

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BLUETOOTH 4.2 VE BLUETOOTH 5'İN MESH TOPOLOJİSİ
İLE UYGULAMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI**

ALİ ERGÜN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ




ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BLUETOOTH 4.2 VE BLUETOOTH 5'İN MESH TOPOLOJİSİ
İLE UYGULAMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI

ALİ ERGÜN

Prof.Dr. Oğuzhan URHAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof.Dr. Cem ÜNSALAN
Jüri Üyesi, Marmara Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi ORHAN AKBULUT
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.06.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gelişen ve ilerleyen teknoloji ile birlikte hayatımıza birçok yeni kavram girmiş bu yeni kavramlar hayatımızda birçok şey değiştirmiştir. IoT kelimesi de buna bir örnektir. Her şeyin internete bağlandığı birbiriyle haberleştiği birbirine veri göndererek yaşadığı bir dünyada IoT sistemine yön vermeyi planlayan Bluetooth konusunda çalışma yapmam için imkân sağlayan Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyesi Prof. Dr. Oğuzhan URHAN, Arçelik A. Ş. Şirketi ve sistem testlerinde testlerde beni yalnız bırakmayan Şeyda ÖZER, Yiğit YAŞAR, Ali YAŞAR' a teşekkür ederim.

Haziran – 2019

Ali ERGÜN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. BLUETOOTH NEDİR?	3
1.1. Bluetooth Tarihiçesi	4
1.2. Bluetooth Teknolojisi.....	4
1.2.1. Bluetooth 4 öncesi	5
1.2.1.1. Bluetooth fiziksel katman	6
1.2.1.2. Haberleşme paket yapısı	8
1.2.2. Bluetooth 4 (BLE).....	8
1.2.3. BLE 4.1'nin farkları	13
1.2.4. BLE 4.2'nin farkları	14
1.2.5. Bluetooth 5	14
1.3. Bluetooth classics, bluetooth smart ready, bluetooth smart	19
1.4. Privacy nedir?.....	19
1.5. Bluetooth 4.2 ve Bluetooth 5 Karşılaştırması	20
2. AĞ YAPILARI	22
2.1. Klasik Ağ Yapıları	22
2.1.1. P2P bağlantı	22
2.1.2. Bus bağlantı.....	23
2.1.3. Halka bağlantı	24
2.1.4. Yıldız bağlantı.....	25
2.1.5. Genişletilmiş yıldız bağlantı	26
2.1.6. Ağaç bağlantı	27
2.1.7. Mesh bağlantı	28
2.2. Bluetooth Protokolünde Mesh Bağlantı	29
2.2.1. Bluetooth mesh ağı bileşenleri	29
2.2.1.1. Cihazlar ve Düğümler	29
2.2.1.2. Elemanlar	30
2.2.1.3. Adres	30
2.2.1.4. Publish/Subscribe	30
2.2.2. Bluetooth mesh ağı mimarisi	30
2.2.2.1. Taşıyıcı Katman (Bearer layer).....	31
2.2.2.2. Network Katmanı (Network layer)	31
2.2.2.3. Alt Taşıma Katmanı (Lower transport layer)	31
2.2.2.4. Üst Taşıma Katmanı (Upper transport layer)	32
2.2.2.5. Erişim Katmanı (Access layer)	32
2.2.2.6. Temel Modeller Katmanı (Foundation models)	32

2.2.2.7. Modeller Katmanı (Models)	33
2.2.3. Bluetooth mesh ağlarında güvenlik.....	33
3. SİSTEM GERÇEKLEMESİ	34
3.1. Bluetooth 4.2 İçin Tasarlanan Sistem	34
3.2. Bluetooth 5 İçin Tasarlanan Sistem	34
3.3. Güç Ölçüm sistemi.....	35
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	37
4.1. Kapalı alan Test Sistemleri	37
4.2. Açık Alan Test Sistemleri	40
4.2.1. Bluetooth 4.2’li sistem	41
4.2.2. Bluetooth 5’li sistem	42
4.3. Güç analizi	44
5. SONUÇ	53
KAYNAKLAR	54
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	56
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bluetooth üye firma sayıları	3
Şekil 1.2. Bluetooth versiyon yayın tarihçesi	4
Şekil 1.3. Frekans bandının kullanımı.....	5
Şekil 1.4. Bluetooth katmanları.....	6
Şekil 1.5. Bluetooth frekans bandı	7
Şekil 1.6. Bluetooth BR haberleşme paketi	8
Şekil 1.7. Bluetooth EDR haberleşme paketi	8
Şekil 1.8. BLE çalışma yapısı	9
Şekil 1.9. Veri gönderimi sırasında akım grafiği	11
Şekil 1.10. Paket uzunluğuna bağlı akım grafiği	12
Şekil 1.11. BLE paket yapısı.....	13
Şekil 1.12. BLE 4.2 paket yapısı.....	14
Şekil 1.13. Bluetooth 5 Protokol katmanları	15
Şekil 1.14. LE 1M- LE 2M paket yapısı	15
Şekil 1.15. LE Coded Paket yapısı.....	16
Şekil 1.16. Bluetooth 5 Haberleşme Akış diyagramı.....	18
Şekil 1.17. Bluetooth 5 frekans dağılımı.....	18
Şekil 1.18. Bluetooth 5 kanal ayrımı.....	19
Şekil 1.19. Bluetooth - BLE smart - BLE smart ready örnek kullanımı.....	20
Şekil 2.1. P2P bağlantı	23
Şekil 2.2. Bus bağlantı	24
Şekil 2.3. Halka bağlantı	24
Şekil 2.4. Yıldız bağlantı.....	25
Şekil 2.5. Genişletilmiş yıldız bağlantı	26
Şekil 2.6. Ağaç Bağlantı	27
Şekil 2.7. Tam mesh bağlantı ve kısmi mesh bağlantı.....	28
Şekil 2.8. Örnek Mesh ağı.....	31
Şekil 2.9. Mesh Protokol katmanları.....	32
Şekil 3.1. Bluetooth 4.2'li sistem	34
Şekil 3.2. Bluetooth 5'li sistem	35
Şekil 3.3. SLWSTK6020B geliştirme kartı	35
Şekil 3.4. SLWSTK6020B Blok şeması	36
Şekil 3.5. Güç ölçüm sistemi ekranı	36
Şekil 4.1. Kapalı alan Kroki.....	38
Şekil 4.2. Bluetooth 4.2 kapalı alan testleri	39
Şekil 4.3. Bluetooth 5 kapalı alan testleri	39
Şekil 4.4. Bluetooth 4.2 cihazların yerleşimi	40
Şekil 4.5. Bluetooth 5 cihazların yerleşimi	41
Şekil 4.6. Bluetooth 4.2 açık alan testleri.....	42
Şekil 4.7. Bluetooth 5 açık alan testleri.....	43
Şekil 4.8. Bluetooth 4.2 yayın akım grafiği	44
Şekil 4.9. Bluetooth 5 yayın akım grafiği	44
Şekil 4.10. Bluetooth 4.2 ortalama yayın gücü	45

Şekil 4.11. Bluetooth 5 ortalama yayın gücü	45
Şekil 4.12 Bluetooth 5 RX	50
Şekil 4.13 Bluetooth 5 TX	50
Şekil 4.14. Bluetooth 4.2 RX	51
Şekil 4.15. Bluetooth 4.2 TX	51
Şekil 4.16. Bluetooth enerji karşılaştırması	52



