör düğümleri ile çeşitli deneyler ile sağlanmıştır. Deneyler yardımı ile elde edilen sonuçlar simülasyon ortamındaki sonuçlarla karşılaştırılmış ve yöntemler değerlendirilmiştir. Sonuçlarla yeni nesil internet için akıllı bir veri dağıtım sisteminde ağda bulunan modüllerin enerji durumunu kontrol eden, birbirleriyle olan mesafelerini göz önünde bulundurarak tercih yapan bir yönlendirme için, ToA değeri ağırlıklı konumlandırmanın daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir (Ulusar vd. 2017a).

Çalışmada kablosuz iletişim kuran düğümler arasında başarılı bir veri alışverişi olasılığının artırılması için sensör ağında sensörlerin mesafelerini belirlenen kalite parametrelerine göre en uygun yerlere konumlandırma önerilmiştir. Düğümlerin yerleşim planı için kullanılabileceğini düşünmüş olduğumuz LQI, RSSI ve ToA değerlerini haberleşme verileri ile birlikte öğrenilebilmektedir. Veri aktarım süresini ifade eden ToA, alınan güç göstergesini belirten RSSI ve kalite parametresi olan LQI değerini kullanarak konumlandırma kestiriminin iyileştirilmesi üzerinde çalışılmıştır.

Çalışmanın; gelecek çalışmalar için ise bilinçli karar verebilecek ağı yerleşim ve yönlendirme protokolünü yönetebilecek bilişsel düğümün kullanılması düşünülmektedir. Aktarma düğümlerinin yönetebilmesine olanak sağlayabilecek bilişsel düğümün öğrenmesi, yönlendirme için vermesi gereken kararları QoI gereksinimlerini karşılayan alıcıya ulaştırmak için en uygun yolları belirlemeye yararmaktadır. Bu biliş

unsuru, alıcıya mesajın ulaşması için en uygun rotada bulunan RN'lerin yerlerinin tespit edilmesi için kullanılabilecektir.

Bu tezin 2. bölümünde nesnelerin interneti, kablosuz sensör ağları, bilgi kalitesi, servis kalitesi, yol kaybı, alınan işaret gücü, veri iletim süresi, bağlantı kalitesi, yönlendirme, heterojen ağlar ve ağ tasarımındaki zorluklar ile alakalı literatürdeki bilgilerden ve çalışmalardan bahsedilmiştir. 3. bölümde bu çalışmada kullanılan yöntem açıklanmış, donanım ve yazılım özelliklerinden bahsedilmiş, ölçüm yapılan test ortamı hakkında bilgiler verilmiştir. 4. bölümde çalışma sonucu elde edilen veriler hakkındaki bulgular ve tartışmalardan bahsedilmiştir. Son olarak 5. bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



2. KAYNAK TARAMASI

İnsanlık tarihinin en önemli ve en güçlü çıktılarından biri olan internet ile iş, bilim, eğitim, iletişim gibi birçok alanda hayatımız oldukça kolaylaştı. Teknolojideki değişimler ile birlikte geliştirilen haberleşme aygıtları nesnelerin interneti (IoT) kavramının gelişmesinde oldukça etkili olarak karşımıza çıkmaktadır. IoT henüz geçtiğimiz yüzyılın sonlarında ortaya atılmış olmasına rağmen son zamanlarda çok daha çeşitli teknoloji alanlarında yerini almaktadır. Günümüzde IoT, çevre, sağlık ve tıbbi alanlar arasında değişen akademik ve endüstriyel kullanımlarda, konumlandırma, güvenlik, izleme gibi çeşitli uygulamaları ve hizmetleri sağlamaktadır. Bu kavramın ana fikri, çevremizdeki her yerde var olan, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, tablet gibi akıllı cihazların yanında günlük kullanım için üretilen televizyon, buzdolapları gibi aygıtları da kapsayarak tamamının internete bağlanarak daha kolay ve pratik şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Bununla birlikte giyilebilir cihazlar ve akıllı sensörler gibi uygulamaları da hızlı bir şekilde kapsayacaktır. Mobil veri trafiğinin 2015 yılından 2020 yılına kadar 8 kat artacağı ve mobil bağlantılı cihazların sayısının 2020 yılına kadar 11,6 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Ulusar vd. 2017a). Bu kapsamda IoT özellikli teknoloji yardımıyla daha kişiselleştirilmiş ve bireyden bireye değişen sistemlere doğru ilerlenmektedir.

IoT tabanlı teknolojinin e-sağlık ve akıllı şehirlerde başarıyla kullanılması, daha hızlı ve daha güvenli olmasına, daha düşük maliyete ve sürdürülebilirliği artırmaya doğrudan katkısı olacağı düşünülmektedir. IoT geliştikçe, ağlar ek güvenlik, analitik ve yönetim yetenekleriyle bağlantılı olarak güçlenecektir. Sensörler tarafından algılanan ve toplanan verilerin işlenerek kendi kendine karar verebilen yapıya sahip olması da hayata geçebilecektir. Bu sayede de IoT'nin insanlar tarafından yönetilen aygıtların ve sistemlerin daha otonom ve daha akıllı hale gelmesini sağlayacaktır (Ulusar vd. 2017b). Uzunca bir süredir hayatımızın her alanında olan sensörler, yalnızca veri algılama ve depolama yeteneğine sahipti. Ancak gün geçtikçe internete bağlanıp algıladığı bu verileri işleme ve yorumlama kabiliyetine doğru evrilmektedirler. Günümüzde son derece hızla artan ve tüm çevremizi saran sensörlerin bir ağ ile internete bağlanıp, alınan verilerin işlenmesi ve kontrol edilmesi amacını taşıyan kablosuz sensör ağları (WSN) gelişmeye son derece açık bir konudur. WSN çoklu uygulama senaryolarını destekleyen, geniş bir alana yerleştirilmiş ağa bağlı sensörlerden oluşan bir uygulama platformunu tanımlamaktadır. Algılama ve iletişim teknolojilerinin ortaya çıkışı, kablosuz algılayıcı ağlarının ve geleceğin uygulamalarının sonraki adımını temsil eder.

WSN, ortam koşullarını ölçebilen, sensörlerin yakınındaki olayları işleyip ortaya çıkarabilen ve toplanan verileri bir ağ kullanarak veya doğrudan bir veri toplama merkezine gönderebilen sistem olarak kabul edilmiştir. WSN'ler, bulunan ortamın önemli parametrelerini izlenmesini, sağlık hizmetleri ve perakende tedarik zincirleri gibi uygulamaya özel dağıtımları desteklemeyi ve büyük ölçekli bir IoT ortamında çalışan birden fazla uygulamayı aynı anda işlenebilmesini sağlamaktadır. Bunun yanında çok kullanıcı platformlarına da olanak sağlayabilecek kadar oldukça geniş yelpazede tanımlanmaktadır. Bu tür uygulamalara çoklu uygulama platformunda çok kullanıcı erişimi destekleyen akıllı şehirler modeli örnek olarak verilebilir (Oteafy ve Hassanein 2017). Bu derece çeşitli alanda kullanılabilmeyi vaat eden WSN için bilim insanlarının üstesinden gelmesi gereken birçok zorluk bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları; enerji tüketimi, toplanan verilerin işlenmesi için gereklilikler, düğümler

arasındaki haberleşme bant genişliğinin kısıtlı olması, geniş alanlar için doğru ve uygun konumlandırma, coğrafi yönlendirme olarak sayılabilir. Kullanıcı açısından düşünüldüğünde, ağ tarafından üretilen oldukça büyük miktardaki heterojen veriyi depolamak, işlemek ve yönetmek karışık bir görevdir (Ahlgren vd. 2012). Öte yandan da ağ açısından düşünüldüğünde de dinamik olarak değişen bir ağ ortamında olduğu göz önünde bulundurulursa, ağ bağlantısının uzun ömürlülüğünü sağlamak, son kullanıcılara içeriğe uyumlu ve sade uygulama verileri sağlamaya çalışmak da oldukça zordur. Tüm bunların yanında, akıllı şehir/ev gibi uygulamaları hayata geçirmek için WSN'lerin kullanılmasının deney aşamasında olmasından dolayı gecikme, güvenilirlik ve verim gibi nitelikler bakımından hala yeterince gelişmemiştir (Giusto vd. 2010). WSN uygulamaları, oldukça basit bir sensör ile olay izleme uygulamasından, bir kömür madeninin izlenmesi gibi karmaşık uygulamalara evrimleştikçe, ağın kurulumu zorlaşmakta ve operasyonel karmaşıklığı artmaktadır. Değişen uygulama gereksinimleri, düğüm sayılarını ve ağ trafiğini arttırarak birçok sorunu da beraberinde getirmektedir (Al-Turjman 2018). Kablosuz algılayıcı ağlar yukarıda sayılmış olan alanlardan farklı olarak kırsal alanlarda tarımsal izleme, kentsel alanlardaki binaların ve köprülerin yapısal sağlık takibi, izleme ögeleri, orman yangınlarının tespiti ve hatta eski savaş bölgelerinde kara mayınlarının tespit edilmesine gibi geniş bir yelpazede kullanım olanağı sunmaktadır (Al-Turjman vd. 2010). Bu WSN uygulamaları büyük alanları kapsayan ve izlenen bölgede daha fazla algılama noktası sağlayan bir şekilde sensör ağının geniş ölçekte yerleştirilmesini gerektirmektedir. Bu tür büyük ölçekli dağıtımlarda, ağ topolojisi, sensör aktarma veya bilişsel düğümlerin enerjilerinin tükenmesi ve değişen ortam koşulları nedeniyle dinamik olarak değişir.

IoT uygulamalarında olduğu gibi, WSN'ler heterojen trafiği idare edebilecek bir donanım ve ağ tarafından sunulan birden fazla isteğin sonucu olarak üretilen büyük miktarda veriyi depolamak için yeterli kapasiteye sahip değildirler. Bu işlevselliği desteklemek için altyapıda değişikliğe ihtiyaç duyulmaktadır ve bulut bilişimi bunun için bize uygun maliyetli bir çözüm sunmaktadır (Han vd. 2010). Son zamanlarda yapılan bazı araştırmalarda, dinamik bir ağın yönetilmesi için yapay zekâ ve yapay sinir ağları gibi teknikler de kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu teknikler genellikle oldukça özel uygulamaları hedef almaktadır. Bu nedenle, şu anki uygulamaların WSN'lerdeki her bir model için değişen uygulama gereksinimlerini tam olarak karşılayamadığı söylenebilir (Li ve Liu 2009). Şebekenin değişen uygulama gereksinimlerinin farkında olmasını sağlamak, bilgi kalitesi ve servis/bağlantı kalitesi parametresine ulaşmasını sağlamak için, temel WSN'de bilişsel düğüm (CN) olarak adlandırılan özel ve akıllı düğümlerin kullanılması önerilmektedir. CN'ler, şebekenin, istenen veriyi alıcıya göndererek belirtilen parametreleri anlayıp yorumlayarak şebekede yönlendirme yapabilir. Bu yönlendirme sonucunda ağın performansını doğrudan etkileyen güvenilirlik, verimlilik ve güç tasarrufu parametrelerinde artış sağlanır. Bu sayede, ağdaki uygulamadan uygulamaya değişen öncelikler ile yönlendirme sağlanır. Örneğin oluşturulan ağ, sistemin en uzun süre çalışmasını öncelik olarak belirttiyse, CN maksimum ağ ömrünü hedefleyerek yönlendirme yapar. Eğer sistem için veri iletilme süresi diğer parametrelerden daha önemli ise CN her zaman en hızlı iletimi sağlayan yönlendirmeyi önceliklendirir.

Bilgi Merkezli Sensör Ağ adını, Bilgi Merkezli Şebekelerin özelliklerini, adlandırılmış veri ilişkilendirme, şebeke önbelleği ve CN'leri kullanması açısından

kullanmaktadır (Reznik ve Pless 2008). Sensörler haberleşme için düğüm adreslerinin kullanılmasını zorunlu kılar. Bu da ağın enerji performansı açısından enerji tasarrufuna olanak sağlamaktadır ve böylece ağ ömrü uzar (Al-Turjman vd. 2010). Bulut sistemi, heterojen ağ tarafından üretilen büyük miktarlardaki verinin depolanması için uygun maliyetli bir çözüm sunarken, ağ tarafında uygulama bilinci sağlayan verilerin işlenmesi için maliyet açısından kesin bir çözüm bulamamaktadır. Bu soruna yeni bir yaklaşım olan bilişsel bilgi merkezli sensör ağı (ICSN) yaklaşımı ile çözüm bulmaya çalışılmıştır. ICSN'deki bilişin temelleri, WSN'lerin ihtiyaçları tarafından ortaya konan imkanların ve zorlukların ele alınmasında umut verici bir yön olarak kabul edilebilir bir çözüm olarak görülebilir. Sonuç olarak, son kullanıcılara akıllı bilgi işleme ve bilgi temelli hizmetler sunmak için tipik sensör ağlarında Bilişsel Düğümlerin kullanımını önermektedir (Wang vd. 2011).

Sensörlerden alınan verileri taşıyan aktarma düğümlerinin (RN) haberleşebileceği uygun bir konuma yerleştirilerek haberleşmeyi daha başarılı ve daha uzun ömürlü hale getirmesi amaçlanmıştır. Son on yıl içinde, literatürde, sensör düğümleri yerleştirme ile ilgili problemler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmacılar, ağın kapsama alanı, işaretin kalitesi, bağlantı kalitesi, enerji verimliliği ve hata toleransı gibi çeşitli kriterleri göz önünde bulundurarak, sensör düğümleri için dağıtım stratejileri önermişlerdir (Singh ve Al-Turjman, 2016). ZigBee standardının başlamasıyla birlikte, ağ boyutu artsa bile baz istasyonu ile sensör düğümlerinin bağlantısını koruma amacına hizmet edebileceği için, sensör düğümünden aktarma düğümlerinin yerleşim problemini ele almaya başlamışlardır. RN'lerin yardımı ile sensör düğümlerinin iletişim alanı oldukça artırılarak ve SN'lerin ağdaki veri iletişimi görevini üstlenmiştir. Bu da SN'lerin kullanım ömrünü artırarak ağın ömrünü uzatmaya doğrudan katkı sağlamıştır (Alrajeh vd. 2013). Kapsamlı simülasyon sonuçları, yoğun bir şekilde konuşlandırılmış sensör düğümleri içeren bir ağda, CN'lerin yoğun trafik koşullarında ve kapsamlı paketlerin altında bile son kullanıcıların QoI ve LQI gereksinimlerinin karşılandığından emin olmak için önceden belirlenmiş konumlara stratejik olarak konuşlandırılabilirler. Bu, kullanıcı tarafından istenen bilgi kalitesine hitap ederken gelecekteki bilişsel uygulamaları üretmede ICSN çerçevesinin potansiyel kullanımını da göstermektedir (Al-Fagih vd. 2013).

Günümüzde çoğu uygulamanın gerçek zamanlı olarak konumunun takip edilmesine veya cihazların pozisyon bilgilerini tam olarak bilmeye olan ihtiyaç güç geçtikçe artmaktadır. Konumlandırma, insanların, cihazların, ekipmanların veya diğer nesnelerin yerlerini öngörme olarak tanımlanabilir. Konum bilgisiyle birçok sistem, rotada gezinme, fabrikalardaki pahalı ekipmanları izleme, cezaevindeki insanları kovalama veya turistleri en yakın ATM'lere yardım etme gibi pratikte yardımcı olabilir. Bu nedenle, konumlandırma temelli servislere (LBS-Location based services) olan talep kilit bir önkoşul olmuştur. Konumlandırma temelli servisler askeri uygulamalarda, acil yardım gereken doğal afet durumları gibi kritik görevlerde ve akıllı şehir uygulamalarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilim insanları farklı koşullar altında daha yüksek hassasiyetli konum bilgisi elde edebilecek farklı teknikler geliştirilmiştir. Konumlandırma teknikleri 2 ana gruba ayrılabilir; bunlar iç mekân ve dış mekân konumlandırma. Dış mekânda uygulanan konumlandırma için en yaygın olarak kullanılan yöntem küresel konumlandırma sistemidir (GPS). GPS, doğrudan görüşe (LoS) ihtiyaç duyar ve LoS koşulları altında GPS uyduları ile alıcı arasındaki

mesafeyi tahmin etmek için radyo sinyallerinin gelme zamanını kullanmaktadır. Uydu sinyalleri doğrudan görüş açısının olmadığı (nLoS) koşullarda oldukça çabuk bozularak hatalı ölçümler yapabilmektedir. Bu nedenle, GPS elverişsiz dış ortam koşulları veya gökdelen, orman ve farklı fiziksel engel tiplerinin yakınında düzgün çalışamaz ve önemli konumlandırma hataları meydana gelmektedir. Tüm bunların yanında, şu anda sistem Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Savunma Bakanlığı tarafından yönetilmekte ve kullanıcılar sistemi ücretsiz olarak kullanmakla birlikte, GPS hizmetini herhangi bir zamanda reddetmek ABD'nin elindedir. Bu gibi nedenlerden dolayı konumlandırma için çeşitli yöntemlerin de geliştirilmesi zorunluluk haline gelmiştir.

Mao ve diğerleri dronları konumlandırmak için onların arası mesafe ölçümleri kullanarak GPS bağlantısı koptuğunda kullanmak amacıyla genişletilmiş kalman filtresi (EKF) yaklaşımı önermiştir (Mao vd. 2007). Nemra ve Aouf, dahili ölçüm sistemi (IMS) ve GPS verilerini kullanan bir durum bağımlı riccati denklemi (SDRE) kullanan doğrusal olmayan bir filtre önermiştir (Nemra ve Aouf 2010). Outamazirt ve diğerleri GPS verilerini kullanarak genişletilmiş kalman filtresine alternatif olarak doğrusal olmayan H1 ve standart yumuşak değişken yapı filtresi (SVSF) temelli veri füzyon teknikleri önermiştir (Outamazirt vd. 2016). Yut ve diğerleri RF tabanlı iletişim ile konumlandırma önermiştir buna göre dahili sensörleri ve ZigBee'yi bir araya getirmeyi teklif etmişlerdir. ZigBee kullanarak elde edilen RSSI tabanlı ölçümlerin neden olduğu hatalara sahiptir (Yut vd. 2013). Benini ve diğerleri IEEE 802.15.4a standardının kullanarak iç ve dış ortamlarda çalışabilen esnek bir konumlandırma sistemi sağlamak için varış zamanı (ToA) ve varış zaman farkı (TDoA) bilgilerinin elde edilmesini önermiştir (Benini vd. 2013).

Bedford ve Kennedy, acil durumlar için madenlerde kullanılmak üzere ZigBee tabanlı sistemi oluşturmuştur. Konumlandırma doğruluğunu arttırmak için birden fazla kanal için elde edilen ToF ölçümlerini kullanılmış ve filtrelenmiş ortalama algoritması kullanarak birleştirilmiştir (Bedford ve Kennedy 2012). Hwang ve Yu GPS'in kötü performans gösterdiği iç mekân ve ağaçlık alanları göz önünde bulundurarak tahmin iyileştirme algoritma önermişlerdir. Akıllı telefonlarda bulunan çoklu sensörlerin bilgilerini önerdikleri sisteme entegre ederek müdahale noktalarında yerelleştirme iyileştirmeyi gözlemlemişlerdir. Bu yöntem ile GPS'in performansının yüksek olduğu şartlarda performans korunurken, düşük olduğu şartlarda ise sistemin performansı GPS'ten daha iyi bir performansa sahip olmuştur (Hwang ve Yu 2012).

Bu çalışmada RSSI ve ToA tabanlı konumlandırma yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemler dışında literatürde TDoA ya da TDoF, AoA ya da AoF yöntemleri de bulunmaktadır.