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Bluetooth klasik temel özellikleri	6
Tablo 1.2. TX Güçleri	7
Tablo 1.3. Bluetooth 4.2 Frekans Tablosu	10
Tablo 1.4. Kanal frekans limitleri	10
Tablo 1.5. Güç- aşama tablosu	12
Tablo 1.6. Bluetooth 5 LE 1M ve LE 2M karşılaştırması.....	16
Tablo 1.7. S2 ve S8 zaman karşılaştırmaları.....	17
Tablo 1.8. Fiziksel katmanların özellik karşılaştırılması	17
Tablo 1.9. Bluetooth versiyonlarının karşılaştırılması.....	21
Tablo 4.1. Bluetooth 4.2 Hatasız veri alma miktarı (%)	38
Tablo 4.2. Bluetooth 5 Hatasız veri alma miktarı (%)	39
Tablo 4.3. Bluetooth 4.2 Hatasız veri alma miktarı (%)	42
Tablo 4.4. Bluetooth 5 Hatasız veri alma miktarı (%)	43
Tablo 4.5. Yayın esnasında tepe akımı ve ortalama enerji değerleri	45
Tablo 4.6. Bluetooth 4.2 TX güç tablosu	46
Tablo 4.7. Bluetooth 4.2 RX güç tablosu.....	47
Tablo 4.8. Bluetooth 5 TX güç tablosu	48
Tablo 4.9. Bluetooth 5 RX güç tablosu.....	49
Tablo 4.10. 24 saatlik enerji tüketimi	52
Tablo 4.11. Pil hesabı.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AEM	: Advanced Energy Monitor (Gelişmiş Enerji Monitörü)
BER	: Bit Error Rate (Bit Hata Oranı)
BLE	: Bluetooth Low Energy (Bluetooth Düşük Güç)
BR	: Basic Rate (Temel Hız)
CRC	: Cyclic Redundancy Check (Döngüsel Artıklık Denetimi)
EDR	: Enhanced Data Rate (Gelişmiş Veri Hızı)
FDMA	: Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
FHSS	: Frequency Hopping Spread Spectrum (Frekans Atlamalı Spektrum)
IOT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
ISM	: Industrial, Scientific and Medical (Endüstri, Bilimsel ve Medikal)
P2P	: Peer to Peer (Uçtan Uca)
PC	: Personal Computer (Kişisel Bilgisayar)
SIG	: Special Interest Group (Özel İlgi Grubu)
SNR	: Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
TDMA	: Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)

BLUETOOTH 4.2 VE BLUETOOTH 5'İN MESH TOPOLOJİSİ İLE UYGULAMASI VE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Bluetooth gelişen kullanıcı ihtiyaçları sonucunda mesh topoloji desteği sunmaya başlayan bir haberleşme protokolüdür. İlk mesh desteği Bluetooth 4.2 ile birlikte gelmiş olup, Bluetooth 5.0 ile birlikte mesh desteğinin yetenekleri arttırılmış ve birçok özellik eklenmiştir. Bu çalışmada Bluetooth 4.2 ve Bluetooth 5.0 protokolleri üzerinde mesh ağ yapısı çalıştırılmış ve beyaz eşyalar üzerinde bir uygulama yapılarak performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bluetooth 4.2 ve Bluetooth 5.0 ayrı iki sistem üzerinde çalıştırılarak bu iki sistemin karşılaştırılması yapılmış yeni teknolojinin sağladığı avantajlar incelenmiştir. Testler hem açık alanda hem de kapalı alanda gerçekleştirilmiş, kısa ve uzun mesafede haberleşme performansı incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda Bluetooth 5.0'ın mesh topolojisinde sağladığı faydalar ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BLE, Bluetooth, Mesh, Network.

APPLICATION AND COMPARISON OF BLUETOOTH 4.2 AND BLUETOOTH 5 WITH MESH TOPOLOGY

ABSTRACT

Bluetooth is a communication protocol which starts to offer mesh topology support as a result of developing user needs. The first mesh support has come with Bluetooth 4.2 and after with Bluetooth 5.0 abilities of mesh support has increased and many features has been added. In this study, Bluetooth 4.2 and Bluetooth 5.0 protocols are implemented on whitegoods in a mesh network structure and performance assessment has been carried out. Bluetooth 4.2 and Bluetooth 5.0 are compared against each other by executing them on two separate systems and advantages of newer protocol are investigated. Tests were conducted both in indoor and outdoor environments to evaluate communication performance on long and short distances. As a result of the experimental study, benefits of Bluetooth 5.0's mesh topology is revealed.

Keywords: BLE, Bluetooth, Mesh, Network.

GİRİŞ

Gelişen ihtiyaçlar dolayısı ile cihazlar birbirleri ile konuşma isteği duymaya başlamıştır. Bu ihtiyaçlar ile birlikte Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) ve Endüstri 4.0 terimleri oluşmuştur. Bu terimler cihazların birbiri ile konuşması birbirlerinden veri alması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu konuşma ihtiyacı ile birlikte firmalar kendilerine özgü ve herkesin kullanımına açık haberleşme protokolleri tanıtmıştır. Bu protokollerden başlıcaları ZigBee, Thread, Bluetooth, Sub 1GHz haberleşme protokolleridir. Bu protokollerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Haberleşme yapıları kısa mesafe, orta mesafe ve uzun mesafe olarak 3 kategoride inceleyebilir. 0-100 m arasındaki haberleşmeler kısa mesafeli 100- 1000 m arasındaki haberleşmeler ise orta mesafeli haberleşme olarak tanımlanabilir. Bu tez çalışmasında kısa mesafeli haberleşme üzerine bir çalışma yapılmıştır. Kısa mesafeli haberleşmenin iki önemli özelliği bulunmaktadır. Bunlar düşük maliyet, düşük güç tüketimidir. Düşük maliyet ve düşük güç tüketiminin yan etkisi olarak da güvenlik zayıflığı gösterilebilir [1].

Düşük maliyet; Kısa mesafeli haberleşme donanımları SoC'ler içerisinde sunulabildiği için ve küçük antenler ile haberleşme yapıldığı için maliyet açısından daha uygundur.

Düşük güç tüketimi; Kısa mesafeli haberleşmelerde anten çıkış gücü 1mW seviyelerindedir. Bununla birlikte fiziksel katmanda ve uygulama katmanındaki yapıyla birlikte çok az güç tüketimi ile haberleşmeler mümkündür [1].

Güvenlik; Bluetooth servisinin popülerliği ve kullanım kolaylığı güvenlik risklerine karşı savunmasız hale getirmiştir. Bluetooth'un güvenlik özellikleri diğer haberleşme teknolojileri kadar kapsamlı değildir. Bluetooth Low Energy'nin (BLE) en ciddi güvenlik açığı geçici şifredir. Bir el sıkışma yakalandıktan sonra, aşağıdaki iletişim akışının şifresini çözmek önemsiz hale gelir. Altı basamaklı bir PIN, modern bir bilgisayarın geçici şifreyi zorlamasını engellemek için çok küçüktür. BLE küçük cihazlar için kullanışlı bir araçtır ancak kritik görev sistemlerinde veya hassas verilerle

kullanılmamalıdır [2]. Bluetooth SIG tarafından yayınlanan çeşitli versiyonlarda güvenlikle ilgili güncellemeler bulunmaktadır. Güvenlik sistemi hala geliştirilmektedir [3].

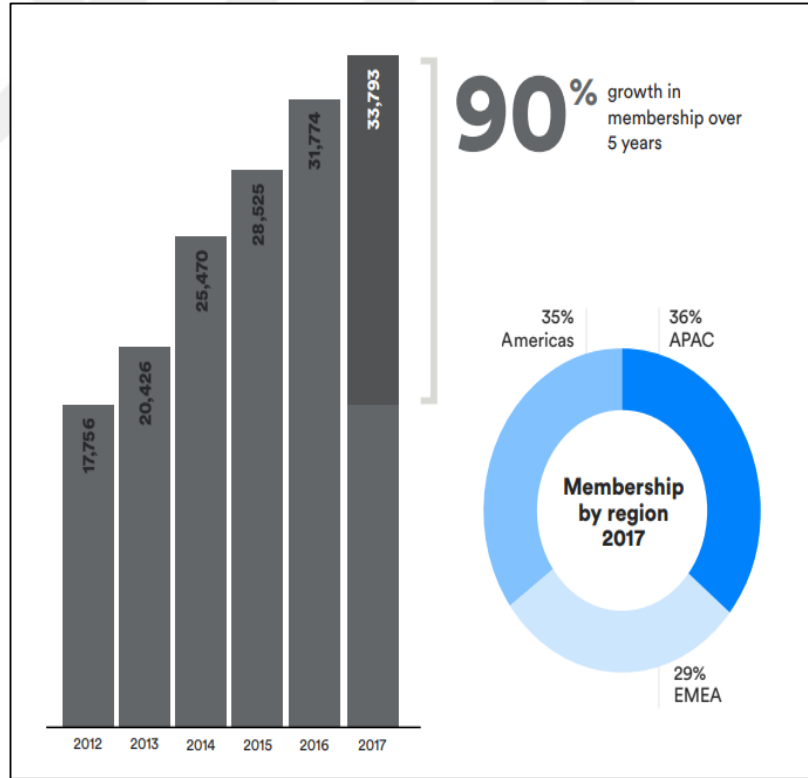
Bu tezde Bluetooth protokolünün incelenmesi tercih edilmiştir. Bunun başlıca nedenleri arasında IPv6 desteği, kısa mesafe de haberleşme yapabiliyor olması, düşük güç tüketimine sahip olması, akıllı telefon/tablet ve PC tarafında doğrudan bağlantı kurabiliyor olması gösterilebilir. Ayrıca mesh ağ desteği sunan protokoller arasında en güncel tarihli haberleşme protokolü Bluetooth 5.0'dır.

Bu tez kapsamında Bluetooth protokolü ayrıntılı olarak ele alınıp, Bluetooth 4.2 ile temelleri atılan Bluetooth 5 ile birlikte üst seviyelere ulaşan Bluetooth Mesh ağ yapısı incelenecek; mesafe ve enerji tüketimi açısından karşılaştırılacaktır. Bu yeni ağ yapısının teknolojiye kattıkları ve uygulama alanları irdelenecektir.

Tez kapsamında 1. Bölümde Bluetooth protokolünün çeşitli versiyonları hakkında bilgi verilmiştir. 2. Bölümde cihazların birbirleri ile haberleşmede kullandığı başlıca ağ yapıları hakkında kısa bilgi verilmiş ve daha sonra Bluetooth üzerinde mesh ağının çalışması ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. 3. bölümde deneylerin yapıldığı sistemler ve ortam anlatılmıştır. Son bölümde ise deneylerin sonuçlarından bahsedilmiş ve bu sonuçlar yorumlanarak bir çıkarımda bulunulmuştur.

1. BLUETOOTH NEDİR?

Bluetooth 1994 yılından itibaren Ericson firmasının öncülüğünde geliştirilmeye başlanan mobil haberleşme teknolojilerinden birisi olarak piyasaya çıkmıştır. 1998 yılının Şubat ayında ise Bluetooth teknolojisini standartlaştırmak, bir firmanın tek başına geliştirmesini engellemek ve tüm cihazlar ile uyumlu çalışmasını sağlamak amacı ile Special Interest Group (SIG) kurulmuştur. SIG çatısı altında 3Com, Ericsson, IBM, Intel, Lucent, Microsoft, Motorola, Nokia ve Toshiba gibi öncü firmaların yanı sıra binlerce irili ufaklı üye firma da yer almaktadır. Üye firma sayısı 2017 itibari ile 33 binin üzerine çıkmıştır. Türkiye’den ise Arçelik firması bu gruba üyedir. Şekil 1.1’de son 5 yılın Bluetooth SIG üye sayıları gösterilmiştir [4].

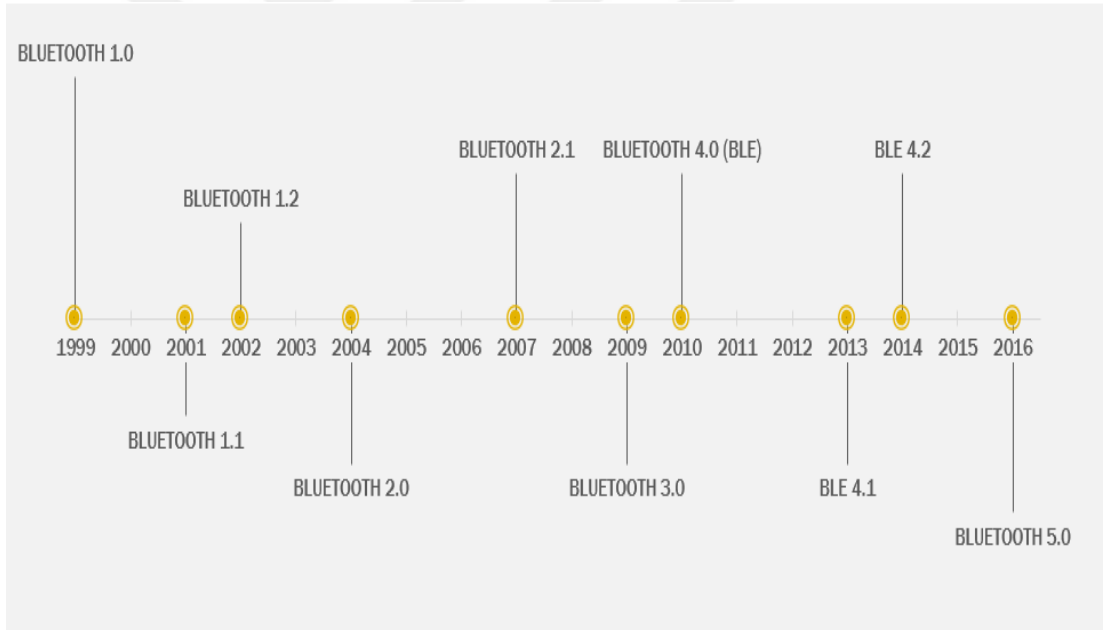


Şekil 1.1. Bluetooth üye firma sayıları [4]

15 ayrı grup 70 farklı spesifikasyon projesi ile çalışmaktadır. 2017 yılında 11 yeni özellik yayınlanmıştır. Yani Bluetooth günümüzde gelişmesini hala devam ettiren bir haberleşme protokolüdür [4].

1.1. Bluetooth Tarihçesi

Yapılan çalışmaların neticesinde 1999 Temmuz ayında ilk Bluetooth spesifikasyonu çıkarıldı. SIG'nin önemli çalışmaları arasında bu spesifikasyonun geliştirilmesi yer almaktadır. Bluetooth 1.1 ve 1.2 birer yıl ara ile 2002 ve 2003 yılında yayınlanmıştır. 2004 yılında Bluetooth 2.0 yayınlanmış ve uzun süre kullanılmıştır. Günümüzde hala bazı cihazlar bunu kullanmaktadır. Özellikle Bluetooth kulaklık teknolojisi Bluetooth 2.0 desteği sunmaktadır. 2009 yılında Bluetooth 3.0 duyurulmuş ancak ömrü çok uzun olmamıştır. 2010 yılına gelindiğinde Bluetooth teknolojisinin IoT sektörüne girişini sağlayan çok düşük güç tüketimi versiyonu Bluetooth Low Energy (BLE) ismi ile duyurulmuştur. 2013 yılında BLE 4.1 2014 yılında BLE 4.2 tanıtılmış, 2016 yılında ise büyük çaplı değişiklikler içeren Bluetooth 5.0 duyurulmuştur [5]. Şekil 1.2'de versiyonların yayınlanma tarihleri gösterilmiştir.