2.1. Yol Kaybı – Path Loss (PL)

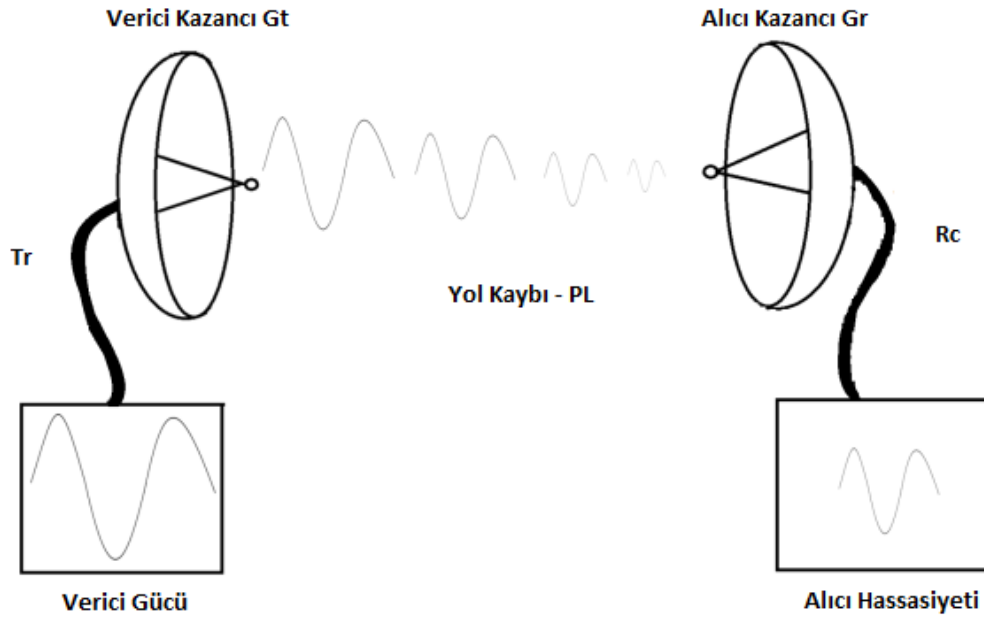
Kablosuz haberleşmede, iletişimi bozabilecek etmenler oldukça fazladır. Yol kaybı, iletişim sinyalinin, yayılım uzayındaki hareketi sürecindeki azalma olarak ifade edilmektedir. PL'nin daha iyi anlaşılabilmesi için verici gücünün ve alıcı duyarlılığının iyi anlaşılması gerekmektedir. Verici gücü, bir vericinin üretip yayılım uzayına aktardığı enerji miktarıdır. Alıcı duyarlılığı ise, başarılı bir haberleşmenin sağlanabilmesi için alınabilecek minimum enerji miktarıdır. Ağın alıcı ucundaki sinyal gücü, alıcı cihazın duyarlılık seviyesinin altında ise haberleşme sağlıklı olarak

sağlanamaz. Yol kaybı nedenleri çoğunlukla, yayılımın gerçekleştiği fiziksel çevreye bağlıdır. Bunun yanında; verici ve alıcı antenlerinin kazançları ve yüksekliği, verici ve alıcı arasındaki mesafe, iletişim frekansı, engeller, kullanıcı hareketliliği ve çevre koşulları da yol kaybına sebep olmaktadır. Yeni nesil internette IoT cihazları her türlü ortamlarda kullanılabileceği için her bir farklı koşul için farklı matematiksel modellerin kullanılması teorik ve pratik uyumunu artıracaktır. Literatürde çeşitli araştırmacılar yol kaybı üzerinde çalışmış ve farklı modeller önermişlerdir. Bu modellerden bazıları; Hata Okumura, Egli, Green-Obaidat, Welfisch-Ikegami ve TM90 olarak sayılabilir. Hata Okumura modeli bu modellerden en bilinenidir. Farklı arazi konumları da hava koşulları ortam etmenleri gibi nedenlerden kaynaklı olarak işaretin zayıflamasına neden olmaktadır (Ulusar vd. 2017a). Örneğin, verici ya da alıcı anten ağaç altında bulunuyorsa işaretin zayıflaması oldukça artarken açık bir alanda bulunuyorsa zayıflama az olmaktadır. Yaygın olarak bilinen arazi modellerinden bazıları ITU, ITU-R 452, Longley-Rice Irregular. Bu modellerden ITU-R 452, atmosferdeki gazlar nedeniyle soğurulma, bıçak kenarı kırınımı, yeryüzü eğriliğinden kaynaklanan zayıflama ve troposferik dağılımı birleştirerek yol kaybını tahmin etmektedir. PL, gönderilen gücün alıcı tarafından alınan güce oranlanması ile (2.1)'deki gibi bulunabilir.

$$PL = P_{tx}[mW] / P_{rx}[mW] \quad (2.1)$$

(2.1)'deki hesabı kolaylaştırmak için logaritmik düzleme geçilirse (2.2) ortaya çıkmaktadır.

$$PL[dB] = P_{tx}[dBm] - P_{rx}[dBm] \quad (2.2)$$

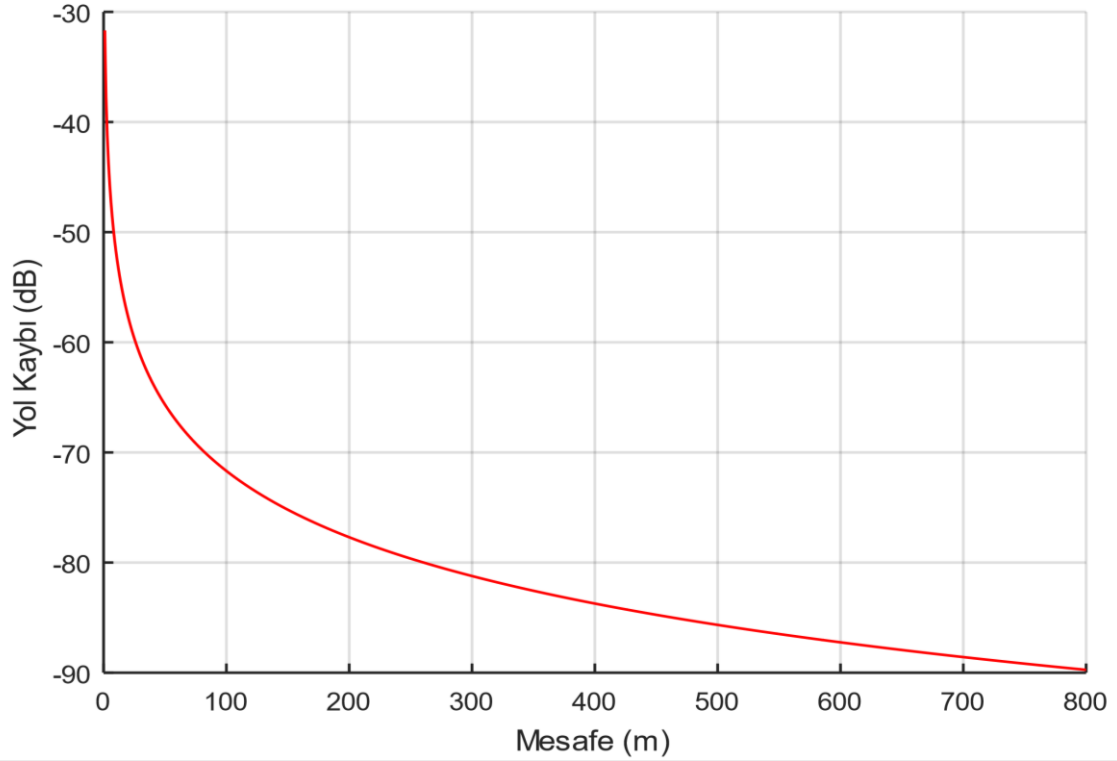


Şekil 2.1. Serbest yayılım uzayı yol kaybı modellemesi

Yol kaybı formüllerinden yararlanılarak, RSSI tabanlı konumlandırma olarak adlandırılan yöntem önerilmiştir. RSSI yönteminde, bilinen alıcı gücü için alınan güç ile

logaritma düzleminde farkı alınarak yol kaybı bulunur. Şekil 2.1’de bu modelleme Şekil 2.2’de mesafeye bağlı olarak değişen yol kayıp grafiği görülmektedir. (2.3)

$$PL(d) = 20 * \log(4\pi d/\lambda) [dB] \quad (2.3)$$



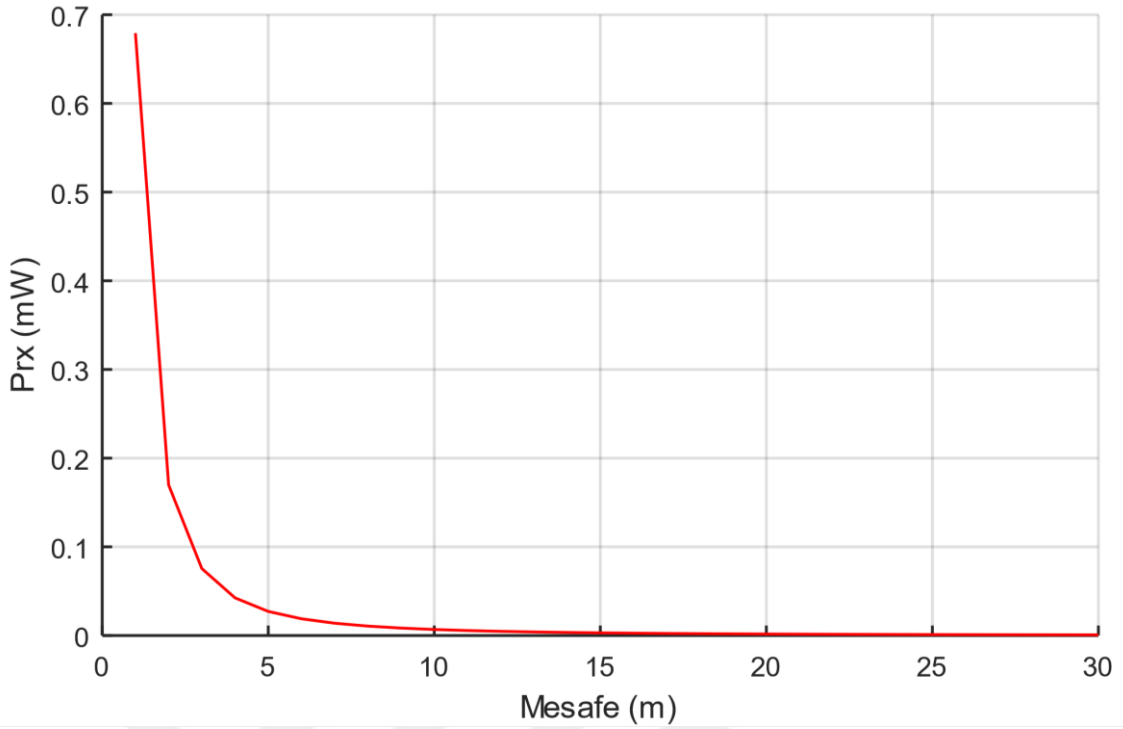
Şekil 2.2. Mesafeye bağlı olarak değişen PL grafiği

Bunun yanında PL değeri belirli bir referans mesafesindeki PL_{d0} değeri kullanılarak da bulunabilmektedir. Buna göre tipik olarak (2.3)’te bulunan mesafe değerine (d_0) 100 metre değeri verilerek, yeni yol kaybı referans mesafe ile oranlanarak hesaplama yapılır. Bu ikinci yöntem de (2.4)’te verilmiştir.

$$PL(d) = PL(d_0) + 20 * \log(d/d_0) [dB] \quad (2.4)$$

2.2. Alınan Sinyal Gücü – Received Signal Strength (RSS)

İşaret gücünü temsil etmek için dört adet ölçü birimi vardır. Bunlar: mW (miliwatt), dBm (desibelmiliwatt), RSS ve RSSI’dır. Bütün bu ölçümler birbirleriyle ilişkilidir ve bir birimden diğer birime dönüşüm mümkündür. Gömülü sistem cihazlarda alınan sinyal gücü (RSS) Şekil 2.3’te gösterildiği gibi 0 (mW) değerine oldukça çok yakın bir değer olduğundan ve mesafe arttıkça güç değerindeki değişim gittikçe azaldığından, işaretin gücü logaritma düzleminde farklı bir parametreye dönüştürülür.



Şekil 2.3. Alınan güç değerinin mesafeye bağlı değişimi grafiği

$$c = f * \lambda \quad [m/sn] \quad (2.5)$$

$$P_{rx} = P_{tx} * G_{tx} * G_{rx} * (\lambda/4\pi d) \quad [mW] \quad (2.6)$$

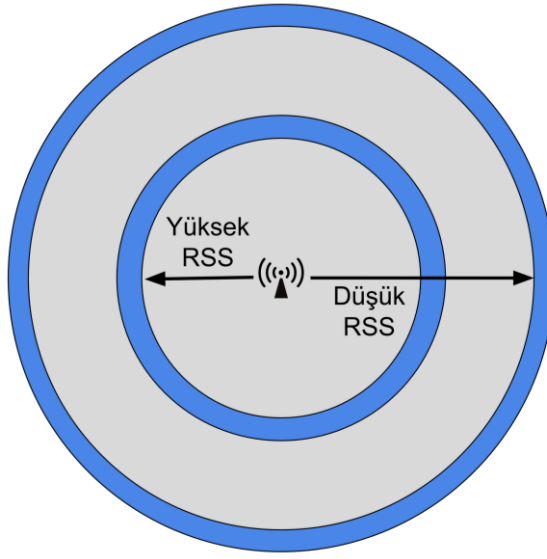
$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL \quad [dBm] \quad (2.7)$$

Verici gücünün, işaretin frekansının ya da dalga boyunun bilindiği varsayılırsa (iki değerden birinin bilinmesi durumunda diğeri de (2.5)'deki gibi bulunabilir.) PL değeri bulunduktan sonra Friis formülü olarak da bilinen (2.6) yardımı ile mesafe tahmini yapılabilir. Bu formül logaritma düzlemine geçiş yapılırsa (2.7) elde edilmektedir. Burada, c: ışık hızı, f: frekans, d: verici ve alıcı arasındaki mesafe, P_{tx} : göndericinin iletim gücü, P_{rx} : alınan işaretin gücü, G_{tx} : vericinin kazancı, G_{rx} : alıcı kazancı, λ : işaretin dalga boyunu ifade etmektedir.

$$RSS = 10 * \log\left(\frac{P_{rx}}{1mW}\right) \quad [dBm] \quad (2.8)$$

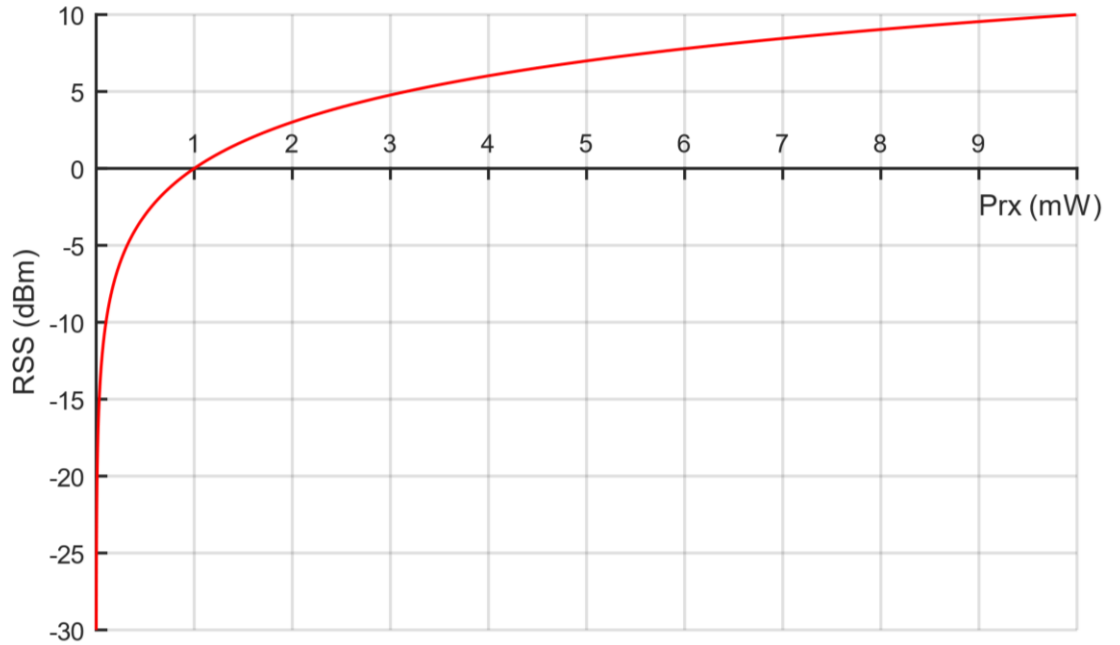
(2.8)'te gösterildiği gibi RSS olarak adlandırılan bu dönüşüm, işaret gücünün logaritmasını belirli bir referans gücüne (P_{ref}) oranlanır. Tipik olarak, referans gücü, $P_{ref} = 1mW$ 'lik mutlak bir değeri temsil eder (Joana Halder ve Kim 2012).

Mesafe tıpkı P_{rx} değerinde olduğu gibi RSS değerine de ters orantılı şekilde etki etmektedir. Mesafe arttıkça alınan güç değeri de logaritmik olarak azalacağından RSS değeri de buna bağlı olarak azalmayı sürdürmektedir. Bu örnekleme Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. RSS değerinin farklı mesafelere göre değişimi

Alınan güç değeri [mW] arttıkça RSS [dBm] değeri de artmaktadır. Şekil 2.5'te RSS ile alınan sinyal gücü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu dönüşümde olan en büyük değişiklik RSS değerinin negatif değerler alabilirken Prx değerinin her zaman pozitif değer almasıdır. Güç miktarı [mW] cinsinden her zaman pozitif bir değer almak zorundadır hiçbir zaman negatif olamaz.



Şekil 2.5. RSS – Prx ilişki grafiği ($P_{ref}=1\text{mW}$ kabul edildiğinde)

RSSI değeri 0-255 arasında değer alabilen (1 baytlık ya da 8 bitlik) bir tamsayıdır. Ancak bu değer aralığı bazı kuruluş ya da firmalarca farklı aralıklarda kullanılmıştır. Örneğin, CISCO RF enerjisi için 101 ayrı değeri ölçmeyi seçmiş ve en yüksek RSSI değeri olarak 100 seçmiştir. Atheros yonga setinde ise en yüksek RSSI

değeri 60 olarak seçilmiştir. Bu çalışmada CISCO değerleri kullanılarak dönüşüm yapılmıştır. CISCO tercihindeki 0-100 arasındaki değerler RSS yüzdeli olarak da gösterilebilir ve bu değer dönüşümleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. CISCO tarafından hazırlanan bu dönüşüm RSS değerinin daha kolay yorumlanabilmesi için hazırlanmıştır.

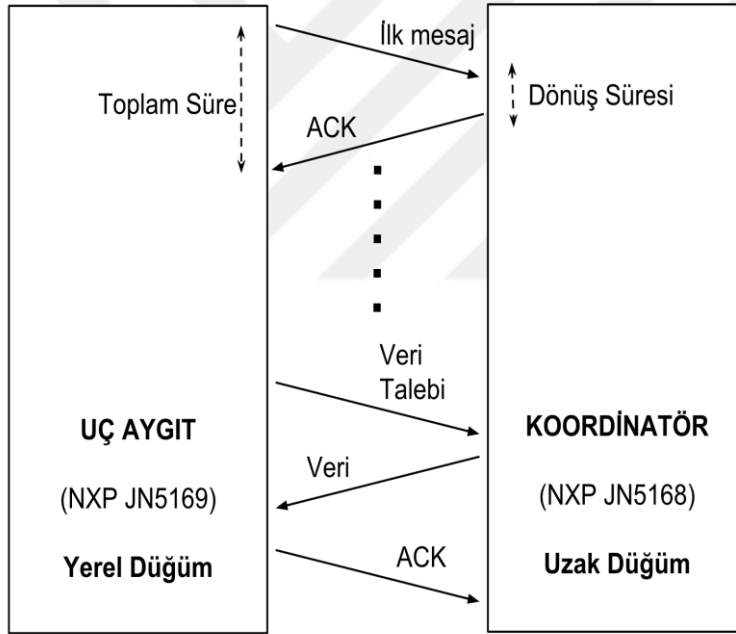
Çizelge 2.1. CISCO tarafından oluşturulan RSS – RSS% (RSSI) dönüşümü

%0=-113dBm	%20=-92dBm	%40=-70dBm	%60=-47dBm	%80=-27dBm
%1=-112dBm	%21=-91dBm	%41=-69dBm	%61=-46dBm	%81=-25dBm
%2=-111dBm	%22=-90dBm	%42=-68dBm	%62=-45dBm	%82=-24dBm
%3=-110dBm	%23=-89dBm	%43=-67dBm	%63=-44dBm	%83=-23dBm
%4=-109dBm	%24=-88dBm	%44=-65dBm	%64=-44dBm	%84=-22dBm
%5=-108dBm	%25=-87dBm	%45=-64dBm	%65=-43dBm	%85=-20dBm
%6=-107dBm	%26=-86dBm	%46=-63dBm	%66=-42dBm	%86=-19dBm
%7=-106dBm	%27=-85dBm	%47=-62dBm	%67=-42dBm	%87=-18dBm
%8=-105dBm	%28=-84dBm	%48=-60dBm	%68=-41dBm	%88=-17dBm
%9=-104dBm	%29=-83dBm	%49=-59dBm	%69=-40dBm	%89=-16dBm
%10=-103dBm	%30=-82dBm	%50=-58dBm	%70=-39dBm	%90=-15dBm
%11=-102dBm	%31=-81dBm	%51=-56dBm	%71=-38dBm	%91=-14dBm
%12=-101dBm	%32=-80dBm	%52=-55dBm	%72=-37dBm	%92=-13dBm
%13=-99dBm	%33=-79dBm	%53=-53dBm	%73=-35dBm	%93=-12dBm
%14=-98dBm	%34=-78dBm	%54=-52dBm	%74=-34dBm	%94=-10dBm
%15=-97dBm	%35=-77dBm	%55=-50dBm	%75=-33dBm	%95=-10dBm
%16=-96dBm	%36=-75dBm	%56=-50dBm	%76=-32dBm	%96=-10dBm
%17=-95dBm	%37=-74dBm	%57=-49dBm	%77=-30 dBm	%97=-10dBm
%18=-94dBm	%38=-73dBm	%58=-48dBm	%78=-29dBm	%98=-10dBm
%19=-93dBm	%39=-72dBm	%59=-48dBm	%79=-28dBm	%99=-10dBm

2.3. Veri İletim Süresi – Time of Arrival / Time of Flight (ToA / ToF)

ToA ya da bir diğer deyişle ToF bir sinyalin vericiden alıcıya iletilmesi için geçen süreyi belirtir. İşaretin yayılım hızı ışık hızına eşittir ve bu değer bilinmektedir. Düğümler arası mesafeyi doğrudan hesaplamak için bir sinyalin iletim süresi kullanılabilir. Yerel düğüm, talep paketinin gönderilmesinden ACK iletilsinin alınmasına kadar olan zamanı ölçer ve bu değeri toplam süre olarak (T_{toplam}) olarak kaydeder. Uzak düğüm ayrıca, veri isteği için ileti süresinin alınma süresi ile verinin iletimi arasında geçen süreyi bularak aralarındaki zaman farkını bulur ve bu değeri, dönüş süresi (T_{ds}) olarak saklar. Toplam süreden dönüş süresinin çıkarılması ile çıkarma gidiş dönüş zamanı (T_{gd}) elde edilir. Bu değer mesajın alıcı ile verici arasındaki mesafenin iki kez kat edilmesi için geçen zamandır.

Çalışmamızda ToA ölçümünü gerçekleştirmek için yerel düğüm, Şekil 2.6'de gösterildiği gibi uçtaki düğüme bir talep paketi gönderir. Uç aygıt verileri yerel düğüme geri iletir. Yerel düğüm de işareti başarılı bir şekilde aldığını belirten bir ACK mesajı göndererek iletişimi sonlandırır (Boukerche vd. 2007).



Şekil 2.6. Verici ve alıcı düğümler arası veri transferi ve ToA hesabı şeması

Çift yönlü iletimin yaklaşık olarak eşit süre aldığını varsayarsak, verilerin iletim periyodunun (2.9)'da gösterilen gidiş ve dönüş süresinin yarısına eşit olduğu varsayılabilir.

$$ToF = \frac{T_{gd}}{2} = \frac{T_{toplam} - T_{ds}}{2} \quad (2.9)$$

ToA hesaplamasında, zamanlama verilerini ölçmek ve iletmek için iki düğüm arasındaki senkronizasyon ilkesine dayanmaktadır. Ölçümler tipik olarak hızlı ardışık ilerlemeler ile yapılır ve sonuçların anlık değişimini azaltmak için aynı mesafedeki

değerlerin ortalaması alınır. Elde edilen uçuş süresi değerinden mesafe tahmini yapabilmek için verinin iletim hızı yani ışık hızı (yaklaşık olarak 300,000,000 m/s) kullanılmaktadır. Geçen sürenin ışık hızıyla çarpılması sonucu mesafe tahmini yapılabilmektedir (2.10).

$$d = ToA * c \quad (2.10)$$

2.4. Bağlantı Kalite Göstergesi – Link Quality Indicator (LQI)

LQI parametresi vericiden alıcıya iletilen her başarılı paketin kalitesini ölçüp çıktı olarak 0 – 255 arasında bir tam sayı üretir. İletilen işaretin kalitesi arttıkça elde edilen LQI değeri 255'e yaklaşmaktadır. IEEE 802.15.4 iletişimde, mesaj içeriğiyle birlikte gelen sinyal hakkında LQI bilgisi de bulunmaktadır. RSSI'nin aksine, LQI işaretin gücünden ziyade iletim kalitesini ölçer. Aralarında doğrudan bir ilişki olmamasına karşın genellikle LQI değeri düşükse, RSSI değerinin de düşük olması beklenir. Bunun nedeni mesafenin, RSSI değerini olduğu gibi, genellikle LQI değerini de ters oranlı olarak etkilemesidir. LQI işaretli işarettaki paket kaybıyla uyumluluk gösterir ve bu nedenle oldukça kullanışlı ve pratik bağlantı kalitesi göstergesi olur. Ancak LQI parametresinin yalnızca 802.15.4 uyumlu cihazlar tarafından kullanılabilen bir metrik olduğu unutulmamalıdır (Al-Turjman 2018). Bu çalışmada, LQI değeri işaretin başarılı iletilme ihtimali ile ilişkilendirilmiştir ve bu değer yüzdelik dönüşümle daha kolay anlaşılabilir hale getirilmiştir. Bu dönüşüm (2.11)'de gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.

$$LQI_{yüzde} = 100 * \frac{(LQI_{değeri} - LQI_{min\ değeri})}{(LQI_{max\ değeri} - LQI_{min\ değeri})} \quad (2.11)$$

Bu tez çalışmasında WSN'deki iletişim düğümleri arasında LQI_{yüzde} değerinin %80 ve üzerinde olduğu iletimleri başarılı kabul edilmiş ve bu değer üzerindeki kalitede veri iletimi sağlanması amaçlanmıştır.

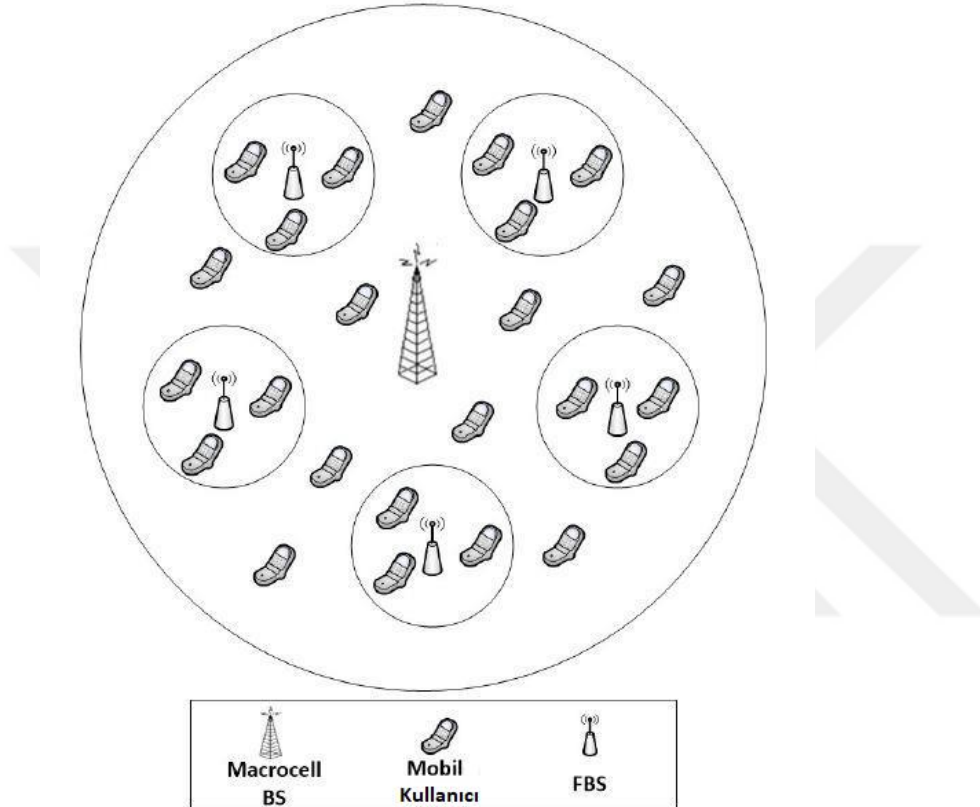
2.5. Yönlendirme – Routing

Ağa bağlanan cihaz sayısı arttıkça ve ağ karmaşıklığı fazlalaştıkça verici düğümden alıcı düğüme gönderilmesi gereken işaret, işareti aktarmakla görevli ara düğümler aracılığıyla gönderilebilir. Bu gibi durumlarda işaretin hangi aktarma düğümleri aracılığıyla iletileceği yönlendirme (routing) ile belirlenir. Vericiden alıcıya ulaşmak için en uygun yolu kullanarak bir ağ üzerindeki veriyi iletme işlemidir ve bu uygunluk ağın parametrelerinden parametrelerine değişmektedir.

En yaygın yönlendirme modelleri minimum gecikme, minimum maliyet veya maksimum ömürdür. Sensör ağlarında veri yönlendirmesi veri merkezli, hiyerarşik ve konum tabanlı olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmıştır. Sıralı Atama Yönlendirme (SAR), Sensör Ağlarında Gerçek Zamanlı Haberleşme için Durumsuz Protokol (SPEED), Gerçek Zamanlı Yük Ayrılmış Yönlendirme (RTLTD), Çoklu Kısıtlı Çok Yollu (MCMP), yaygın olarak kullanılan yönlendirme modellerinden bazılarıdır.

2.6. Heterojen Ağlar – Heterogenous Networks (HetNets)

Gelecekteki kablosuz iletişim sistemlerinin temel amaçlarından biri, operasyon sürelerini uzatmak için cihazların enerji tüketimini azaltmaktır. Ağ mobil kullanıcıya daha yakınlaştıran hibrit ağ topolojileri tasarlamak daha enerji verimli bir iletişim sağlar. Enerji verimliliğinin yanında ağ ihtiyacına göre yerleştirilen farklı büyüklüklerdeki BS'ler kurulum ve bakım maliyetini de oldukça düşürerek servis sağlayıcıları için son derece kritik rol oynamaktadır.



Şekil 2.7. FBS, MBS ve mobil kullanıcı içeren bir heterojen ağ şeması

HetNets, farklı radyo erişim teknolojilerini (RAT) destekleyen bir kablosuz ağ şeklindedir. Temel fikir, Şekil 2.7'deki şekilde macrocell baz istasyonları (MBS) ve femtocell baz istasyonlarını (FBS) birleştirmektir. Birden çok RAT'ı birleştirmek, hareketlilik aktarma karmaşıklığı ve QoS gibi birlikte çalışabilirlik sorunları oluşturur. Femtocelllerin dağıtımı, pahalı makro baz istasyonu kulelerinin eklenmesi ihtiyacını doğrudan düşüreceği için ilk kurulum maliyetini oldukça azaltacaktır. FBS ayrıca mobil trafiği toplamak ve makro hücrelere veya diğer erişim ağlarına geçmek için kullanılabilir. Son zamanlarda, FBS'ler birçok mobil operatör tarafından kırsal ve yoğun nüfuslu bölgelerde dış mekân dağıtımlarında, geçici yoğunluğun olduğu konser veya festival gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yakın gelecekte, mobil FBS'ler daha belirgin hale gelecek ve daha iyi bir mobil kapsam ve kapasite sunacaktır.

2.7. Ağ Tasarımı için Zorluklar ve Etmenler

İnternet, insanların birbirleriyle etkileşim kurma şeklini değiştirmiş ve IoT ile, akıllı nesnelerle ve bunlar arasında iletişim sağlayarak yeni bir boyut ekleme

potansiyeline sahip olmuştur. Uygulama alanlarının çoğu zaman karmaşık gereksinimlere özgü olduğu için, etkinleştirme teknolojilerinin kullanımıyla yeni bir bağlantılı tüm sistemin oluşturulması tasarım zorluklarına sahiptir. Bu bölümde, WSN'lerin IoT uygulamalarında sorunsuz entegrasyonu için bazı önemli tasarım konuları ele alınmıştır.

2.7.1. Erişebilirlik

IoT'nin ana hedefi, gerçek dünyadaki değişken koşullar altında tıpkı test ortamında olduğu gibi başarılı servis sağlamaktır. Gerçek dünyada kişiler ya da nesneler hareket halinde olabilir, bu gibi durumlarda dahi onlara bağlı olan IoT cihazları da koşullardan bağımsız olarak ağa bağlı kalmayı sürdürebilmelidir. Hareketlilik gibi bu tür durumların ele alınması, gelecekteki IoT çözümlerinin temel gereksinimi haline gelmiştir. Bu hareketlilik süresince, meydana gelebilecek kapsama ve başarılı iletim eksiklikleri ana hizmet arızaları olarak tanımlanmaktadır. Diğer kullanılabilirlik sorunları ise yazılım hataları, donanım hataları, insan hatası veya bu faktörlerin bir kombinasyonu ile ilişkili olabilir (Ulusar vd. 2017b).

2.7.2. Ölçeklenebilirlik

IoT'nin ölçeklenebilirliği, mevcut hizmetlerin kalitesini kayda değer ölçüde bozmadan yeni cihazları, hizmetleri ve işlevleri sisteme ekleme yeteneği olarak ifade edilir. Yeni aygıtların eklenmesi, farklı donanım platformlarının ve iletişim protokollerinin varlığında zor olabilir. Ayrıca, ölçeklenebilirlik, gerçek zamanlı veri işlenmesi, toplanan verilerin gelecekteki kullanımı ve saklanması için önemli bir konudur (Ulusar vd. 2017b).

2.7.3. Enerji Tasarrufu ve Tüketimi

Baz istasyonlarının ve onlara bağlı cihazların sayısının artmasıyla birlikte, mevcut mobil ağlar enerji tüketiminde üstel bir artış meydana gelmiştir. Bu durum enerji verimliliğine olan ihtiyacı gün geçtikçe artırmaktadır. Enerji verimliliğinin artırılması operasyonel maliyetleri düşürdüğü için olumlu ekonomik etkilere sahiptir. Bunun yanında enerji üretimi için çevreye verilen zararı azaltarak, çevresel etkilerini de azalmaktadır. Her bir düğümde mevcut enerjiyi izleyen ve QoS gereksinimlerini karşılarken optimum yolu seçen veri sıkıştırma algoritmaları, toplama teknikleri ve enerji bilinci yönlendirme protokolleri önerilmiştir (Ulusar vd. 2017b).

2.7.4. Maliyet

Bir diğer etmen, bir ağın; kurulum, dağıtım, bakım ve işletim maliyetidir. Aktif bir araştırma alanı olan bu durum, QoS gereksinimlerini sağlayacak en düşük düzeyde kurulumu sağlamak ve bu sistemin bakım maliyetlerini düşürecek bir dağıtım stratejisinin geliştirilmesidir. Ayrıca, sistemin işletme maliyetlerini en aza indirmek için en uygun yönlendirme protokolleri uygulanmalıdır. Giderleri en aza indirmek için minimum maliyet tabanlı yönlendirme gibi bazı yönlendirme algoritmaları önerilmektedir. Son zamanlarda, basit pasif RFID etiketleri uygun fiyatlarla temin edilmiştir. Şifreleme teknolojilerinde güvenlik sorunları açısından benzer fiyat düşüşünü sağlayabilir (Ulusar vd. 2017b).

2.7.5. Güvenlik

Endüstriyel kontrol, ulaşım ve sağlık hizmetlerinde IoT'nin bazı uygulamaları için güvenli bir IoT sisteminin sağlanması zorunludur. İletişim için IP ağlarını kullanan IoT sistemleri, bilinen ve olası güvenlik sorunları ve saldırılara karşı savunmasızdır. Güvenlik kusurlarının potansiyel etkisi altyapıya ciddi zarar verebilir ve e-sağlık uygulamaları için bile yaşam kaybına neden olabilir. Aygıt kimliği ve kimlik doğrulama mekanizmaları, bir IoT altyapısının güvenliğini sağlamada temel öğelerden biridir. Çoğu IoT cihazı, geçerli kimlik doğrulama protokollerini desteklemek için gerekli işlem gücüne sahip olmayabilir. Güvenlik sorunlarının üstesinden gelmek için yeni kimlik doğrulama şemaları, şifreleme / kimlik doğrulama algoritmaları gereklidir (Ulusar vd. 2017b).

2.7.6. Gizlilik

IoT, internetin uzantısı olarak kabul edilebilir, ancak veri toplamının gerçekleştirileceği ve gerçekleştirileceği yollar farklıdır. Sensör düğümlerinden sürekli veri toplanması sırasında bireylerin rızası ve kontrolü olmadan kişisel verilerin sayısallaştırılacağı sayısız olay olacaktır. Ayrıca, mevcut gizlilik sorunları genellikle aktif internet kullanıcıları için ortaya çıkar, ancak IoT senaryolarında gizlilik tüm bireyler için ortaya çıkmaktadır. Toplanan verilerin sadece yetkili servislerin desteklenmesi amacıyla kullanılması, bireylerin hangi kişisel verilerin toplanacağını ve kimler tarafından kontrol edilebileceğine dair güvence ve mekanizmalar sağlamak için yasal düzenlemeler gereklidir (Ulusar vd. 2017b).

2.7.7. Güvenilirlik

Güvenilirlik, erişebilirlik ile çok benzer bir anlama sahiptir ve sistemin düzgün çalışmasını ifade eder. Güvenilir bir veri dağıtımını sistemini gerçekleştirebilmek için IoT cihazlarının bazı hatalara karşı dirençli olması gerekmektedir. Güvenilirlik; yazılım, donanım ve diğer ağ bileşenlerinin uyumlu çalışmasıyla sağlanabilir. Aksi takdirde, güvenilir olmayan sensör ölçümleri, veri toplanması ve iletimi uzun gecikmelere, veri kaybına ve sonuçta yanlış kararlara yol açabilir (Ulusar vd. 2017b).

2.7.8. Gecikme

Nesnelerin interneti ile birlikte ağa bağlanan aygıtların sayısı ve internete bağlı kalma süreleri arttıkça yanıt kuyruklarının oluşması ağ tasarımını oldukça zorlamaktadır. Akıllı cihazların ve akıllı uygulamaların çalışma kalitesine doğrudan etki eden gecikme, gün geçtikçe daha çok önem kazanmaktadır (Ulusar vd. 2017b).