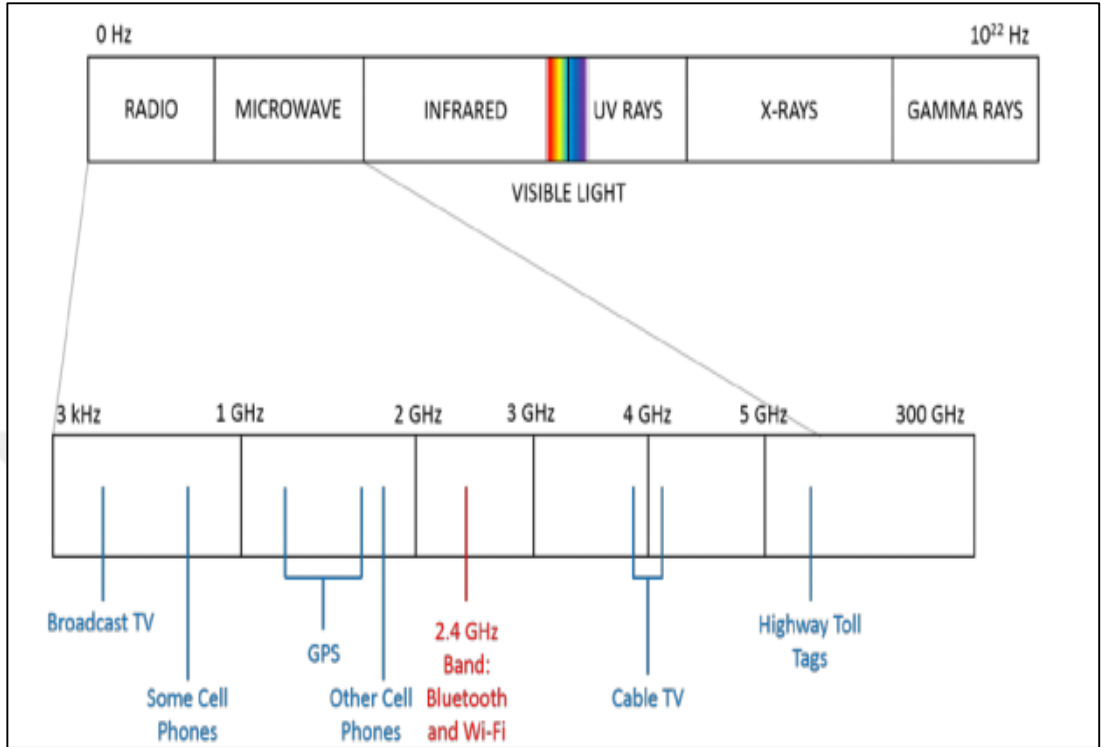


Şekil 1.2. Bluetooth versiyon yayın tarihçesi

1.2. Bluetooth Teknolojisi

Bluetooth cep telefonlarından tıbbi cihazlara, bilgisayarlara ve müzik sistemlerine kadar birçok alanda kullanılan kablosuz haberleşme standardıdır. Bluetooth teknolojisi lisanssız ISM (Industrial, Scientific and Medical) bandını kullanarak haberleşme yapar. Bluetooth'un kullandığı ISM bandı 2.4 GHz ile 2.4835 GHz arasındaki

frekanslara denk gelmektedir. Şekil 1.3’de Bluetooth tarafından kullanılan frekans spektrumu gösterilmektedir.

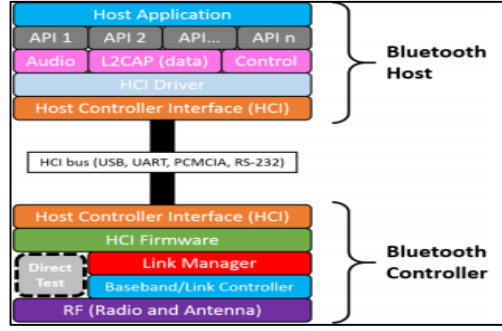


Şekil 1.3. Frekans bandının kullanımı [6]

Bluetooth SIG 1999 yılından itibaren günümüze kadar birçok versiyon yayınladı. Bu versiyonlar bazı yeni özellikler eklerken Bluetooth teknolojisinin daha ileriye gitmesini sağlamıştır. Ancak 2010 yılında yayınlanan Bluetooth 4 diğer ismi ile Bluetooth Low Energy (BLE) eski versiyonlarından farklı bir seviyededir. Bu yeni versiyon sürekli veri gönderme prensibinden farklı olarak periyodik veri gönderme ve düşük enerji tüketme amacı ile tanıtılmıştır. Bluetooth 4 öncesi yüksek kaliteli ses ve veri aktarmak için geliştirilmişken Bluetooth 4 ve sonrası daha az enerji tüketme ve uzun süre çalışma amacı ile geliştirilmiştir. Bluetooth 4 ve sonrasındaki versiyonlarla birlikte Bluetooth sensör ağlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu sebeple Bluetooth teknolojilerini incelerken BLE öncesi ve BLE sonrasında tanıtılan versiyonlar olarak ayrılmıştır [6].

1.2.1. Bluetooth 4 öncesi

Bluetooth sistemi temelde 2 ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 1.4’de bu bileşenler gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Bluetooth katmanları [6]

Bu iki bileşenin altında da birçok alt bileşen bulunmaktadır. Controller kısmı üretici firmalar tarafından geliştirilirken host kısmında uygulama katmanı kullanıcılar tarafından geliştirilmektedir. Bluetooth klasik versiyonların temel özellikleri Tablo 1.1’de gösterilmiştir [6].

Tablo 1.1. Bluetooth klasik temel özellikleri [6]

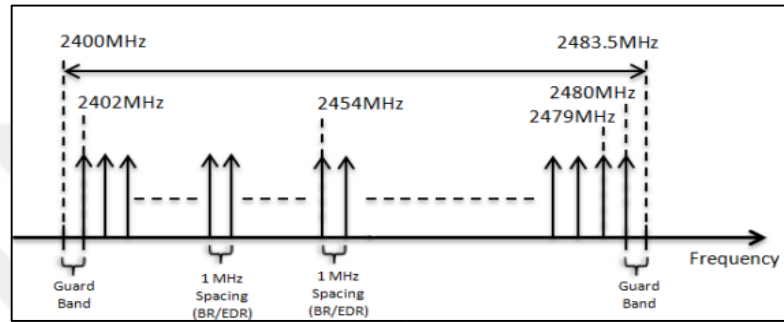
Yıl	Bluetooth versiyonu	Veri gönderme hızı	Modülasyon tipi	Not
1999	V1.0	1 Mb/s	GFSK	<ul style="list-style-type: none"> Yayınlanan ilk versiyondur
2003	V1.2	1 Mb/s	GFSK	<ul style="list-style-type: none"> İlk FDA onaylı tıbbi Bluetooth sistemi. Haftada 1 milyon adet satış miktarına çıkıldı.
2004	V2.0 + EDR	1 Mb/s 2 Mb/s 3 Mb/s	GFSK $\pi/4$ -DQPSK 8-DPSK	<ul style="list-style-type: none"> Daha hızlı veri aktarımı için arttırılmış paket hızı (EDR) eklendi. Haftada 3 milyon adet satış miktarına çıkıldı.
2007	V2.1 + EDR	1 Mb/s 2 Mb/s 3 Mb/s	GFSK $\pi/4$ -DQPSK 8-DPSK	<ul style="list-style-type: none"> Bluetooth cihazları için basitleştirilmiş eşleştirme sistemi tanıtımı (secure simple pairing)
2009	V3.0 + HS	1 Mb/s 2 Mb/s 3 Mb/s	GFSK $\pi/4$ -DQPSK 8-DPSK	<ul style="list-style-type: none"> Alternatif MAC/ PHY tanıtımı ve IEEE 802.11 in 24 Mbit/s hızı destekleyecek şekilde eklenmesi.

1.2.1.1. Bluetooth fiziksel katman

Bu bölümde Bluetooth haberleşmesinin fiziksel katman üzerindeki temel yapısı anlatılacaktır. Fiziksel katmanda inceleyeceğimiz temel konular;

Çalışma frekansı; ISM bandını kullanan Bluetooth teknolojisi Bluetooth 4'ten önceki versiyonlarda 1 MHz bant genişliğine sahip 79 kanal kullanıyor. Kanalların frekans bandında yerleşimi Şekil 1.5'de gösterilmiştir.

Modülasyon; Bluetooth protokolü haberleşmede 3 farklı modülasyon tipi kullanmaktadır. 1 Mb/s ile haberleştiği durumlarda GFSK modülasyon tipi, 2 Mb/s haberleştiği durumlarda $\pi/4$ -DQPSK, 3Mb/s haberleştiği durumlarda ise 8-DPSK modülasyon türünü kullanmaktadır [6].



Şekil 1.5. Bluetooth frekans bandı [6]

Frekans atlama; Bluetooth dar bant haberleşmede frekansın parazitlenmesi veya sinyal karışması durumuna çözüm olarak frekans atlamalı spektrum yayma (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS) diye adlandırılan bir yapı kullanmaktadır. Frekans atlamaları 1600/s hızında gerçekleştirilir. Frekans atlamaları için tüm frekanslar kullanılır durumdadır. Frekans atlama işlemi aktif bağlantı sırasında hem verici hem de alıcı cihazın master cihaz içindeki saate ve Bluetooth adresindeki belirli alanlara bağlı olan bir algoritma ile gerçekleştirilir.

TX gücü; Bluetooth protokolü 3 ana güç sınıfına bölünmüştür. Bu sınıflar Tablo 1.2'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. TX Güçleri [3]

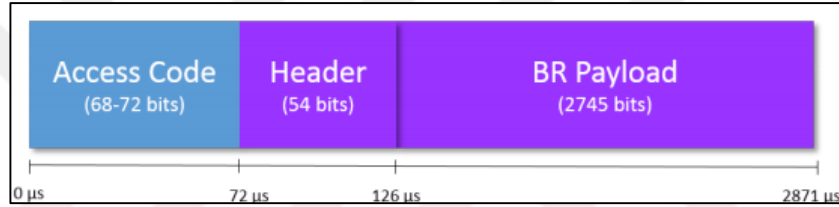
Güç sınıfı	Maksimum çıkış gücü	Minimum Çıkış gücü	Mesafe
1	100 mW(20dBm)	1 mW (0 dBm)	100 m
2	2.5 mW(4 dBm)	0.25 mW (-6 dBm)	10 m
3	1 mW (0 dBm)	N/A	1 m

RX hassaslığı; Alıcı tarafın hassaslığı Bluetooth türüne göre değişiklik göstermektedir. Basic rate (BR) sistemler için (Bluetooth 1.0 ve 1.2) -70 dBm ve daha yüksek güçlerde

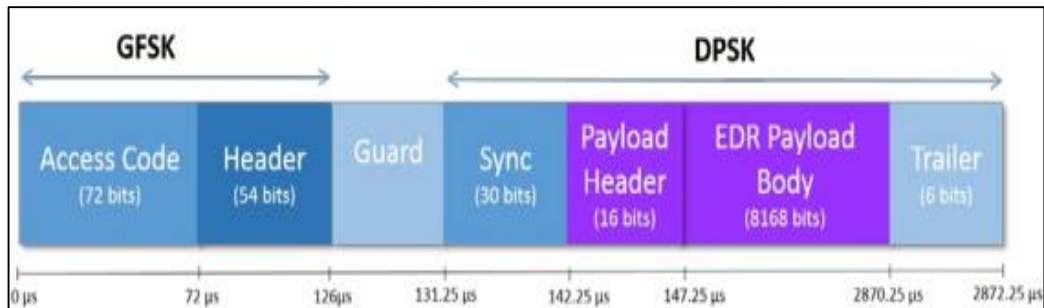
bit hata oranı (BER) % 0,1 olarak tanımlanmıştır. Enhanced Data Rate (EDR) sistemler (Bluetooth 2.0, 2.1 ve 3.0) için ise aynı koşullarda hata oranı (BER) %0,01 olarak tanımlanmıştır. En kötü şartlarda ise Bluetooth BR sisteminin hata oranı olan %0,1'dir. EDR sistemlerde modülasyon tipinin değiştirilmiş olması hata oranını azaltmaktadır [6].

1.2.1.2. Haberleşme paket yapısı

Bluetooth v1 ve v1.2'de farklı, v2, v2.1 ve v3'te farklı haberleşme paket yapısı kullanmaktadır. Şekil 1.6'da Bluetooth v1 ve v1.2'nin haberleşme paket yapısı Şekil 1.7 de ise Bluetooth v2.0, v2.1 ve v3.0'ın haberleşme paket yapısı ve harcanan zaman gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Bluetooth BR haberleşme paketi [6]



Şekil 1.7. Bluetooth EDR haberleşme paketi [6]

1.2.2. Bluetooth 4 (BLE)

Bluetooth 4.0 (BLE) protokolü düşük enerjili Bluetooth teknolojisinin ilk versiyonudur. 2010 yılında standart yayını yapılmıştır. BLE ile birlikte düşük güç tüketimi ve uzun pil ömrü konuşulmaya başlanmış ve uzun süreli şarj gerektirmeyen sensör kartlarının temeli atılmıştır.

BLE sistemlerin temel çalışma yapısı Şekil 1.8'de gösterilmiştir.

- Bekleme (Standby)

- Tanıtım (Advertising)
- Tarama (Scanning)
- Başlatma (Initiating)
- Bağlantı (Connection)'dır.

Bekleme: Veri paketi alma ve gönderme aktif değildir.

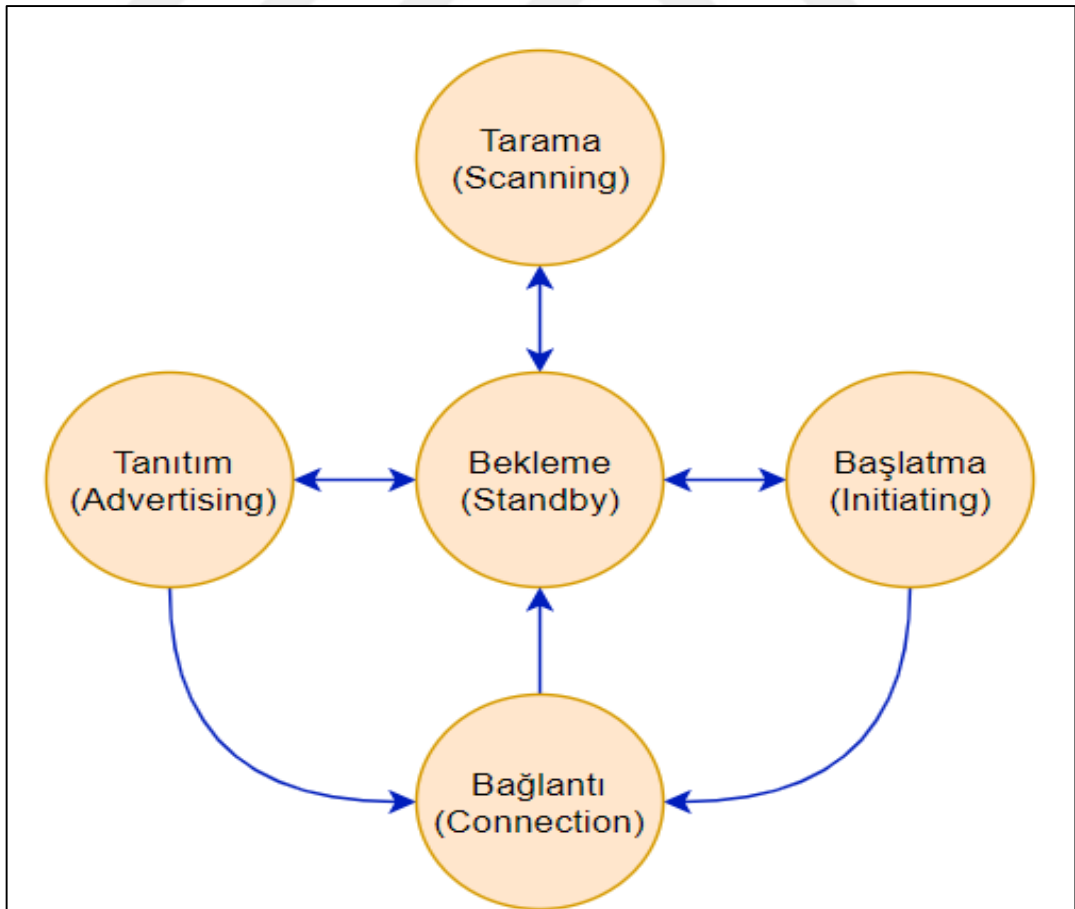
Tanıtım: 37, 38,39 numaralı kanallardan herkese açık mesajlar gönderilir.

Tarama: Tanıtım kanalındaki diğer cihazlardan gelen mesajları alınır.

Başlatma: bağlantı kurulma aşamasıdır.

Bağlantı: Ana düğüm ya da bağımlı düğüm modlarında iletişimi kurulur.

Veri iletimi için bağlantı kurulması gerekmeden tanıtım mesajlarının içeriğinde de bilgi aktarılabilir. Her bağlantı türünden bekleme moduna geçilebilir, bekleme modundan cihazın ana ya da bağımlı rolüne göre başlatma ya da tanıtım modundan bağlantı moduna geçilebilir [7].