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada önerilen donanım ile ölçümlerin geliştirilmesi ve performans değerlendirmesinde matematiksel ve analitik tekniklerden yararlanılmıştır. Bunun yanında istatistiksel tahmin teknikleri ile tahminlerin iyileştirilmesi amacı ile test edilmiştir. Yapılan deneysel yaklaşımlar teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları için MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Genel olarak, veri dağıtımı için optimize edilmiş teknikler oluşturmak, çalışmanın tüm unsurlarını etkileyen ayrılmaz bir etmen olmuştur.

Hızla artan teknolojik gelişmelere paralel olarak, artan veri miktarı hızlı ve güvenilir işlem kapasitesi gerektirmektedir. İstenen ağı oluşturmak için, yerleştirilen düğümlerin, QoS gereksinimlerini karşılayacak ve ağ ömrünü en uzun şekilde tutacak bir konumlandırma yöntemleri düşünülebilir. Düğüm yerleşimi yapılırken sadece tasarım aşamasında değil, aynı zamanda operasyonel aşamada da ağın istenilen bir QoI değerini garanti edebilmesi beklenmektedir. Bu tez çalışmasının uzun vadedeki hedefi, gelecekte oluşturulan ağı; geniş bir kapsama alanında (kırsal-kentsel koşullardan bağımsız olarak), esnek veri erişilebilirliği sağlayabilen (acil durum anında ya da kitlesel etkinliklerde) belirlenen ihtiyaç parametrelerini sağlanabilmesidir.

Yapılmış olan çalışmalardan elde edilen ölçümlerin daha rahat okunabilmesi ve daha net yorumlanabilmesi için her mesafe için değerler normalize edilmiştir. Hata oranı olarak isimlendirilen değer (3.1)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. Tahmin edilen değer o mesafenin gerçek değerine oranlanması ve yüzdelik şekilde görülebilmesi için 100 ile çarpılmasıyla grafik elde edilmiştir.

$$\text{Hata Oranı} = \frac{(\text{Ölçülen Mesafe} - \text{Gerçek Mesafe}) \times 100}{\text{Gerçek Mesafe}} [\%] \quad (3.1)$$

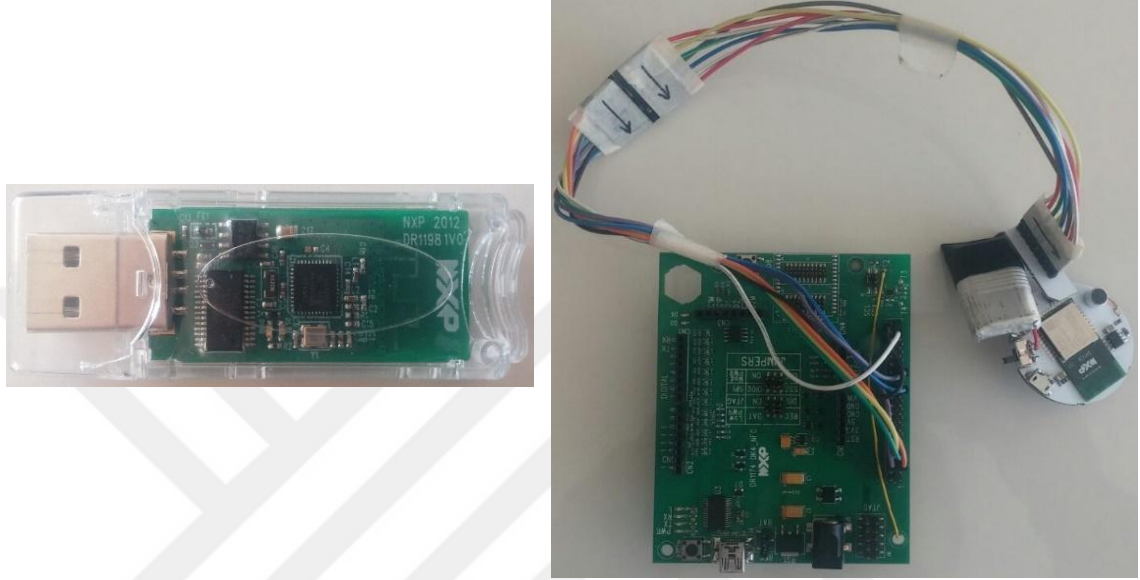
3.1. Donanım ve Yazılım

Bu çalışmada, alıcı düğüm ve verici düğüm için IEEE 802.15.4 protokolü üzerine kurulu NXP yarı iletkenlerinden ZigBee aygıtları kullanılmıştır. ZigBee, düşük güç tüketen aygıtları desteklemek için düşük hızlı kablosuz kişisel alan ağı (WPAN) özelliklerini tanımlamaktadır. ZigBee, WPAN için düşük veri hızı olmasına rağmen çok verimli ve uygun maliyetli bir çözümdür. Bu kablosuz teknoloji, konumlandırma, ev ve bina otomasyonu, sağlık hizmetleri, güvenilir mesajlaşma, tüketici elektroniği ve daha birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dış mekân haberleşmesinde teoride 1000 metre mesafeye kadar iletişimi sağlayan ZigBee'nin kanal başına veri hızı 2.4 GHz'de 250 kbps, 915 MHz'de 40 kbps, 868 MHz'de 20 kbps'dir. ZigBee ile yapılmış bir ağ, ölçeklenebilirlik, kararlılık ve bağlantı hatasına karşı ideal bir tolerans sunar (Alturjman 2018).

Çalışmada kullandığımız ZigBee aygıtları JN5168 ve JN5169 (NXP Semiconductors, Netherlands) kullanılarak ilk olarak noktadan noktaya ağ oluşturulmuştur. Bu cihazı kullanmamızın nedeni 1 ila 32 MHz'lik güçlü bir 32-bit RISC işlemciye, 10-bit 4 girişli ADC'ye, batarya ve sıcaklık sensörlerine, seri arayüzlere (I2C, SPI) ve iletişim kalitesi parametresini raporlayan modüle sahip olmasıdır. Düğümlerin alıcı hassasiyeti (-95 dBm), verici gücü 2,5 dBm'dir. Yani verici

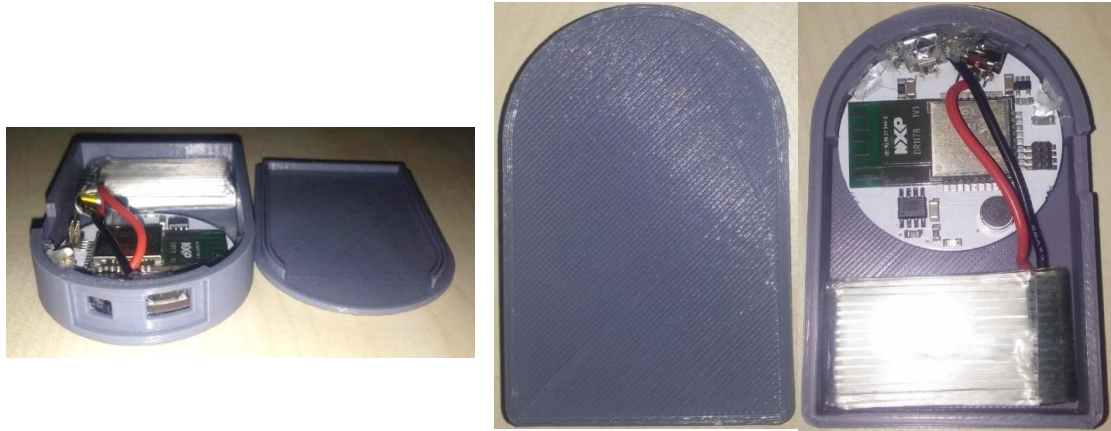
tarafından gönderilen işaretin gücü alıcıya ulaştığında -95 dBm değerinin altına düştüğünde düğümler arasındaki bağlantı kopmaktadır (Ulusar vd. 2019).

Şekil 3.1’de ZigBee modülleri ve geliştirme kartları; solda USB arabirimiyle bilgisayara bağlanabilen alıcı düğüm olarak kullanılan JN5169 ve sağda düğümlerimize kodlamaya yarayan geliştirme kiti ve kablolar aracılığıyla yapılan bağlantı türü ve bağlanmış olan JN5168 düğümü verici düğüm gösterilmiştir.



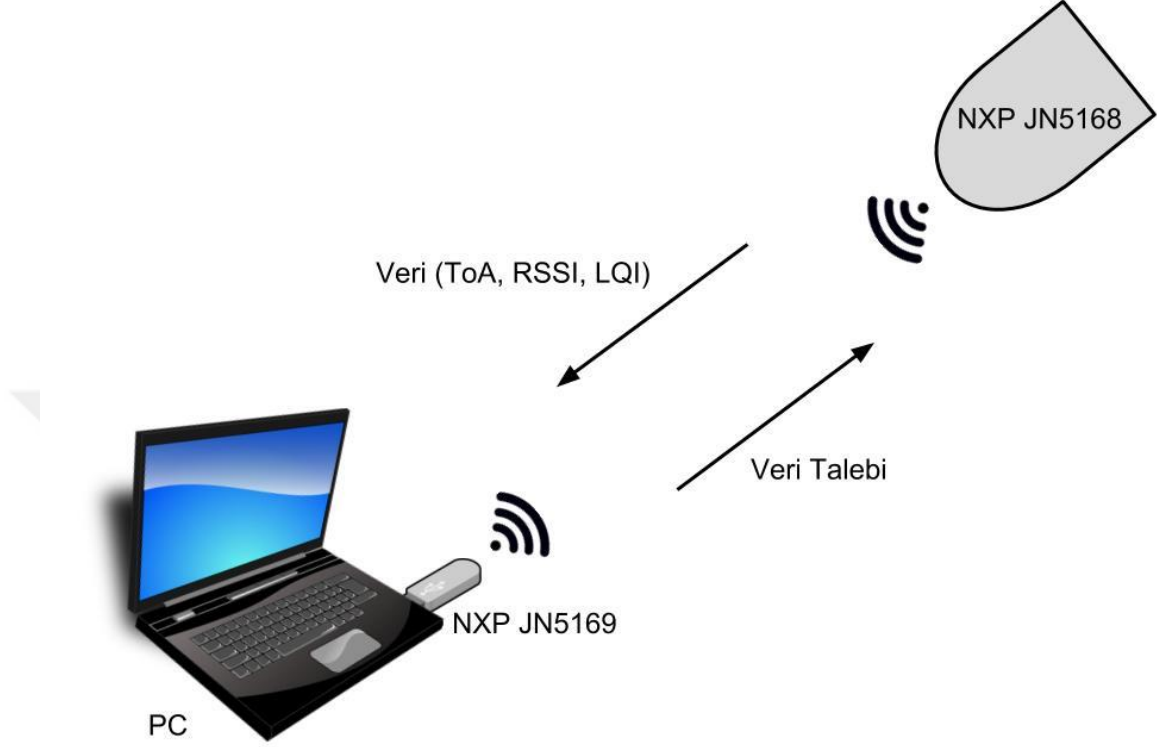
Şekil 3.1. a) USB alıcı düğüm (JN5169), b) Programlanan verici düğüm (JN5168)

Bu çalışmada iç ve dış mekân için yapmış olduğumuz ölçümlerin gerçekleştirilmesinde, görselleştirilmesinde ve simülasyonunun yapılmasında çeşitli yazılımlar kullanılmıştır. ZigBee düğümlerini programlamak için BeyondStudio for NXP, alınan ölçümlerin görselleştirilmesi ve simülasyonlar için ise MATLAB programı kullanılmıştır. Şekil 3.2. 'te düğümler için tasarlanmış olduğumuz 3 boyutlu yazıcı ile yazdırılan modüller gösterilmiştir. Bu modüller ZigBee kartlarının sabit bir şekilde programlanmasını ve yeniden şarj edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.2. a) Ağ düğümü yandan görünüş, b) Ağ düğümü üstten görünüş

Yapılmış olan ölçümler Şekil 3.3’de modellenmiştir. Buna göre kişisel bilgisayar aracılığıyla veri talebi USB ile bağlı olan NXP 5169’a aktarılır ve sonrasında kablosuz olarak NXP 5168’a iletilir. Verici düğüm ToA, RSSI, LQI değerleri başta olmak üzere gerekli bilgileri alıcı düğüme iletir.



Şekil 3.3. Alıcı ve verici düğümler arası haberleşme şeması

3.2. Ölçümler

Bu çalışmalar kapsamında ölçümler iç mekân ve dış mekân olmak üzere iki farklı ortamda yapılmıştır. Her bir pakette 10 ölçüm olacak şekilde 1000 paketlik toplamda ise yaklaşık olarak 10000 ölçüm yapılmıştır ve bu ölçüm sonuçlarından belirli mesafelerdeki değerler aşağıda verilmiştir.

Dış mekân ölçüm deneyleri için Akdeniz Üniversitesi kampüsü mühendislik fakültesi bilgisayar mühendisliği ek binası yan tarafında bulunan açık alan seçilmiştir. Seçilen alanda düğümler arasında haberleşme esnasında herhangi bir engel olmamasına dikkat edilmiştir. Yapmış olduğumuz ölçümlerde alıcı düğüm her ölçüm için sabit iken, verici düğüm farklı uzaklıklardaki değerleri algılamak için Şekil 3.4’de gösterilen alanda hareket halinde kullanılmıştır. Anlık gürültü ve hata değerlerinin etkisini azaltmak amacıyla 5 metreden 125 metreye kadar beşer metre aralıklar ile ve her mesafe için en az 100 toplamda yaklaşık olarak 5000 ölçüm yapılmıştır (Ulusar vd. 2019).

İç mekân ölçüm deneyleri için Akdeniz Üniversitesi mühendislik fakültesi ek binası bilgisayar mühendisliği koridorları seçilmiştir. Şekil 3.5’te ölçüm yapılan alandaki alıcı ve verici düğüm konumları gösterilmiştir. Yapmış olduğumuz ölçümlerde alıcı düğüm her ölçüm için sabit iken, verici düğüm farklı uzaklıklardaki değerleri

algılamak için hareket halinde kullanılmıştır. Anlık gürültü ve hata değerlerinin etkisini azaltmak amacıyla 1 metreden 25 metreye kadar birer metre aralıklar ile ve her mesafe için en az 100 toplamda yaklaşık olarak 5000 ölçüm yapılmıştır.

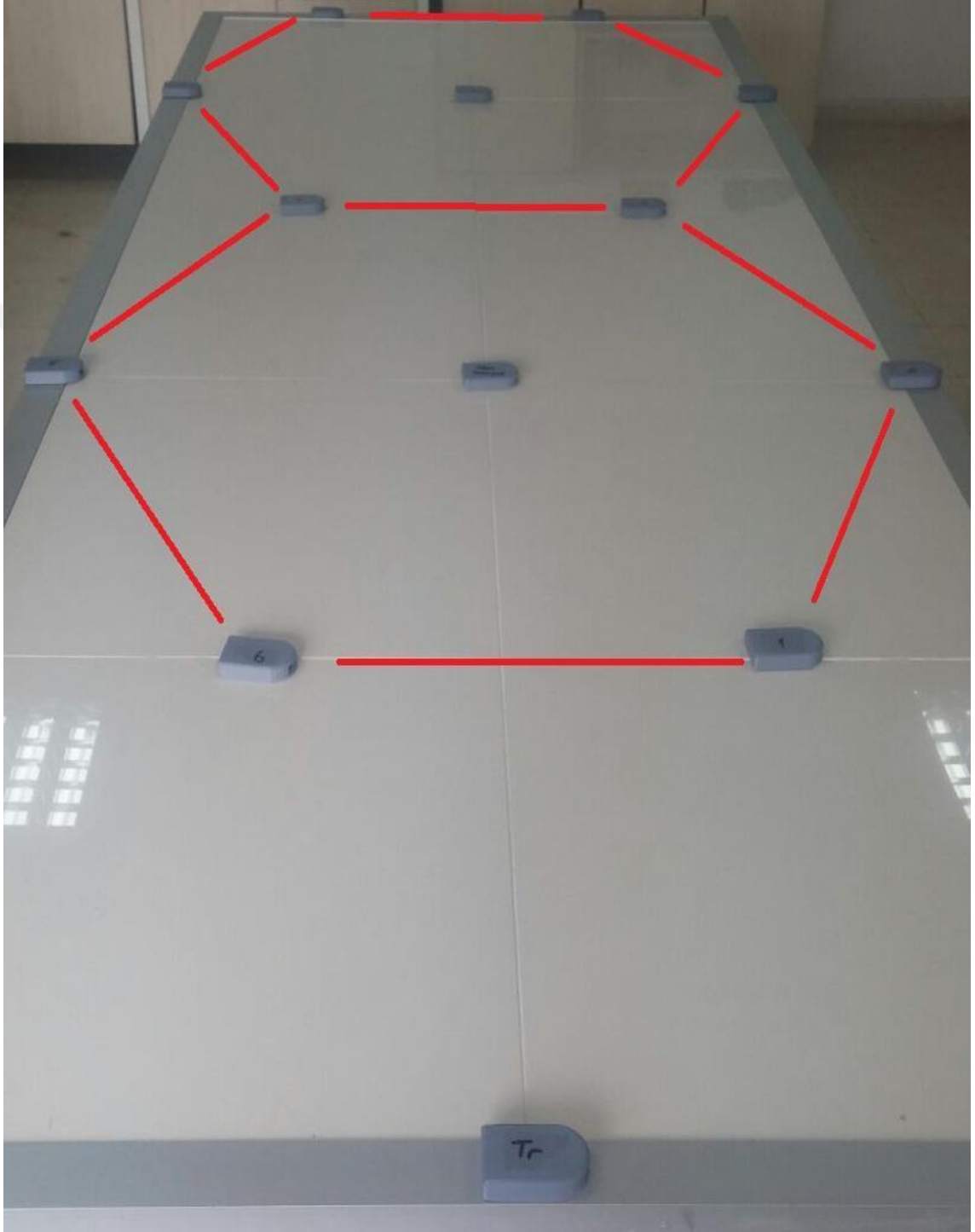


Şekil 3.4. Dış mekân ölçüm ortamı



Şekil 3.5. İç mekân ölçüm ortamı

Oluşturulacak olan ağ için; operatör bazında ilk kurulum ve bakım maliyeti düşük olacak şekilde işletme esnasında en düşük enerji tüketimi ile en yüksek kapsama alanı ve bağlantı kalitesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda aynı alanı kapsamak için Al-Turjman tarafından önerilen altıgen biçimli yerleşim planı ile de ölçümler yapılmıştır (Al-Turjman 2018). Şekil 3.6’da örnek yerleşim planı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Altıgen biçiminde yerleştirilmiş düğümler ile kurulan ağ

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dış mekân için yapılmış olan 5000 ölçümden 25, 50, 75, 100 ve 125 metredeki ölçümlerden örnekler aşağıda gösterilmiştir. Bu ölçümlerde, Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5’de gösterildiği gibi ToA, ToA değerlerinin standart sapması, ToA tabanlı mesafe hesaplama, yerel düğümdeki RSSI değeri, uzak düğümdeki RSSI, Yerel düğümdeki LQI ve uzak düğümdeki LQI değerleri hakkında bilgi vermektedir. Her haberleşme paketinde 10 adet mesaj (0-9) bilgisi bulunmaktadır.

Çizelge 4.1. Dış mekân 25 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	82968	42	245	45	248
1	85062	40	242	46	243
2	84912	42	241	45	235
3	82156	41	248	44	238
4	78568	42	254	46	245
5	86500	42	246	44	249
6	83562	41	247	44	247
7	77593	40	245	44	242
8	84156	40	253	43	241
9	85656	41	254	46	250

25 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 83113 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 2799 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 24,9 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 36 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 41 ve 247, uzak düğüm için 45 ve 244 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 1,1 kattır.

50 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToF değeri 167689 pikosaniye, 10 adet ToF mesajının standart sapması 3808 pikosaniye, ToF temelli mesafe hesaplanması 50,3 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 97,9 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 32 ve 238, uzak düğüm için 35 ve 248 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToF değeri ile en düşük ToF oranı 1,07 kattır.