Şekil 1.8. BLE çalışma yapısı [7]

UUID Yapısı; UUID evrensel olarak özel kalacak ve her yerde aynı olacağı garantilenmiş tanımlayıcıdır. Bluetooth 4.0 ile birlikte hayatımıza giriş yapmıştır. 128 bitlik bir sayı dizisidir.

Çalışma frekansı; Bluetooth klasik ile aynı frekans bandını kullanmaktadır. Ancak 2 MHz bant genişliğine sahip 39 kanala sahiptir. Kanalların dağılımı ve kullanım türleri Tablo 1.3'de gösterilmiştir.

Tablo 1.3. Bluetooth 4.2 Frekans Tablosu [8]

RF Kanal	RF Merkez Frekansı	Kanal Numarası	Kanal Türü		
			Veri	Öncül yayın	İkincil yayın
0	2402	37		•	
1	2404	0	•		•
2	2406	1	•		•
...
11	2424	10	•		•
12	2426	38		•	
13	2428	11	•		•
14	2430	12	•		•
...
38	2478	36	•		•
39	2480	39		•	

Bluetooth 4'te haberleşmenin verimli olması ve BER oranının düşük olması için fiziksel katmanda kullanılan frekansın hata payı ± 50 kHz arasında olması gerekmektedir. Bundan daha yüksek frekans kaymalarında sistem kararsızlaşmaya ve hata oranını arttırmaya başlamaktadır. Bu limitler Tablo 1.4'de verilmiştir [8].

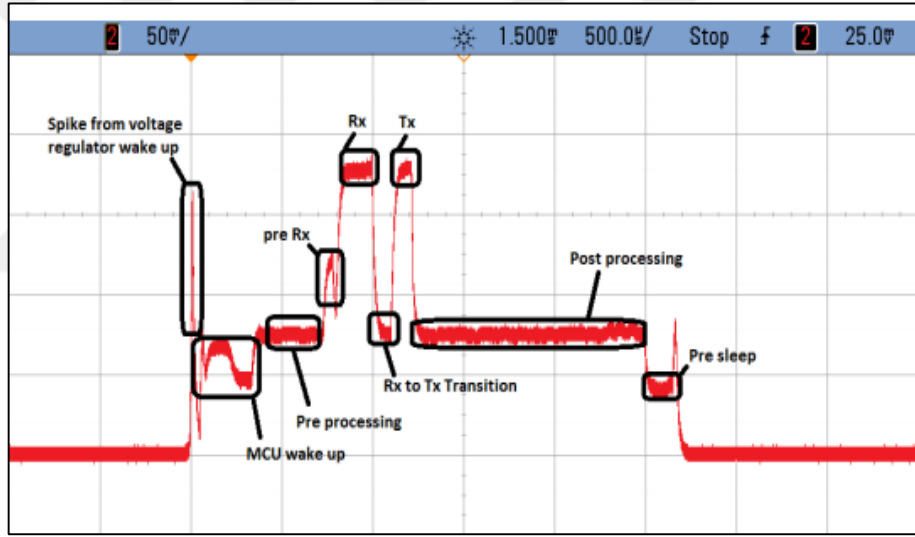
Tablo 1.4. Kanal frekans limitleri [8]

Parametre	Frekans kayması
Maksimum kayma	± 50 kHz
Maksimum kayma hızı	400 Hz/ μ s

Modülasyon; BLE GFSK modülasyon tipini kullanmaktadır. Bluetooth klasikte ilk kullanılan modülasyon yöntemidir. Bu modülasyon tipinde "0" için farklı frekans "1" için farklı frekans kullanılmaktadır. Her bit bir sembol ile gösterilmektedir.

Frekans atlama; BLE Bluetooth klasikteki frekans atlama algoritmasının aynısını kullanmaktadır.

TX gücü; BLE daha önceki versiyonlara göre düşük güç tüketimine sahiptir. Bu versiyonda gücün düşmesini sağlayan değişiklik fiziksel katmanda değil link layer dediğimiz katmanda yapılmıştır. Önceki versiyonlara göre bağlanma süresi 20 ms'den 2,5 ms'ye mesajın 2 cihaz arasında ki iletme süresi (latency) ise 100 ms'den 3 ms'ye düşürülmüştür. Veri gönderme işlemi periyodik olarak değil paket gönderme şeklinde değiştirilmiştir. Bu değişikliklerden sonra Bluetooth sürekli bağlı kalan cihaz olarak değil bağlan, veri gönder, uykuya geç döngüsünü yöneten bir sistem haline gelmiştir. BLE sisteminin bir paket gönderme esnasındaki aşamaları ve akımları Şekil 1.9'da gösterilmiştir [9].



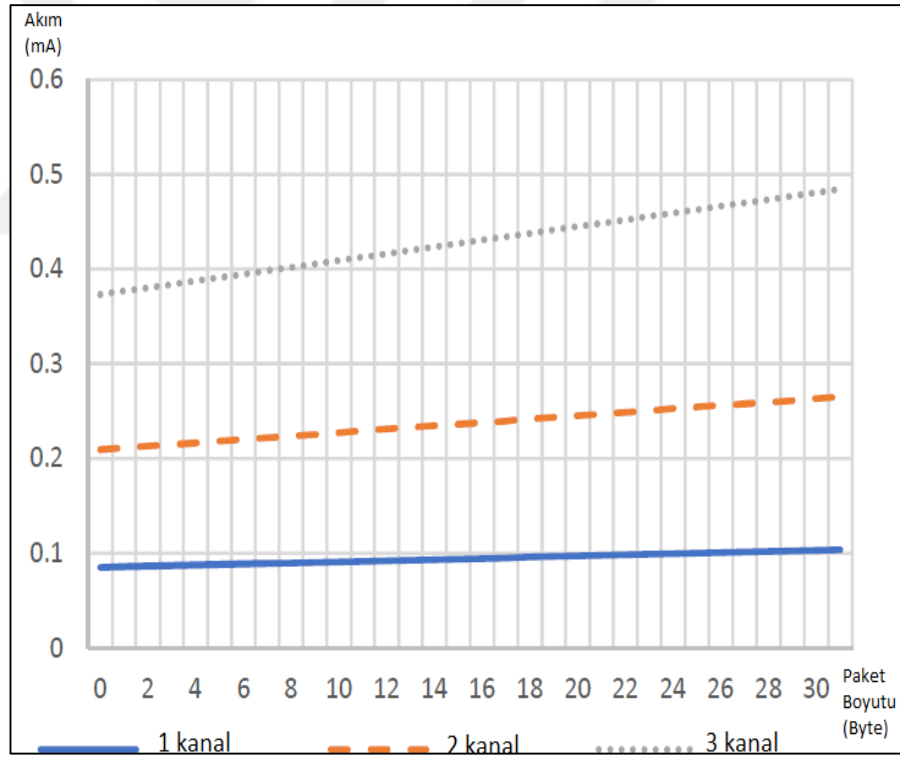
Şekil 1.9. Veri gönderimi sırasında akım grafiği [9]

BLE sisteminin bağlantı kurup bir veya daha fazla veri gönderme işlemi esnasında harcadığı akımları ve süreleri Tablo 1.5'de gösterilmiştir. Şekil 1.10'da ise bir paketdeki byte sayısının ve tanıtım yayını yapılan kanal sayısının sistemin tükettiği akım değerine etkisi gösterilmiştir [10].

BLE ile birlikte sistemin ayağa kalkması ve veri göndermeye başlaması hızlanmıştır. Bu özellikle birlikte bir paket veri gönderme işlemi için gerekli olan güç miktarı düşürülmüştür. BLE sistemi ile oluşturulan sensör kartları sürekli veri göndermek yerine saniyede, dakikada veya saatte 1 kere veri gönderecek şekilde ayarlandığında uzun süreler pil değişimine ihtiyaç duymadan işlevini yerine getirebilecektir.