Çizelge 4.2. Dış mekân 50 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	165606	33	237	35	244
1	171831	32	225	34	249
2	191169	33	242	35	239
3	165856	31	242	35	250
4	165981	32	238	36	246
5	167012	33	231	36	246
6	168169	33	233	34	255
7	175387	31	233	36	255
8	162678	32	246	35	241
9	163206	32	248	35	251

Çizelge 4.3. Dış mekân 75 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	253606	32	248	36	246
1	249325	31	246	35	240
2	249075	36	238	36	249
3	250669	32	237	35	239
4	258024	32	219	34	245
5	247481	33	226	33	245
6	257168	33	236	36	246
7	246669	33	239	35	244
8	250231	31	240	36	242
9	249106	33	241	33	254

75 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToF değeri 251135 pikosaniye, 10 adet ToF mesajının standart sapması 3687 pikosaniye, ToF temelli mesafe hesaplanması 75,3 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 94,4 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 33 ve 237, uzak düğüm için 35 ve 245 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToF değeri ile en düşük ToF oranı 1,04 kattır.

Çizelge 4.4. Dış mekân 100 metre mesafede haberleşme parametreleri

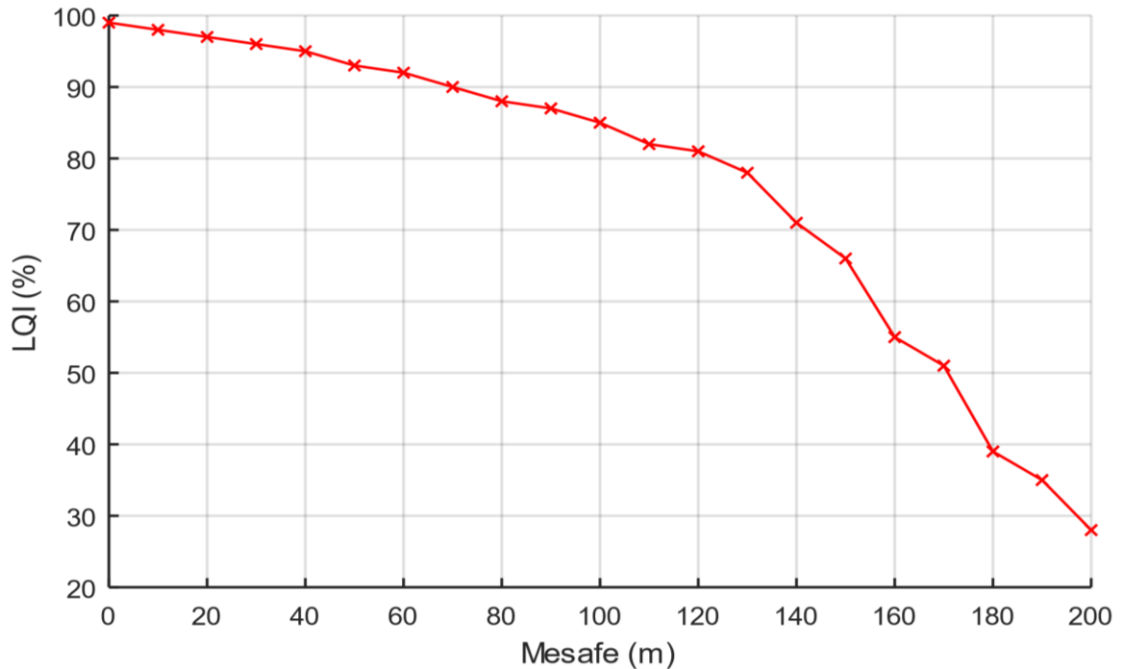
No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	318669	24	221	26	193
1	317619	23	217	25	208
2	317712	23	214	25	223
3	329462	24	215	24	214
4	320681	23	222	25	234
5	321281	23	223	24	223
6	318812	23	236	24	222
7	333712	23	210	25	231
8	321524	23	235	25	226
9	326337	23	226	25	235

100 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 322580 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 5192 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 96 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 191 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 23 ve 222, uzak düğüm için 25 ve 221 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 1,05 kat olmuştur.

125 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 421197 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 7590 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 126,4 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 243,11 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 25 ve 220, uzak düğüm için 28 ve 234 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 1,06 kattır.

Çizelge 4.5. Dış mekân 125 metre mesafede haberleşme parametreleri

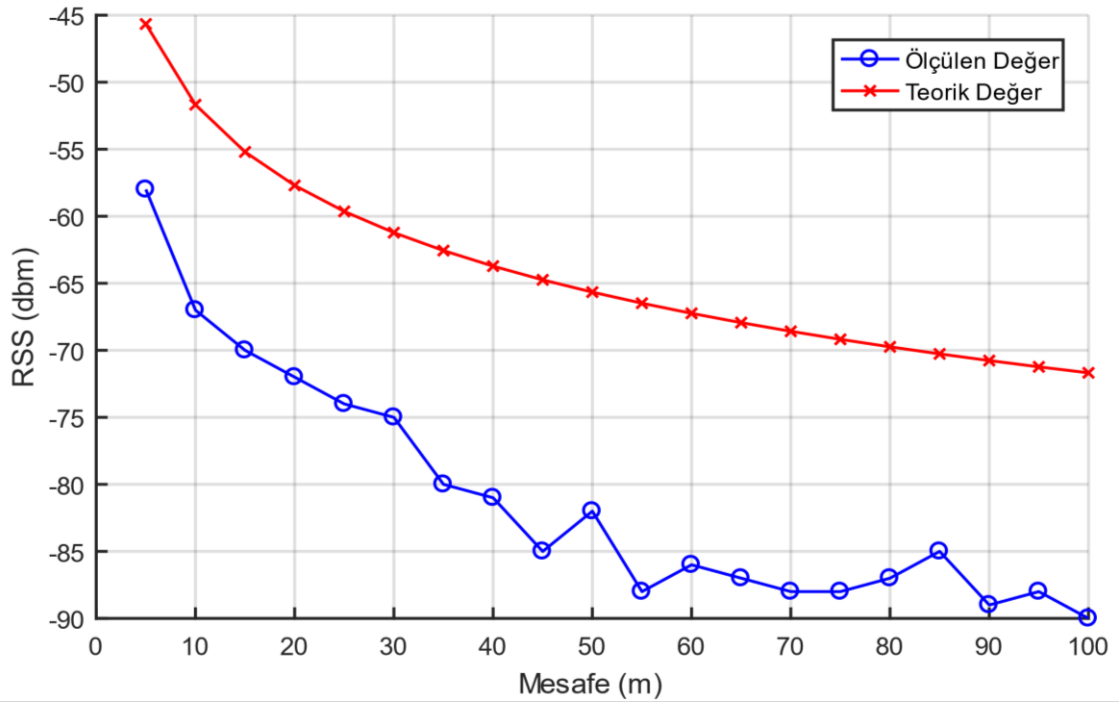
No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	423612	25	213	28	239
1	406894	26	214	27	231
2	415081	25	221	28	231
3	416000	24	221	27	231
4	418493	25	228	27	226
5	426637	25	222	29	247
6	416588	24	211	28	229
7	424893	25	227	28	242
8	432574	25	226	29	229
9	431200	26	213	28	231

**Şekil 4.1.** Dış mekânda mesafeye bağlı LQI güvenilirliği grafiği

Gerçekleştirilen pratik ölçümlerde elde edilen sonuçlara gelince ise; Şekil 4.1’te dış mekân ölçümlerindeki düğümler arası farklı mesafelerde alınmış olan LQI değerleri yardımı ile oluşturulan grafik gösterilmektedir. Buna göre LQI değerinin %80’e düştüğü değer olan 120 metre mesafeye kadar, LQI değeri her 10 metre değişimde ortalama 3

birim düşüş eğilimi göstermektedir. Ancak mesafe arttıkça bu düşüş miktarı artmaktadır. 120 metre mesafeden sonra her 10 metrede ortalama 11 birim düşüş göstermektedir. Bu sonuçlar makalelerimizde açıkça belirtilmiştir (Ulusar vd. 2018).

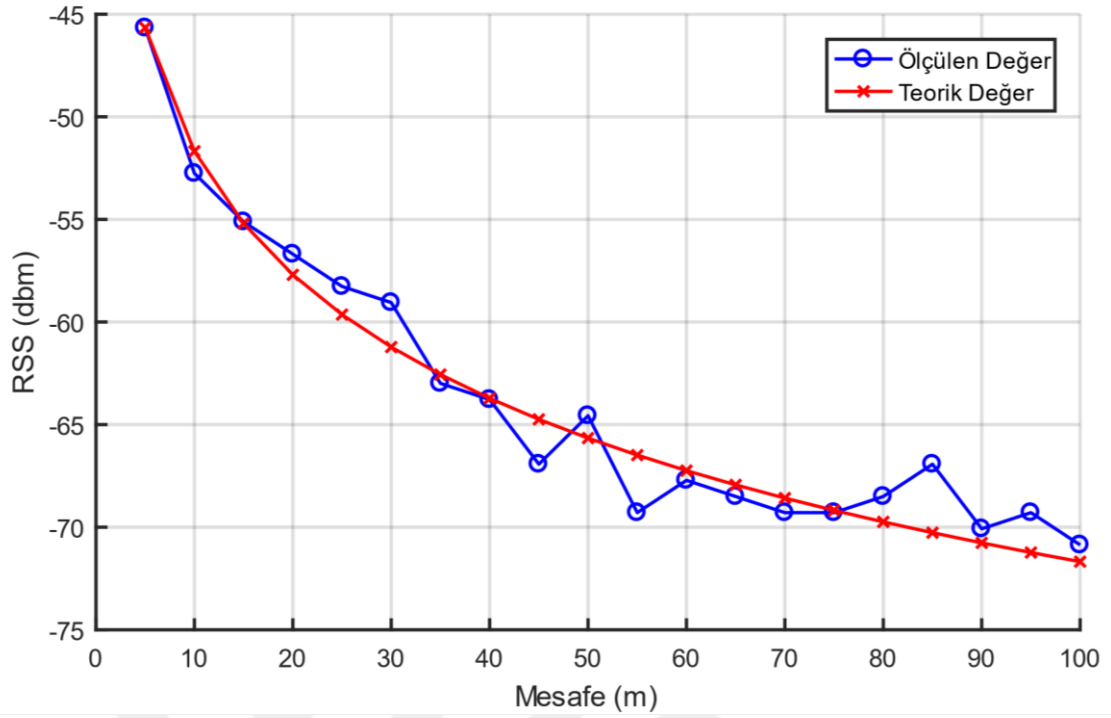
Dış mekândaki düğümler arası mesafenin RSS değerine etkisi de Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu etkinin hem teorik hesaplamalarda olması gereken değer, hem de pratikte ölçülen değerin karşılaştırılmasını içermektedir.



Şekil 4.2. Dış mekânda beklenen ve ölçülen RSS değerleri grafiği

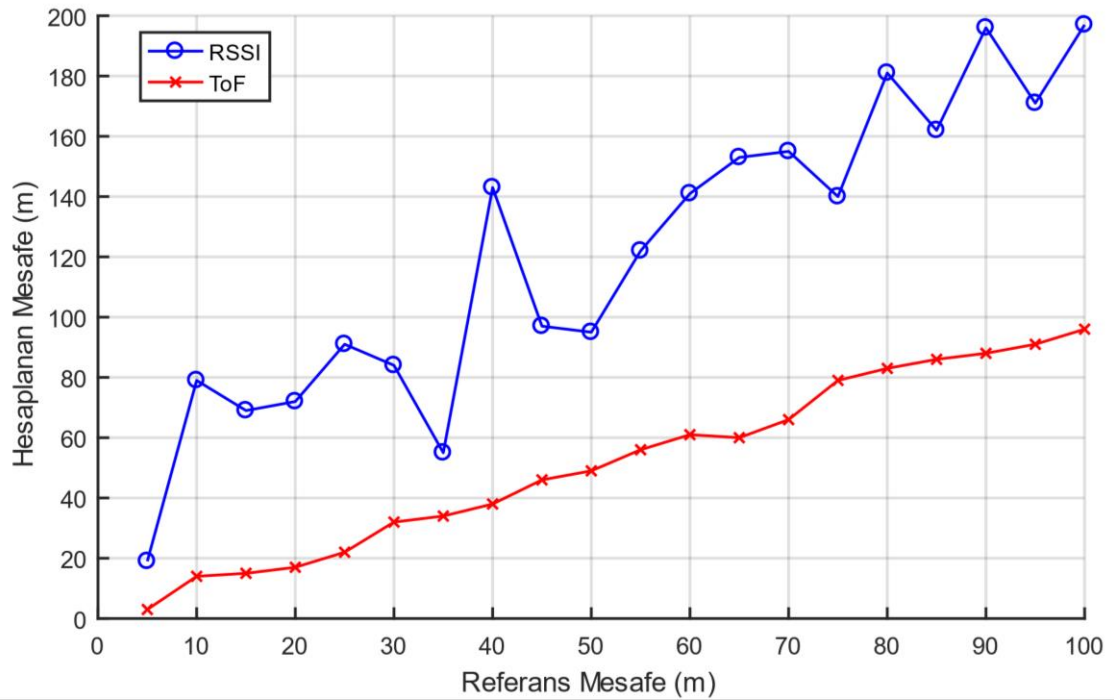
Buna göre mesafenin RSS değerine üstel olarak ters orantılı etki ettiği gözlemlenebilmektedir. Pratik değerin ise ortalama olarak teorik değerden ortalama 13 dBm veya 1,27 kat daha düşük değer aldığı görülmektedir. Düğümler arasındaki mesafenin 30 metreyi aşmasından sonra pratik ölçümlerdeki değerlerin daha düzensiz bir şekilde olduğu belirtilmelidir. Buna çevresel etmenlerin bozucu etkisi neden olmaktadır.

Düğümlerin haberleşmesi ile almış olduğumuz parametrelerden biri de düğümler arası mesafelerin hesaplanması olmuştur. Buna göre; RSSI tabanlı ölçüm ile ToA tabanlı ölçüm aynı grafikte metre yardımı ile ölçmüş olduğumuz referans mesafelere göre değerleri görülmektedir. İç ve dış mekânlar alınan verilere göre ToA tabanlı hesaplamaların RSSI ile kıyaslandığında oldukça başarılı sonuçlar verdiği yorumlanabilmektedir. RSSI tabanlı ölçümdeki tutarsızlığın işaret gücünün birçok etmene bağlı olarak bozulabilmesi ve oldukça kolay kayba uğramasına bağlı olduğu söylenebilir. Ortalama 1,27 kat daha düşük ölçülen RSS değeri ile ölçülen değeri karşılaştırmak için Şekil 4.3 çizdirilmiştir. Buna göre düğümler arası mesafe 0 – 40 m arasında iken RSS değerleri daha düzenli dağılım gösterirken 40 metreden sonra ise göreceli olarak daha düzensiz dağılım göstermiştir.



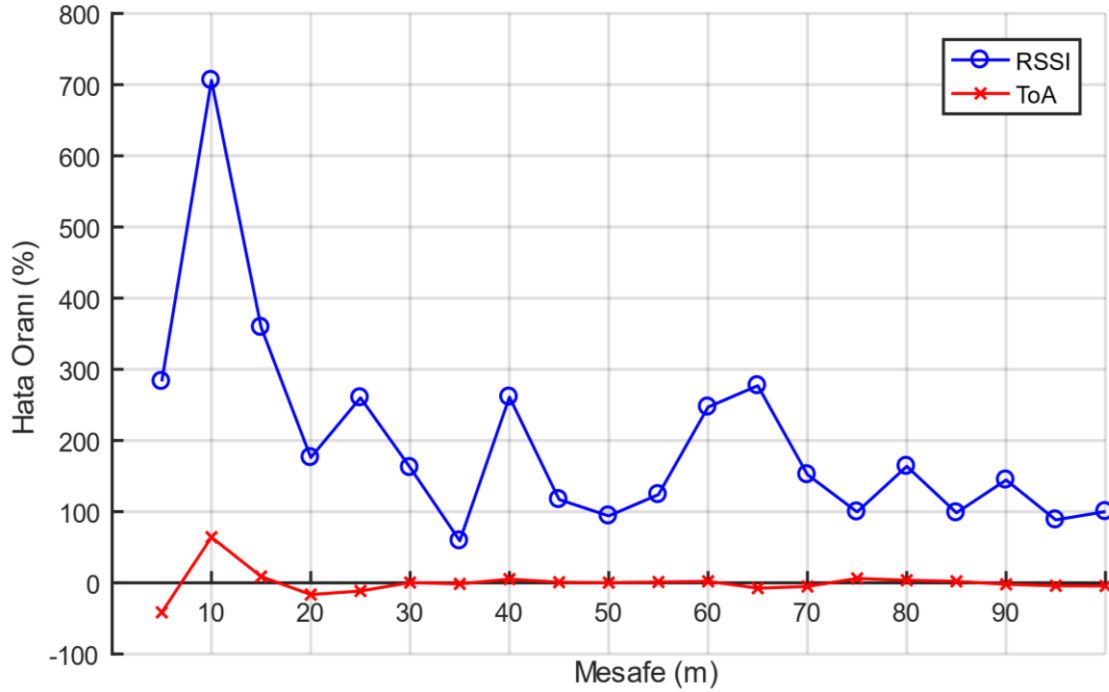
Şekil 4.3. Dış mekânda güçlendirilmiş ölçülen ve teorik RSS değerleri grafiği

Şekil 4.4'te dış mekânda alınan ölçümlerde, gösterildiği gibi RSSI tabanlı ölçümlerle referans mesafenin ortalama olarak 2,4 katı fazla değer elde edilmektedir. ToA tabanlı ölçümlerde ise referans ölçümden 1,13 kat daha düşük tahminler yapılmaktadır.

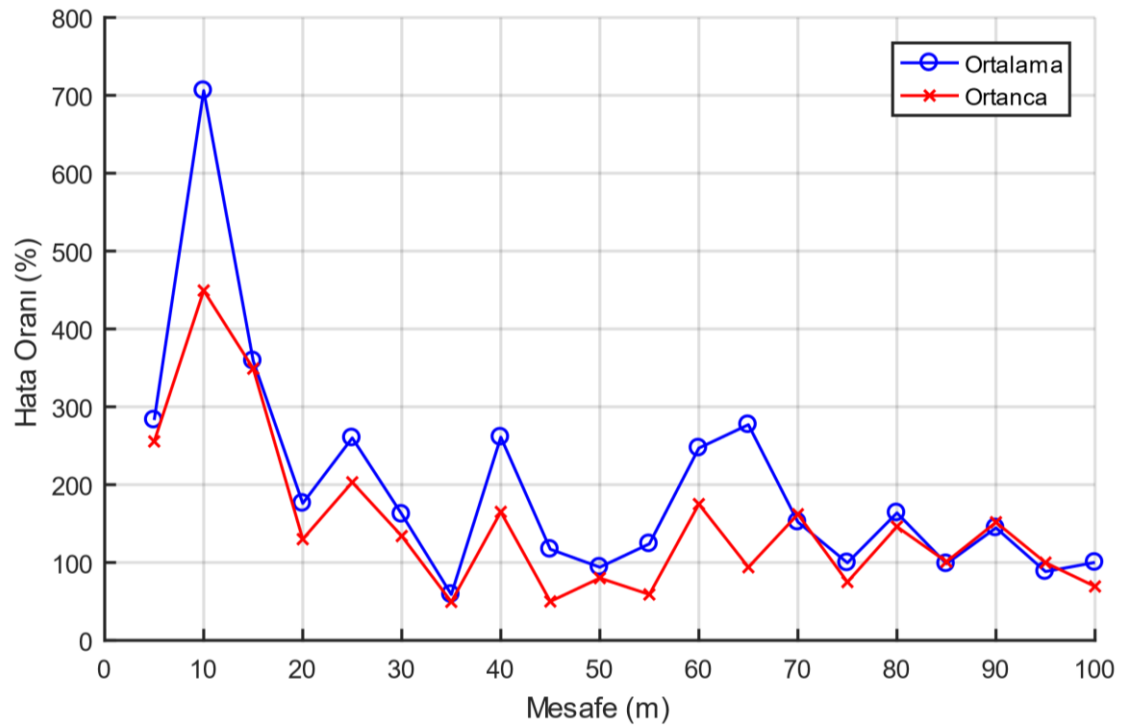


Şekil 4.4. Dış mekân RSSI, ToA temelli mesafe ölçümünün referansa bağlı grafiği

Şekil 4.5'te gösterildiği şekilde her mesafe için değerler normalize edilmiştir. ToA değerleri hata oranları daha uzun mesafeler için daha doğru sonuçlar vermektedir yani mesafe arttıkça tahminler beklenen değere yaklaşmaktadır.