Tablo 1.5. Güç- aşama tablosu [10]

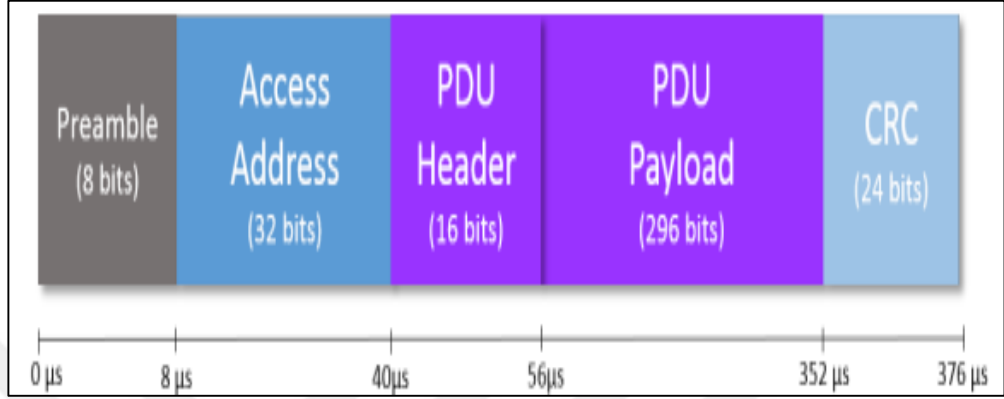
Aşama	Durum	Zaman (μ s)	Akım (mA)
1	preprocessing	1165	3,22
2	radio preparation	132	3,99
3	RX	129	6,48
4	RX-TX	149	5,49
5	TX	(10+L- data)*8	7,66
6	TX-RX	149	5,49
7	RX	129	6,48
8	RX-TX	149	5,49
9	TX	(10+L- data)*8	7,66
10	Post processing	775	2,59



Şekil 1.10. Paket uzunluğuna bağlı akım grafiği [10]

RX hassaslığı; RX hassasiyeti olarak Bluetooth LE %0,1 BER koşulunu kabul etmiş ve bu seviyede çalışmaktadır. Bluetooth klasiklerde ise 2 farklı seviyede BER kabulü vardı. İlk versiyonlarda %0,1 hata oranına sahipken Bluetooth 2'den itibaren %0,01 seviyesinde hata oranına sahiptir.

Paket yapısı; Bluetooth 4.0 ile birlikte paket yapısında ciddi bir değişikliğe gidilmiş ve paket içerisindeki veri gönderme kısmı ciddi şekilde azaltılmıştır. Bluetooth 4.0'da bir paket içerisinde en fazla 27 byte veri gönderilebilmektedir. Şekil 1.11'de BLE paket yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.11. BLE paket yapısı [6]

1.2.3. BLE 4.1'nin farkları

BLE 4.1 temelde BLE 4.0 ile aynı özelliklere sahip. Burada kısmi iyileştirmeler ve daha performanslı çalışmasını sağlayan düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemelerin başlıcaları;

- BR/EDR güvenli bağlantı kurabilme
- Düşük güçlü direk yayın yapma özelliği eklendi.
- Düşük güçte 32-bit UUID desteği eklendi.
- Düşük güç çift mod (LE Dual Mode) topolojisi desteği eklendi.
- Piconet bağlantıda saat senkronizasyonu eklendi.
- Düşük güç gizlilik (LE Privacy) v1.1 yayınlandı.
- LE Link Layer topolojisi güncellendi.
- LE Ping desteği eklendi.

Bluetooth 4.1 ile Bluetooth 4.0 paket yapısı olarak aynı sistemi kullanmaktadır.

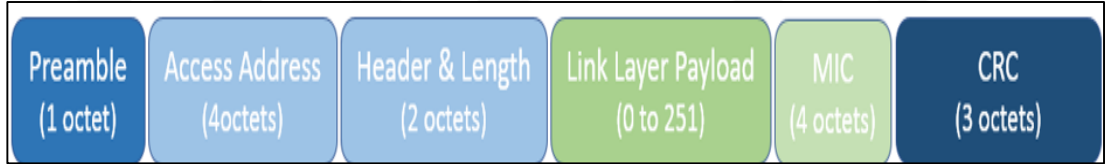
UUID Bluetooth 4.0 da 128 bitlik bir sayıdan oluşmaktadır. Bluetooth 4.1 ile birlikte 32 bitlik sisteme geçilmiştir. Önceden tanımlanmış olan formüllerle 32 bitlik UUID'yi 128 bitlik UUID ye çevirmek mümkündür [6].

1.2.4. BLE 4.2'nin farkları

- LE veri paket boyutu artırıldı
- LE güvenli bağlantı eklendi.
- Bağlantı katmanı güvenliğinde düzenleme yapıldı
- Bağlantı katmanında tarama algoritmasında düzenleme yapıldı.
- Düşük güçte 16-bit UUID desteği
- LE IP (IPv6/6LoWPAN)
- Bluetooth Smart Internet Gateways (GATT)

Bluetooth 4.2 ile birlikte bir paketdeki veri boyutunda ciddi bir değişiklik yapılmış ve tek pakette daha fazla veri gönderme imkânı getirilmiştir. Güncellenen paket yapısı Şekil 1.12'de gösterilmiştir.

Bluetooth 4.1 de 32 bit olarak düzenlenen UUID Bluetooth 4.2 de 16 bit olarak güncellenmiştir. 16 bitlik UUID formüllerle 32 bit ve 128 bit sayıya dönüştürülebilmektedir.



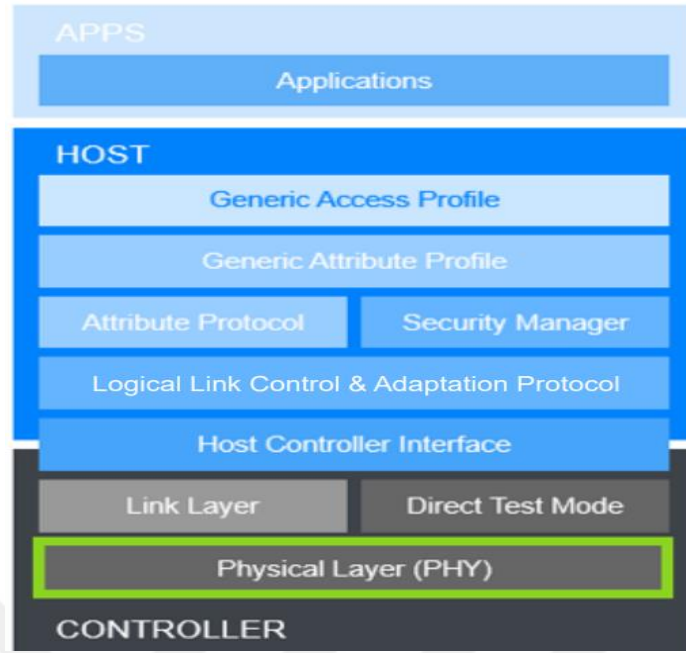
Şekil 1.12. BLE 4.2 paket yapısı [11]

1.2.5. Bluetooth 5

Bluetooth 5 temelde BLE ile aynı yapıya ve amaca sahip olsa da büyük farklılıkları mevcuttur. Bu farklılıkları ana başlık altında özetlemek istersek şunlardır.

- 2× hız
- 4× mesafe
- 8× yayın kapasitesi

Bu farklılıklar Bluetooth 5.0'ı IoT için daha önemli hale getirmiştir. Bluetooth 5 protokol mimarisi olarak BLE ile aynı yapıya sahiptir BLE ve Bluetooth 5'in protokol mimarisi Şekil 1.13'de gösterilmiştir. Ancak mesafe, hız ve yayın kapasitesini arttırabilmek için PHY katmanında değişiklikler yapılmıştır [12].



Şekil 1.13. Bluetooth 5 Protokol katmanları [12]

Fiziksel katman; Bluetooth full stack protokol olarak tanımlanmaktadır. Yani tüm katmanlar kendine ait olan bir haberleşme protokolüdür. Bluetooth 5 ile fiziksel katmana 2 adet yeni tanım eklenmiştir. Her tanım kendine özgü özellikleri desteklemektedir. Bu üç fiziksel katmanın isimleri LE 1M, LE 2M, LE Coded'dır [12].