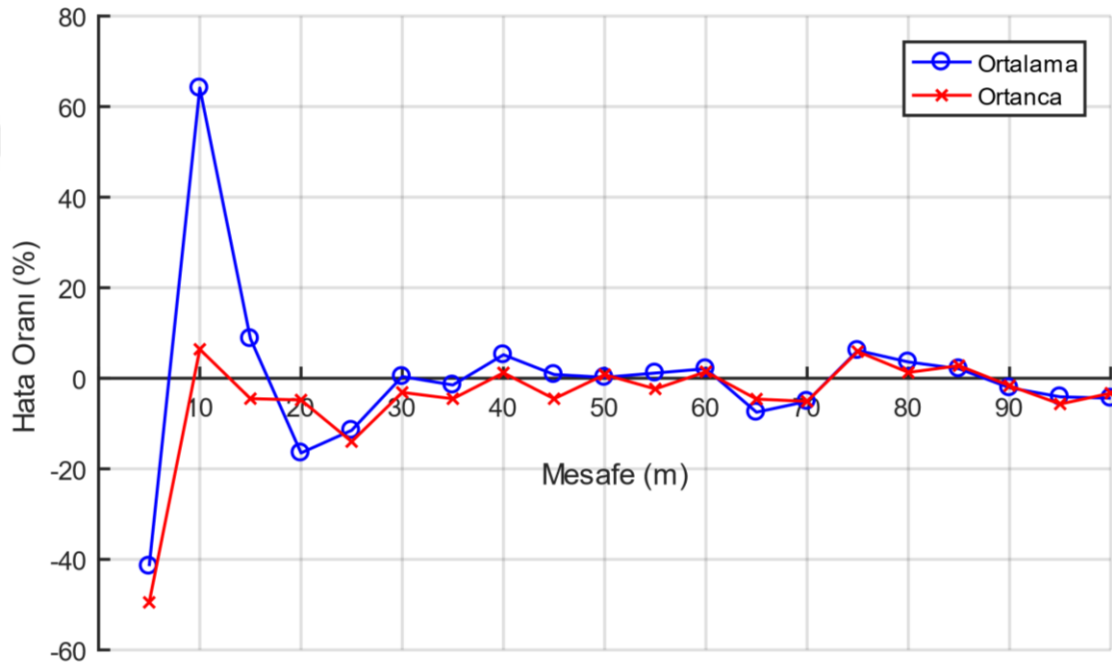
Şekil 4.5. Dış mekân RSSI ve ToA değerlerinin hata oranı grafiği



Şekil 4.6. Dış mekânda RSSI değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması

Dış mekânda yapılan ölçümlerde elde edilen değerleri farklı istatistiksel yöntemler ile test etmek için ortanca (medyan) ile ortalama değerlerini her bir mesafe için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6'da RSSI tabanlı hesaplanan mesafe değerleri için medyan değerlerinin ortalama değerlerine göre daha az hata payı içerdiği açıkça söylenebilmektedir.

Şekil 4.7'de ise ToA tabanlı hesaplanan mesafe değerlerinin 15 m'den daha düşük uzaklık için düzensiz bir değerleme görülür iken daha uzak mesafelerde neredeyse ortalama ile birbirine yakın değerlemeler aldığı görülmektedir. Hatta bu mesafelerde oldukça ufak da olsa ortanca değerlerinin daha başarısız tahminler yaptığı da söylenebilmektedir.



Şekil 4.7. Dış mekânda ToA değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması

İç mekânda yapılmış olan 5000 ölçümden 3, 7, 13, 17 ve 23 metredeki ölçümlerden örnekler Çizelge 4.6, Çizelge 4.7, Çizelge 4.8, Çizelge 4.9, Çizelge 4.10'de gösterilmiştir.

3 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 10659 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 4450 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 3,2 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 17,1 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 48 ve 245, uzak düğüm için 51 ve 248 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 4,11 kattır.

Çizelge 4.6. İç mekân 3 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	14793	48	247	51	250
1	5044	48	241	51	246
2	20731	48	247	51	249
3	10075	47	241	51	246
4	8856	48	248	51	242
5	11669	48	248	50	250
6	7450	48	243	49	255
7	8606	48	240	53	252
8	6012	49	245	51	249
9	13356	48	248	52	244

Çizelge 4.7. İç mekân 7 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	26131	49	247	51	253
1	19975	48	247	51	245
2	26600	48	249	51	245
3	20912	49	246	51	252
4	24193	49	247	50	250
5	23037	49	248	50	255
6	21950	49	247	52	254
7	16037	49	236	51	252
8	26568	48	250	51	242
9	27599	49	248	49	246

7 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 23300 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 3467 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 6,99 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 16,1 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 49 ve 245, uzak düğüm için 51 ve 249 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 1,72 kattır.

13 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 40828 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 2514 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 12,2 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 16,6 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 48 ve 244, uzak düğüm için 51 ve 252 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 1,25 kattır.

Çizelge 4.8. İç mekân 13 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	44724	49	247	51	250
1	40137	48	250	50	255
2	35918	48	244	51	255
3	41418	48	248	51	255
4	42381	49	237	51	250
5	37512	48	244	50	216
6	41012	48	242	52	253
7	43912	49	247	53	248
8	40788	49	249	51	254
9	40481	48	251	51	250

17 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 84149 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 4017 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 20,47 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 49,68 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 38 ve 246, uzak düğüm için 41 ve 248 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 1,19 kattır.

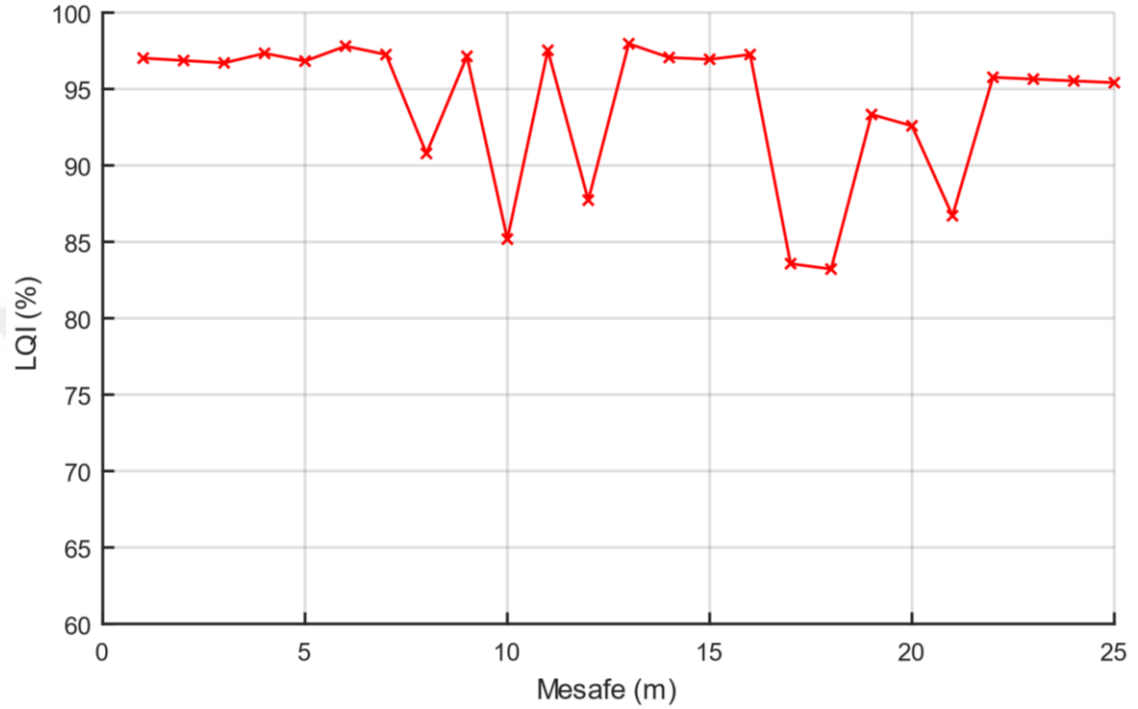
Çizelge 4.9. İç mekân 17 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	66387	38	248	41	243
1	63456	38	244	40	250
2	60856	38	236	41	243
3	67300	37	239	42	253
4	65106	36	253	40	245
5	72762	39	243	41	246
6	65175	40	248	40	249
7	70894	38	245	41	255
8	67856	38	254	41	242
9	71981	38	246	41	252

Çizelge 4.10. İç mekân 23 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	89224	36	254	40	239
1	86725	36	253	38	251
2	87075	36	250	39	248
3	86850	35	243	39	246
4	82756	34	247	38	249
5	84131	36	248	40	251
6	76100	38	237	39	250
7	78912	37	249	39	248
8	83037	36	245	40	252
9	85569	36	237	38	249

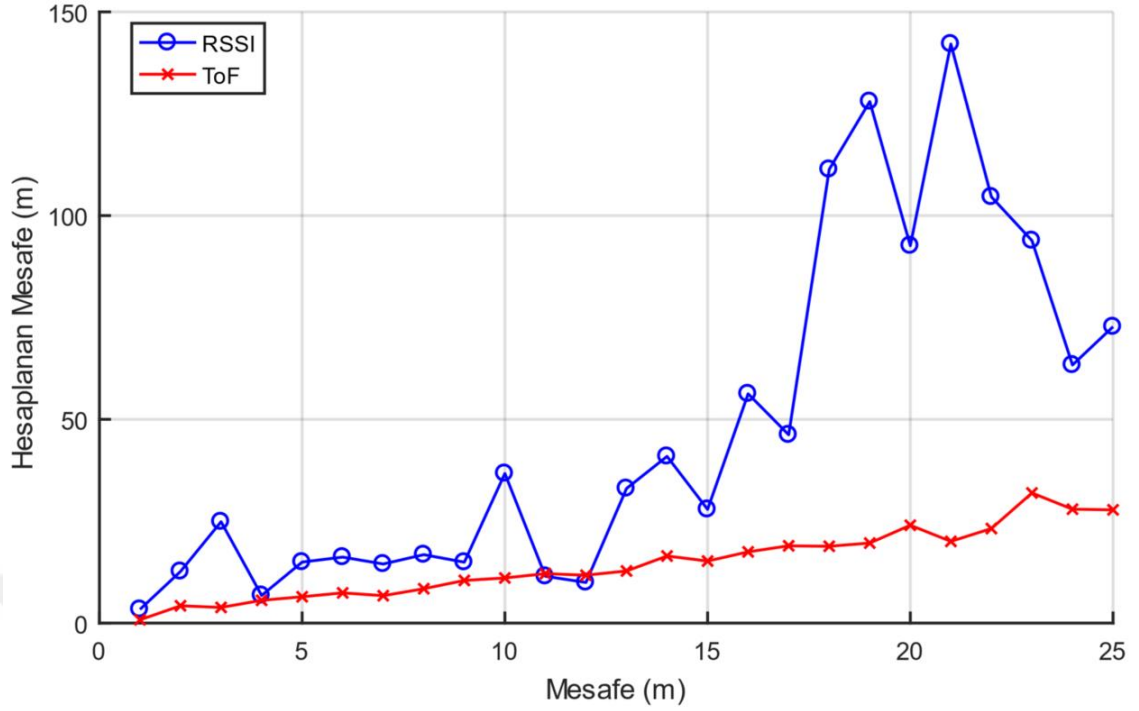
23 metre mesafeden alınan ölçümler için ortalama ToA değeri 84149 pikosaniye, 10 adet ToA mesajının standart sapması 4006 pikosaniye, ToA temelli mesafe hesaplanması 25,24 metre ve RSSI temelli mesafe ölçümü ise 68,37 metre olarak bulunmuştur. Ortalama RSSI ve LQI değerleri sırasıyla yerel düğümler için 36 ve 243, uzak düğüm için 39 ve 247 olmuştur. Bu paket için en yüksek ToA değeri ile en düşük ToA oranı 1,17 kattır.



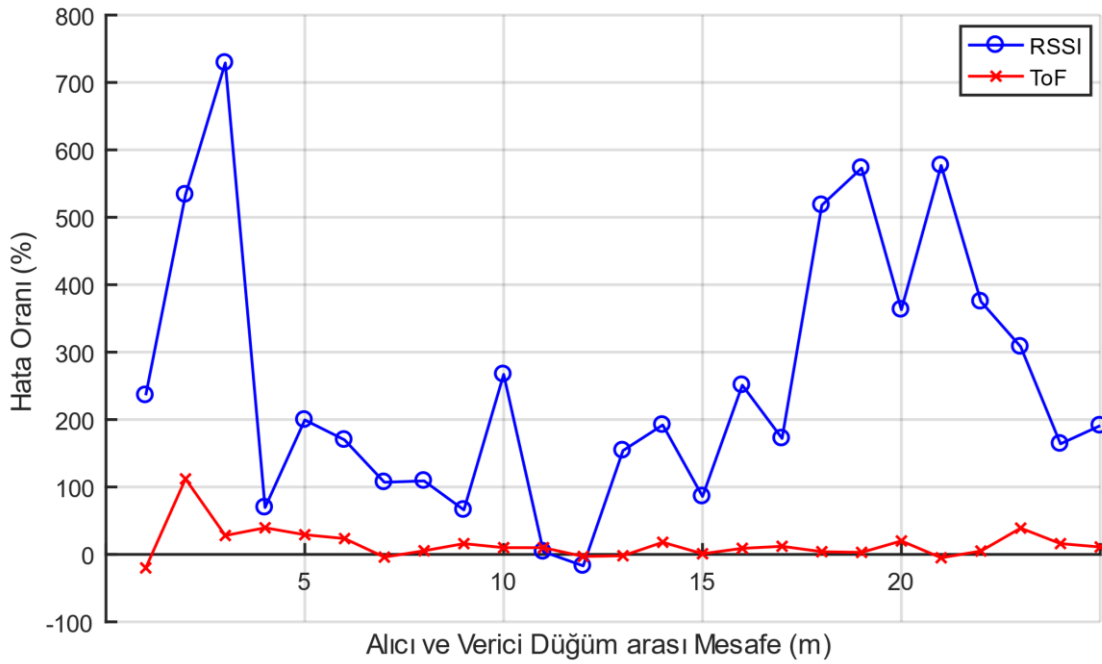
Şekil 4.8. İç mekânda mesafeye bağlı LQI güvenilirliği grafiği

Şekil 4.8’da LQI’nın iç mekânda mesafeye bağlı değişimi gösterilmiştir. Dış mekandaki değerlerinin aksine iç mekânda LQI çok daha dalgalı bir değişim izlemektedir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’de iç mekânda alınan ölçümler gösterilmiştir. Ortalamada, ToA tabanlı hesaplamalar referans değerlerden ortalama %17 daha yüksek değer vermektedir. RSSI tabanlı hesaplamalar için ise tahmini mesafe %257 daha yüksektir. Ayrıca tıpkı dış mekân ölçümlerinde olduğu gibi, ToA değerlerinin hata oranları daha uzun mesafeler için daha doğru sonuçlar verirken RSSI da bu görülmemektedir.

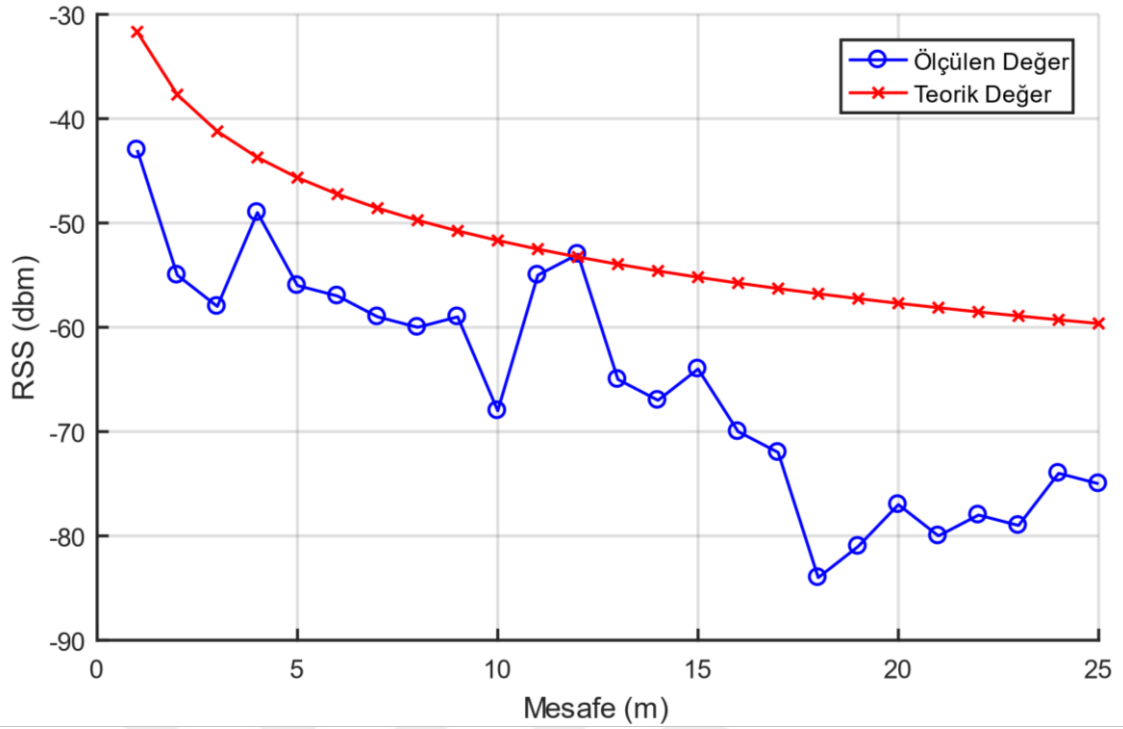


Şekil 4.9. İç mekân RSSI, ToF temelli mesafe ölçümünün grafiği

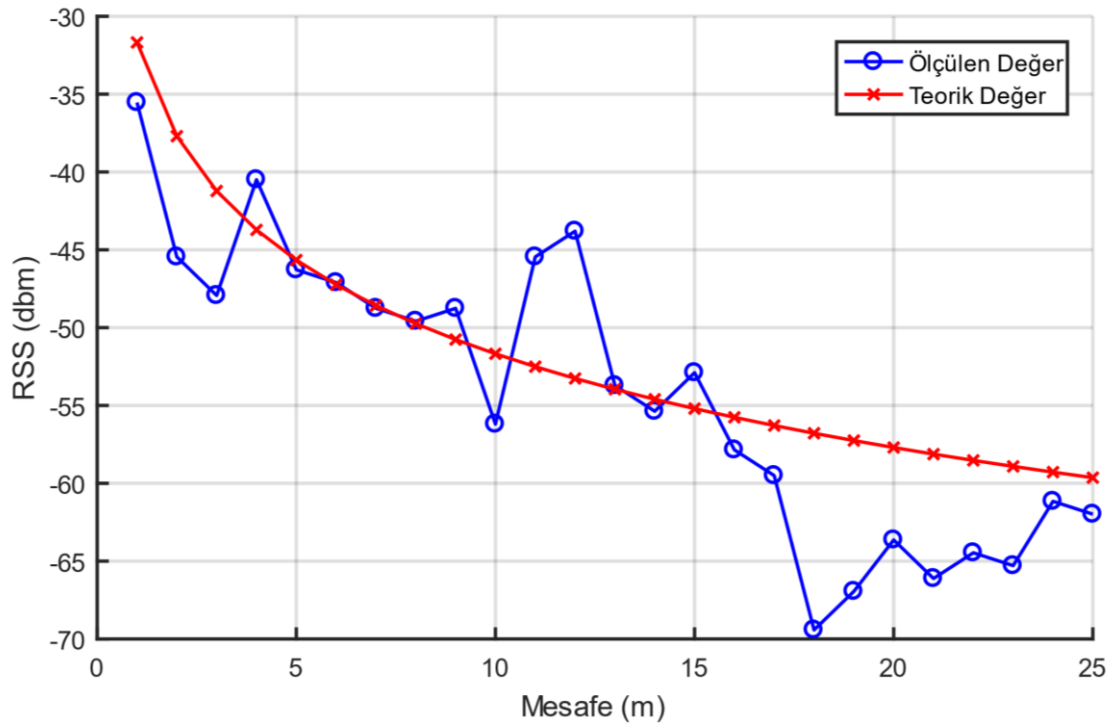


Şekil 4.10. İç mekân RSSI ve ToF tabanlı ölçümlerin hata oranı

Şekil 4.11'de beklenen ve ölçülen RSSI değerleri çizdirilmiştir. Ortalamada, deney sonuçları teorik değerlerden 13.8 dBm daha az olduğu ve daha uzun mesafeler için fark arttığı gözlemlenmektedir. Ortalama 1,21 kat daha düşük ölçülen teorik RSSI değeri ile ölçülen değeri karşılaştırmak için Şekil 4.12 çizdirilmiştir. Buna göre dış mekandaki değerlerin aksine iç mekandaki değerler genel olarak oldukça düzensiz değerler almıştır. Buna iç mekânda dış mekâna göre daha fazla olan yansıma kaynaklı alınan güç düşüşleri neden olmaktadır.



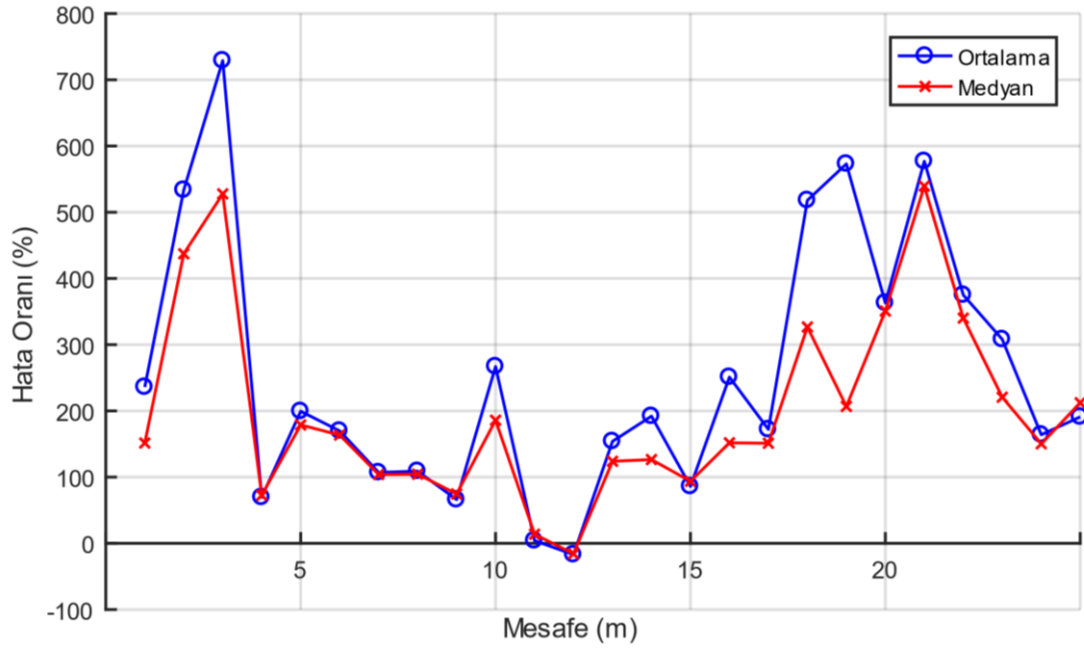
Şekil 4.11. İç mekân beklenen ve ölçülen RSSI değerleri grafiği



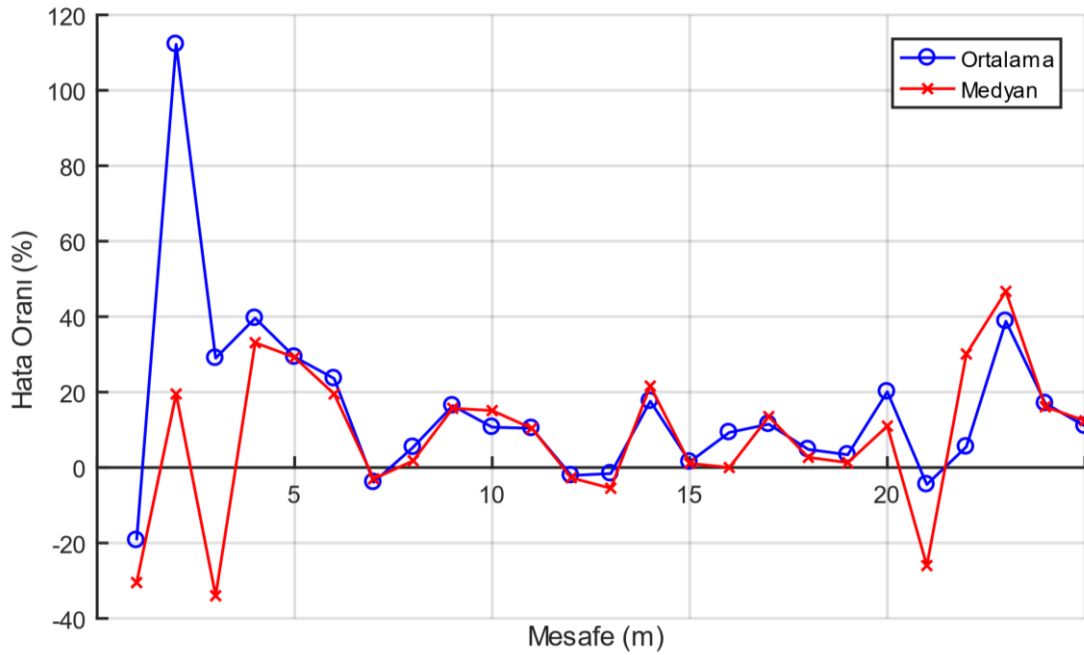
Şekil 4.12. İç mekânda güçlendirilmiş ölçülen ve teorik RSS değerleri grafiği

Çalışmalarımızın daha da ilerletilebilmesi için toplanmış olan veriler farklı istatistiksel yöntemler ile de karşılaştırarak incelenmiştir. Bunun için iç mekândan alınan RSSI ve ToF değerlerin ortalamalarını ve ortancalarını (medyan) alarak daha

sağlıklı tahminler yapmayı amaçladık. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de bu değerler çizdirilmiştir.



Şekil 4.13. İç mekânda RSSI değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması



Şekil 4.14. İç mekânda ToF değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması

Buna göre çok değişken değerlerin bulunduğu kümelerde daha başarılı tahminler yapan medyan, RSSI ölçümlerinde ortalama değerlerinden daha başarılı tahminler yapmıştır. Ancak ToF değerlerinde aynı yorumlama yapılamamaktadır. Toplamda yapılmış olan 10000 ölçümden aynı mesafedeki iç ve dış mekân ölçümlerini karşılaştırmak için 5, 10, 15, 20 ve 25 metredeki ölçümlerden örnekler Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15, Çizelge 4.16, Çizelge 4.17,

Çizelge 4.18, Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20 aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. İç mekân 5 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	21387	51	242	53	251
1	28325	51	242	53	244
2	24337	50	249	52	250
3	19744	50	247	51	247
4	23150	50	254	50	250
5	20712	51	245	52	248
6	21275	50	247	50	250
7	15337	49	240	53	229
8	19837	50	252	51	252
9	21428	51	252	50	248

Çizelge 4.12. Dış mekân 5 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	13459	48	242	50	246
1	18300	48	242	50	240
2	23453	48	249	50	249
3	15400	49	247	49	239
4	17262	48	254	51	245
5	23168	48	245	51	245
6	16481	49	247	51	246
7	20762	48	240	51	244
8	11512	48	252	51	242
9	16862	48	252	50	254

5 metre mesafeden alınan iç ve dış mekân ölçümlerin karşılaştırılması yapılır ise; iç mekân için ortalama ToA değeri 21553 pikosaniye, dış mekân için 17665 pikosaniye olmuştur. İşaret iletim süresinin standart sapması iç mekân için 3191 pikosaniye, dış mekân için 3698 pikosaniye olmuştur. ToA temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 6,4 metre, dış mekân için 5,2 metre, RSS temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 13,9 metre, dış mekân için 17 metre olmuştur. Ortalama yerel düğüm RSSI değerleri iç mekân için 50, dış mekân için 48'dir. Uzak düğüm RSSI değerleri iç mekân için 51, dış mekân için 50'dir. Yerel düğüm LQI değerleri iç mekân için 247, dış mekân için 247'dir. Uzak düğüm LQI değerleri iç mekân için 247, dış mekân için 245'tir. En yüksek ToA değerinin en düşük ToA değerine oranı iç mekân için 1,85 dış mekân için 2,04 kat olmuştur.

Çizelge 4.13. İç mekân 10 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	44725	42	237	43	252
1	43788	41	248	43	245
2	48344	42	233	44	234
3	36350	41	247	45	161
4	44287	43	244	44	238
5	45950	42	251	45	251
6	35887	42	253	44	253
7	40731	42	249	43	249
8	41887	41	250	43	251
9	36825	41	254	43	254

10 metre mesafeden alınan iç ve dış mekân ölçümlerin karşılaştırılması yapılır ise; iç mekân için ortalama ToA değeri 41876 pikosaniye, dış mekân için 35499 pikosaniye olmuştur. İşaret iletim süresinin standart sapması iç mekân için 4336 pikosaniye, dış mekân için 3221 pikosaniye olmuştur. ToA temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 12,6 metre, dış mekân için 10,64 metre, RSS temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 38,6 metre, dış mekân için 26,71 metre olmuştur. Ortalama yerel düğüm RSSI değerleri iç mekân için 42, dış mekân için 45'dir. Uzak düğüm RSSI değerleri iç mekân için 44, dış mekân için 47'dir. Yerel düğüm LQI değerleri iç mekân için 247, dış mekân için 248'dir. Uzak düğüm LQI değerleri iç mekân için 247, dış mekân için 251'tir. En yüksek ToA değerinin en düşük ToA değerine oranı iç mekân için 1,33 dış mekân için 1,41 kat olmuştur.

Çizelge 4.14. Dış mekân 10 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	33672	44	250	46	251
1	33682	44	239	46	255
2	37725	45	249	45	250
3	39062	44	237	46	248
4	35812	45	248	48	245
5	37621	43	242	48	248
6	34562	47	250	47	251
7	28268	44	247	46	248
8	40050	45	249	46	245
9	34562	45	243	48	249

Çizelge 4.15. İç mekân 15 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	52131	44	245	46	248
1	49637	44	243	45	248
2	55131	43	243	46	245
3	47075	45	242	45	248
4	52662	43	249	46	256
5	50350	45	247	46	255
6	53037	45	239	45	248
7	45825	44	251	46	254
8	46262	44	252	46	255
9	53381	44	240	46	245

Çizelge 4.16. Dış mekân 15 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	49043	41	250	43	249
1	51575	40	245	43	243
2	51193	42	255	44	246
3	50937	42	235	44	247
4	50887	40	242	44	251
5	45887	41	245	43	253
6	49012	41	250	43	249
7	45762	41	249	43	248
8	50918	40	253	44	243
9	52606	41	235	42	248

15 metre mesafeden alınan iç ve dış mekân ölçümlerin karşılaştırılması yapılır ise; iç mekân için ortalama ToA değeri 50549 pikosaniye, dış mekân için 49782 pikosaniye olmuştur. İşaret iletim süresinin standart sapması iç mekân için 3095 pikosaniye, dış mekân için 2225 pikosaniye olmuştur. ToA temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 15,2 metre, dış mekân için 14,9 metre, RSS temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 29,1 metre, dış mekân için 39,5 metre olmuştur. Ortalama yerel düğüm RSSI değerleri iç mekân için 44, dış mekân için 41'dir. Uzak düğüm RSSI değerleri iç mekân için 46, dış mekân için 43'dir. Yerel düğüm LQI değerleri iç mekân için 245, dış mekân için 242'dir. Uzak düğüm LQI değerleri iç mekân için 250, dış mekân için 246'tir. En yüksek ToA değerinin en düşük ToA değerine oranı iç mekân için 1,2 dış mekân için 1,14 kat olmuştur.

20 metre mesafeden alınan iç ve dış mekân ölçümlerin karşılaştırılması yapılır ise; iç mekân için ortalama ToA değeri 66990 pikosaniye, dış mekân için 69172 pikosaniye olmuştur. İşaret iletim süresinin standart sapması iç mekân için 4413 pikosaniye, dış mekân için 3087 pikosaniye olmuştur. ToA temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 20,1 metre, dış mekân için 20,75 metre, RSS temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 98,8 metre, dış mekân için 35,11 metre olmuştur. Ortalama yerel düğüm RSSI değerleri iç mekân için 34, dış mekân için 42'dir. Uzak düğüm RSSI değerleri iç mekân için 35, dış mekân için 44'dir. Yerel düğüm LQI değerleri iç mekân için 237, dış mekân için 244'dir. Uzak düğüm LQI değerleri iç mekân için 238, dış mekân için 249'tir. En yüksek ToA değerinin en düşük ToA değerine oranı iç mekân için 1,22 dış mekân için 1,15 kat olmuştur.

Çizelge 4.17. İç mekân 20 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	69794	33	239	36	248
1	62644	33	225	35	240
2	65337	34	241	34	250
3	71087	33	239	36	235
4	65806	33	244	34	249
5	63213	36	243	35	255
6	74631	33	227	37	251
7	64294	33	227	37	251
8	72325	35	237	36	249
9	60769	34	228	35	252

Çizelge 4.18. Dış mekân 20 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	64593	42	245	44	248
1	68093	44	239	46	250
2	67056	40	248	44	255
3	64868	41	246	42	245
4	71906	43	253	45	249
5	69500	42	250	45	239
6	69687	42	239	44	244
7	74181	42	249	43	240
8	73275	42	241	44	243
9	68562	42	245	44	247

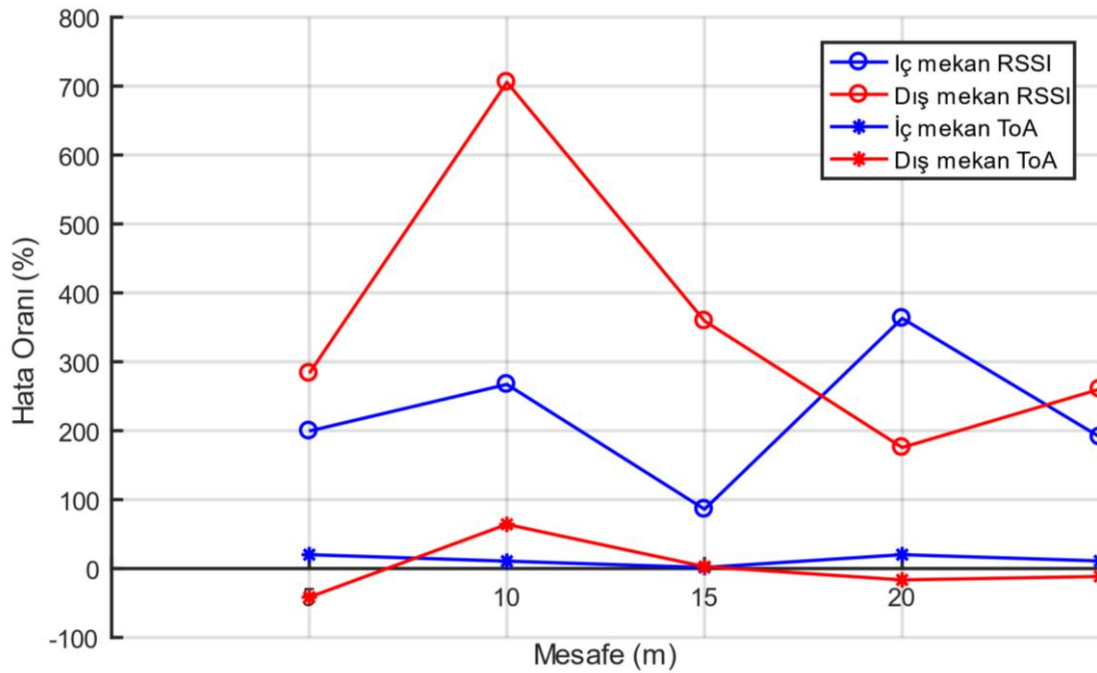
Çizelge 4.19. İç mekân 25 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	86300	36	241	37	247
1	93618	35	245	38	250
2	91962	35	246	37	245
3	95050	36	242	38	254
4	99981	36	237	38	248
5	94862	37	237	37	242
6	92799	36	242	36	247
7	88862	34	239	37	229
8	94425	36	246	38	241
9	95168	37	241	36	246

Çizelge 4.20. Dış mekân 25 metre mesafede haberleşme parametreleri

No	ToA (ps)	Yerel RSSI %	Yerel LQI	Uzak RSSI %	Uzak LQI
0	82968	42	245	45	248
1	85062	40	242	46	243
2	84912	42	241	45	235
3	82156	41	248	44	238
4	78568	42	254	46	245
5	86500	42	246	44	249
6	83562	41	247	44	247
7	77593	40	245	44	242
8	84156	40	253	43	241
9	85656	41	254	46	250

25 metre mesafeden alınan iç ve dış mekân ölçümlerin karşılaştırılması yapılır ise; iç mekân için ortalama ToA değeri 93302 pikosaniye, dış mekân için 83113 pikosaniye olmuştur. İşaret iletim süresinin standart sapması iç mekân için 3545 pikosaniye, dış mekân için 2799 pikosaniye olmuştur. ToA temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 27,9 metre, dış mekân için 24,9 metre, RSS temelli mesafe hesaplaması ise iç mekân için 75,4 metre, dış mekân için 36 metre olmuştur. Ortalama yerel düğüm RSSI değerleri iç mekân için 36, dış mekân için 41'dir. Uzak düğüm RSSI değerleri iç mekân için 37, dış mekân için 45'dir. Yerel düğüm LQI değerleri iç mekân için 242, dış mekân için 247'dir. Uzak düğüm LQI değerleri iç mekân için 245, dış mekân için 244'tir. En yüksek ToA değerinin en düşük ToA değerine oranı iç mekân için 1,16 dış mekân için 1,1 kat olmuştur.

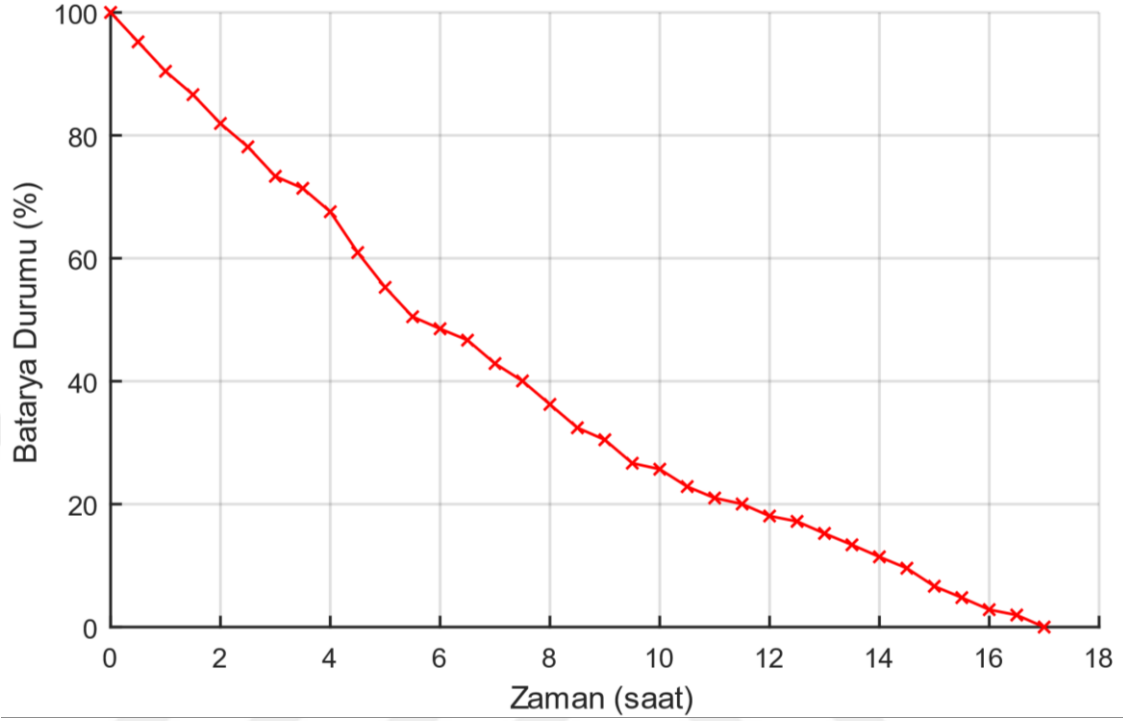


Şekil 4.15. İç mekânda ToF değerleri için ortalama ve medyan karşılaştırılması

İç ve dış mekandaki ölçümlerden elde edilen aynı mesafelerdeki tahmin değerlerinin karşılaştırılabilmesi için Şekil 4.15 çizdirilmiştir. Bu grafikte 5-10-15-20 ve 25 metredeki mesafe tahminleri iç mekânda alınan RSSI temelli, dış mekânda alınan RSSI temelli, iç mekânda alınan ToA temelli ve dış mekânda alınan ToA temelli değerler gösterilmiştir. Bu grafiğe göre ölçüm yapılan alandan bağımsız olarak RSSI tabanlı tahminler her zaman ToA tabanlı tahminlerden daha hatalı sonuçlar vermektedir. Bu hata oranı farkı dış mekân için %200 ile %700 arasında değişirken, iç mekân için %100 ile %350 arasında değişmektedir. ToA tabanlı ölçümlerde ise ortalama hata oranı iç ve dış mekân için yaklaşık olarak birbirine eşit olup %50'den daha az olmaktadır.

Çalışmalarımızda her düğümün beslemesi 350 mAh kapasiteli bir tek hücreli lityum polimer batarya ile sağlanmıştır. Pillerin kullanım ömrünü uzun tutmak için çıkış gerilim değerleri 4.2 V ve 3.7 V arasında olmasına özen gösterilmiştir. Düğümlerin güç tüketimlerini belirlemek için bir test ortamı da ayrıca hazırlanmıştır. Her 30 dakikada bir alınan ölçümlerde batarya çıkış gerilim değeri ve NXP 5168 modülünde bulunan

RISC işlemcinin ADC çıkış değerleri alınmıştır. Bu değerler kullanılarak Şekil 4.16'da gösterilen grafik oluşturulmuştur ve bu grafikte 4.2 V değeri batarya doluluk oranı cinsinden %100'ı ve 3.7 V değeri %0'ı temsil etmektedir.



Şekil 4.16. Zamana bağlı batarya durumu grafiği

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, yeni nesil internet tasarımı oldukça kritik bir öneme sahip olan konumlandırma ile ilgili detaylı ve karşılaştırılmalı çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda belirtilen çalışmada ağ özelliklerine ve ihtiyaçlarına bağlı olarak yerleştirilebilecek düğüm bileşenlerinin yerleştirilme ve veri dağıtım tekniklerini detaylı bir şekilde incelenmiştir. Tez çalışmasında ZigBee tabanlı kablosuz sensör ağı oluşturularak çeşitli ölçüm ve deneyler yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır sistemin beklenen ve gözlenen performansı arasındaki fark belirtilmiştir. Bu karşılaştırmadan hareketle geleceğin interneti için akıllı bir veri dağıtım sisteminde ağda bulunan düğümlerin batarya düzeylerini kontrol eden, birbirleriyle olan mesafelerini göz önünde bulundurarak tercih yapan bir yönlendirme algoritmasının sensör konumlandırmanın yönlendirme ile birlikte veri iletiminde başarılı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir (Al-Turjman, 2017c).

Çalışmamızdaki sonuçlar, WSN'ler için uygun düğüm sayısı ve konumunu seçerek verilerin kullanıcıya istenen QoI ve QoS gereksinimlerini sağlayarak daha başarılı ve sürdürülebilir ağı oluşturulmasına katkı sağlayacağı belirtilmiştir. Bu çalışmanın uzun vadede hedefi geleceğin interneti için optimize edilmiş veri iletimi teknolojileri konusunda bütünsel fikirler sunmaktır. Çalışmada RSSI, ToA ve LQI değerleri oldukça kritik öneme sahiptir. RSSI değerlerinin dBm cinsinden değerlerini incelemek zor olduğu için RSSI dönüşümü kullanılmış bunda da CISCO çizelgesindeki yüzdelik dönüşümden yararlanılmıştır. RSSI ve ToA tabanlı ölçümlerin başarı oranını ölçmek için hata oranı formülü kullanılmış bu sayede farklı ortam ve tekniklerin birbirleri ile karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır. 0-255 arasında olan LQI değerleri için de yüzdelik dönüşüm kullanılarak %80 altında iletim sağlanan haberleşme başarısız olarak kabul edilmiştir.

Dış ortamda RSSI tabanlı ölçümlerle referans mesafenin ortalama olarak %240 daha fazla değer elde edilirken ToA tabanlı ölçümlerde %13 daha düşük tahminler yapılmaktadır. İç ortamda ise ToA tabanlı hesaplamalar referans değerlerden ortalama %17 daha yüksek değer vermektedir. RSSI tabanlı hesaplamalar için ise tahmini mesafe %257 daha yüksektir. Ayrıca hem iç hem de dış mekân ölçümlerinde, ToA değerlerinin hata oranları daha uzun mesafeler için daha doğru sonuçlar verirken RSSI da bu yorum yapılamamaktadır. Alınan RSSI değerleri teorik olarak beklenen değerden dış mekânda ortalama 1,27 kat, iç mekânda 1,21 kat daha düşük olmaktadır. Ancak iç mekândaki değerler dış mekâna kıyasla daha düzensiz bir şekilde gerçekleşmiştir.

Medyan ve ortalama değerlerinin karşılaştırılmasında dış ortam koşullarında RSSI tabanlı hesaplanan mesafe değerleri için medyan değerlerinin ortalama değerlerine göre daha az hata payı içerdiği açıkça söylenebilmektedir. ToA tabanlı hesaplanan mesafe değerlerinin 15 m'den daha düşük uzaklık için düzensiz bir değerlendirme görülür iken daha uzak mesafelerde neredeyse ortalama ile birbirine yakın değerlemeler aldığı görülmektedir. Hatta bu mesafelerde oldukça ufak da olsa ortalama değerlerinin daha başarısız tahminler yaptığı da söylenebilmektedir. İç ortam şartlarında, değişken değerlerin bulunduğu kümelerde daha başarılı tahminler yapan medyan, RSSI ölçümlerinde ortalama değerlerinden daha başarılı tahminler yapmıştır. Ancak ToF değerlerinde aynı yorumlama dış ortam koşullarında olduğu gibi yapılamamaktadır.

Aynı mesafeden elde edilen değerler için ise, ölçüm yapılan alandan bağımsız olarak RSSI tabanlı tahminler her zaman ToA tabanlı tahminlerden daha hatalı sonuçlar vermektedir. Bu hata oranı farkı dış mekân için %200 ile %700 arasında değişirken, iç mekân için %100 ile %350 arasında değişmektedir. ToA tabanlı ölçümlerde ise ortalama hata oranı iç ve dış mekân için yaklaşık olarak birbirine eşit olup %50'den daha az olmaktadır.

LQI değeri dış ortam ölçümlerinde %80 değerine 120 metre mesafeden sonra düşerken iç ortamda düzenli bir düşüş net olarak görülememiştir.

Son olarak çalışmamızdaki düğümleri besleyen pil karakteristiği açıklanacak olursa; pil gerilimi, batarya ömrünü ve sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla belirlenmiş olan 4.2 V değerinden 3.7 V değerine yaklaşık olarak 17 saatlik bir süre zarfında gelmiştir.

Bu tez TÜBİTAK 3001 Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı tarafından 115E198 numaralı proje ile desteklenmiştir. Tez çalışmaları kapsamında 3 adet uluslararası konferans bildirisi ve 1 adet kitap bölümü yayınlanmıştır. Bu çıktılar listesi özgeçmiş bölümünde sunulmuştur.

6. KAYNAKLAR

- Ahlgren, B., Dannewitz, C., Imbrenda, C., Kutscher, D., and Ohlman, B. (2012). A survey of information-centric networking. *IEEE Communications Magazine* 50, 26–36. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6231276.
- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M.A., and Al-Khalifa, H.S. (2016). Ultra-Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. *Sensors* 16. DOI: 10.3390/s16050707.
- Al-Fagih, A.E., Al-Turjman, F.M., Alsalih, W.M., and Hassanein, H.S. (2013). A Priced Public Sensing Framework for Heterogeneous IoT Architectures. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 1, 133–147. DOI: 10.1109/TETC.2013.2278698.
- Alrajeh, N.A., Bashir, M., and Shams, B. (2013). Localization Techniques in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 9, 304628. DOI: 10.1155/2013/304628.
- Al-Turjman, F. (2017a). Cognitive routing protocol for disaster-inspired Internet of Things. *Future Generation Computer Systems*, pp. 1103–1115. DOI: 10.1016/j.future.2017.03.014.
- Al-Turjman, F. (2017b). Cognitive-Node Architecture and a Deployment Strategy for the Future WSNs. *Mobile Networks and Applications*, pp. 1–19. DOI 10.1007/s11036-017-0891-0.
- Al-Turjman, F. (2017c). Positioning in the Internet of Things Era: An overview. 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET). doi:10.1109/icengtechnol.2017.8308188
- Al-Turjman, F. (2018). Optimized Hexagon-Based Deployment for Large-Scale Ubiquitous Sensor Networks. *Journal of Network and Systems Management*, 26, 255–283. DOI: 10.1007/s10922-017-9415-2.
- Al-Turjman, F.M. (2017c). Information-centric sensor networks for cognitive IoT: an overview. *Annals of Telecommunications* 72, 3–18. DOI: 10.1007/s12243-016-0533-8.
- Al-Turjman, F.M., Hassanein, H.S., and Ibnkahla, M. (2011). Optimized Relay Placement to Federate Wireless Sensor Networks in environmental applications. In 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 2040–2045. DOI: 10.1109/IWCMC.2011.5982848.
- Al-Turjman, F.M., Al-Fagih, A.E., Alsalih, W.M., and Hassanein, H.S. (2013). A delay-tolerant framework for integrated RSNs in IoT. *Computer Communications* 36, 998–1010. DOI: 10.1016/j.comcom.2012.07.001.
- Ash, J.N., and Potter, L.C. (2004). Sensor Network Localization via Received Signal Strength Measurements with Directional Antennas.
- Bedford, M.D., and Kennedy, G.A. (2012). Evaluation of ZigBee (IEEE 802.15.4) Time-of-Flight-Based Distance Measurement for Application in Emergency Underground Navigation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 60, 2502–2510. DOI:

10.1109/TAP.2012.2189731.

- Benini, A., Mancini, A., and Longhi, S. (2013). An IMU/UWB/Vision-based Extended Kalman Filter for Mini-UAV Localization in Indoor Environment using 802.15.4a Wireless Sensor Network. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 70, 461–476. DOI: 10.1007/s10846-012-9742-1.
- Boukerche, A., Oliveira, H.A.B.F., Nakamura, E.F., and Loureiro, A.A.F. (2007). Localization systems for wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications* 14, 6–12. DOI: 10.1109/MWC.2007.4407221.
- Chen, Z., Xia, F., Huang, T., Bu, F., and Wang, H. (2013). A localization method for the Internet of Things. *The Journal of Supercomputing* 63, 657–674. DOI: 10.1007/s11227-011-0693-2.
- Fadi, M.A.T., Ashraf, E.A.F., Hossam, S.H., and Mohamed, A.I. (2010). Deploying fault-tolerant grid-based wireless sensor networks for environmental applications. In *IEEE Local Computer Network Conference*, pp. 715–722. DOI: 10.1109/LCN.2010.5735798.
- Farid, Z., Nordin, R., and Ismail, M. (2013). Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System. DOI: 10.1155/2013/185138.
- Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., Atzori, L. (2010). The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications (New York: Springer-Verlag). DOI: 10.1007/978-1-4419-1674-7.
- Han, X., Cao, X., Lloyd, E.L., and Shen, C.C. (2010). Fault-Tolerant Relay Node Placement in Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 9, 643–656. DOI: 10.1109/TMC.2009.161.
- Hasan, M.Z., Al-Turjman, F., and Al-Rizzo, H. (2016). Evaluation of a duty-cycled protocol for TDMA-based Wireless Sensor Networks. In *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 964–969. DOI: 10.1109/IWCMC.2016.7577189.
- Huircán, J.I., Muñoz, C., Young, H., Von Dossow, L., Bustos, J., Vivallo, G., and Toneatti, M. (2010). ZigBee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, 258–264. DOI: 10.1016/j.compag.2010.08.014.
- Hwang, S., and Yu, D. (2012). Gps localization improvement of smartphones using built-in sensors. *International Journal of Smart Home* Volume 6, Number 3.
- Joana Halder, S., and Kim, W. (2012). A Fusion Approach of RSSI and LQI for Indoor Localization System Using Adaptive Smoothers. *Journal of Computer Networks and Communications* 2012. DOI: 10.1155/2012/790374.
- Lee, J.-S. (2006). Performance evaluation of IEEE 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 52, 742–749. DOI: 10.1109/TCE.2006.1706465.
- Lee, J.S., Su, Y.W., and Shen, C.C. (2007). A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 46–51. DOI:

10.1109/IECON.2007.4460126.

- Li, M., and Liu, Y. (2009). Underground Coal Mine Monitoring with Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* 5, 10:1–10:29. DOI: 10.1145/1498915.1498916.
- Liu, C.H., and Lo, J.Y. (2010). The Study for the ZigBee with RFID Positioning System. In *2010 Second International Conference on Multimedia and Information Technology*, pp. 104–107. DOI: 10.1109/MMIT.2010.156.
- Mao, G., Fidan, B., and Anderson, B.D.O. (2007). Wireless sensor network localization techniques. *Computer Networks* 51, 2529–2553. DOI: 10.1016/j.comnet.2006.11.018.
- Moses, R.L., Krishnamurthy, D., and Patterson, R.M. (2003). A Self-Localization Method for Wireless Sensor Networks. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* 2003, 839843. DOI: 10.1155/S1110865703212063.
- Nemra, A., and Aouf, N. (2010). Robust INS/GPS Sensor Fusion for UAV Localization Using SDRE Nonlinear Filtering. *IEEE Sensors Journal* 10, 789–798. DOI: 10.1109/JSEN.2009.2034730.
- Oteafy, S.M.A. (2016). A Framework for Heterogeneous Sensing in Big Sensed Data. In *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2016.7841499.
- Oteafy, S.M.A., and Hassanein, H.S. (2017). Resilient IoT Architectures Over Dynamic Sensor Networks with Adaptive Components. *IEEE Internet Things J.* 4, 474–483. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2621998.
- Outamazirt, F., Fu, L., Lin, Y., and Abdelkrim, N. (2016). A new SINS/GPS sensor fusion scheme for UAV localization problem using nonlinear SVSF with covariance derivation and an adaptive boundary layer. *Chinese Journal of Aeronautics* 29, 424–440. DOI: 10.1016/j.cja.2016.02.005.
- Patwari, N., Ash, J.N., Kyperountas, S., Hero, A.O., Moses, R.L., and Correal, N.S. (2005). Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine* 22, 54–69. DOI: 10.1109/MSP.2005.1458287.
- Phillips, C., Sicker, D., and Grunwald, D. (2013). A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 15, 255–270. DOI: 10.1109/SURV.2012.022412.00172.
- Singh, G.T., and Al-Turjman, F.M. (2016). Learning Data Delivery Paths in QoI-Aware Information-Centric Sensor Networks. *IEEE Internet Things Journal* 3, pp 572–580. DOI: 10.1109/JIOT.2015.2504487.
- Sugano, M., Kawazoe, T., Ohta, Y., and Murata, M. (2006). Indoor Localization System using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network based on ZigBee Standard. In *Wireless and Optical Communications*.
- Ulusar, U.D., Celik, G., and Al-Turjman, F. (2017a). Wireless Communication Aspects in the Internet of Things: An Overview. In *2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops*, pp. 165–169. DOI: 10.1109/LCN.Workshops.2017.82

- Ulusar, U.D., Al-Turjman, F., and Celik, G. (2017b). An overview of Internet of things and wireless communications. In 2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), pp. 506–509. DOI: 10.1109/UBMK.2017.8093446.
- Ulusar, U.D., Al-Turjman, F., and Celik, G. (2018). Accurate Indoor Localization for ZigBee Networks. In 2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), pp. 514–517. DOI: 10.1109/UBMK.2018.8566532.
- Ulusar, U.D., Celik, G., Turk, E., Al-Turjman, F., and Guvenc, H. (2019). Practical Performability Assessment for ZigBee-Based Sensors in the IoT Era. In Performability in Internet of Things, F. Al-Turjman, ed. (Cham: Springer International Publishing), pp. 21–31. DOI: 10.1007/978-3-319-93557-7_2.
- Wang, F., Wang, D., and Liu, J. (2011). Traffic-Aware Relay Node Deployment: Maximizing Lifetime for Data Collection Wireless Sensor Networks. IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst. 22, 1415–1423. DOI: 10.1109/TPDS.2011.20.
- Yut, L., Fei, Q., and Geng, Q. (2013). Combining ZigBee and inertial sensors for quadrotor UAV indoor localization. In 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), pp. 1912–1916. DOI: 10.1109/ICCA.2013.6565087.

ÖZGEÇMİŞ

GÜRKAN ÇELİK

gurkancelik07@gmail.com

<http://comnets.akdeniz.edu.tr/team/celik/>



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016 –	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Kocaeli Üniversitesi
2011 – 2015	Mühendislik Fakültesi, Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

ESERLER

Kitap Bölümleri

1- U. D. Ulusar, G. Çelik, E. Türk, F. Al-Turjman and H. Guvenc “Practical Performability Assessment for ZigBee-Based Sensors in the IoT Era”, Performability in Internet of Things, EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, Springer Nature 2019, DOI: 10.1007/978-3-319-93557-7_2.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- U. D. Ulusar, G. Çelik, E. Türk, F. Al-Turjman and H. Guvenc “Accurate Indoor Localization for ZigBee Networks”, Uluslararası Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Konferansı (UBMK) 2018, DOI: 10.1109/UBMK.2018.8566532.

2- U. D. Ulusar, F. Al-Turjman and G. Çelik, “An Overview of Internet of Things and Wireless Communications”, Uluslararası Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Konferansı (UBMK) 2017, DOI: 10.1109/UBMK.2017.8093446.

3- U. D. Ulusar, G. Çelik and F. Al-Turjman, “Wireless Communication Aspects in the Internet of Things: An Overview”, Local Computer Networks (LCN) Konferansı 2017, DOI: 10.1109/LCN.Workshops.2017.82.