LE 1M; Bluetooth 4 de kullanılmaktadır. GFSK modülasyon yapısını kullanmakta ve 1 Ms/S oranına sahiptir. Eski versiyonlara bağlanmak için Bluetooth 5 de bu fiziksel katmana destek vermek zorundadır. LE 1M ve LE 2M katmanının paket yapısı Şekil 1.14'de gösterilmiştir.

LSB		MSB	
Preamble (1 or 2 octets)	Access Address (4 octets)	PDU (2 to 257 octets)	CRC (3 octets)

Şekil 1.14. LE 1M- LE 2M paket yapısı [12]

LE 2M; Yeni fiziksel katman tanımı ile birlikte Bluetooth 5'in veri aktarma kapasitesini 2 katına çıkarmıştır. LE 2M ve LE 1M aynı iletim gücünü kullanmaktadır. Aralarındaki tek fark modülasyon yapısındadır. LE 2M LE 1M den farklı olarak modülasyon yapısında 185 kHz değil 370 kHz frekans farkı kullanmaktadır. Tablo 1.6'da iki fiziksel katman arasındaki farklar gösterilmektedir.

Tablo 1.6. Bluetooth 5 LE 1M ve LE 2M karşılaştırması

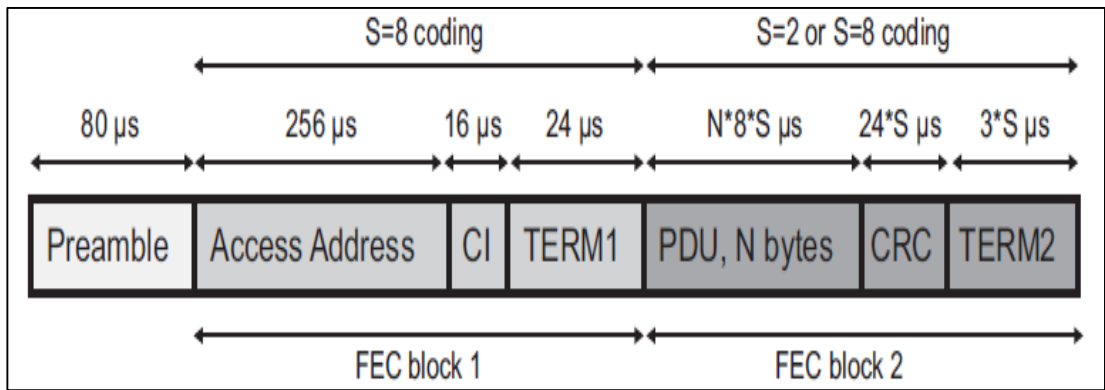
Parametre	Karşılaştırma
Güç tüketimi	Aynı iletim gücü kullanılarak daha fazla veri aktarıldığı için enerji tüketimi azalmıştır.
Veri miktarı	LE 2M PHY, LE 1M PHY'den veri iletmek için 2 kat daha hızlıdır.
Alıcı hassaslığı	Veri miktarı arttığı için LE 1M e göre daha düşük hassasiyete sahiptir
Aktarım gücü	Çıkış gücü her iki PHY için de aynıdır.

LE CODED; LE Coded fiziksel katman yapısı LE 1M ve LE 2M fiziksel katmana göre daha yüksek hassasiyetle veri aktarılmasını sağlar. Bu sayede mesafe artarken veri aktarma miktarı azalır.

LE Kodlu PHY iki veri hızında çalıştırılabilir:

S2: LE Kodlu S = 2 modunda, her bit iki sembol ile temsil edilir. Böylece, veri hızı 500kbps'dir. Bu modda, LE 1M PHY'ye kıyasla aralık kabaca iki katına çıkar.

S8: LE Kodlu S = 8'de her bit sekiz sembolle temsil edilir. Bu 125kbps veri hızı verir. Bu modda, LE 1M PHY'ye göre aralık kabaca dört katına çıkar. LE Coded katmanın paket yapısı Şekil 1.15'de gösterilmiştir [13].



Şekil 1.15. LE Coded Paket yapısı [8]

Bu paket yapısı ile birlikte bir defada aktarılacak veri miktarı düşmekte ve verinin gönderim süresi artmaktadır. Paketlerin iletilmesi 462 ile 17040 μs arasında sürer. Bununla ilgili karşılaştırma Tablo 1.7'de verilmiştir.

Tablo 1.7. S2 ve S8 zaman karşılaştırmaları [8]

	Preamble	Adres	CI	TERM1	PDU	CRC	TERM2
Kodlanmamış	80	32	2	3	16-2056	24	3
S=8 kodlanmış	80	256	16	24	128-16448	192	24
S=2 Kodlanmış	80	256	16	24	32-4112	48	6

Üç fiziksel katmanın ve farklı kodlama türlerinin karşılaştırması Tablo 1.8’de sunulmuştur.

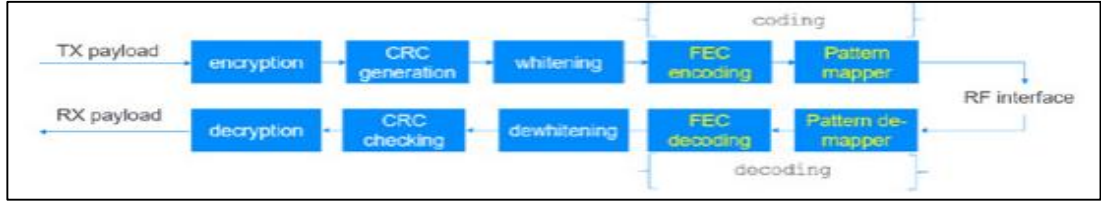
Tablo 1.8. Fiziksel katmanların özellik karşılaştırılması [8]

Parametre	LE 1M	LE Coded S=2	LE Coded S=8	LE 2M
Sembol sayısı	1Msps	1Msps	1Msps	2Msps
Veri miktarı	1Mbps	500kbps	125kbps	2Mbps
Hata doğrulama	Yok	FEC	FEC	Yok
Mesafe çarpanı	1	~2	~4	~0.8

Bluetooth 5’te çalışma mesafesi artırılması için modülasyon yapısındaki değişiklik tek başına etkili olmamıştır. Bunun yanında yapılan bir diğer değişiklik ise hata tespit ve düzeltme aşamasında olmuştur. Bluetooth 5 öncesi sadece hatalı paketler belirlenerek o paketler işleme alınmayacak şekilde bir yapı vardı. Bluetooth 5’te hata tespiti ve düzeltme işlemi eklenmiştir.

Hata tespiti; Hata tespitinde kullanılabilecek birçok yöntem vardır. Bluetooth bu yöntemlerden CRC (döngüsel artıklık yöntemi) olarak bilinen yöntemi kullanmaktadır. Her paketin sonunda 24 bitlik bir CRC verisi bulunmakta ve alıcı tarafta CRC tekrar hesaplanarak karşılaştırma yapılmaktadır. CRC uyuşmuyorsa alıcı taraf göndericiye cevap vermez ve gönderici veriyi tekrar gönderir. CRC kontrolü Bluetooth 4 ve Bluetooth 5 için ortaktır [14].

Hata Düzeltme; Gelişmiş hata düzeltme teknikleri kullanarak hataların düzeltilmesi, verinin daha düşük bir SNR’de ve dolayısıyla vericiden daha uzak bir mesafede doğru bir şekilde kodu çözülebilmesi büyük avantaja sahiptir. LE Kodlu PHY, hataları düzeltmek için “Forward Error Correction” (FEC) kullanır. Bluetooth sisteminin haberleşme akışı Şekil 1.16 ‘da gösterilmiştir [12].



Şekil 1.16. Bluetooth 5 Haberleşme Akış diyagramı [12]

FEC hata doğrulama sistemi 2 adet polinom hesabıyla çalışmaktadır. Bu polinomlar denklem (1.1) ve (1.2) deki gibidir.

$$G_0(x) = 1 + x + x^2 + x^3 \quad (1.1)$$

$$G_1(x) = 1 + x^2 + x^3 \quad (1.2)$$

LE Coded PHY katmanı hata düzeltme işleminde hamming kodlamadan türetilmiş bir algoritma kullanmaktadır. Bu hata düzeltme algoritması 1 bit için hata düzeltme işlemi yapabilmektedir. [15]

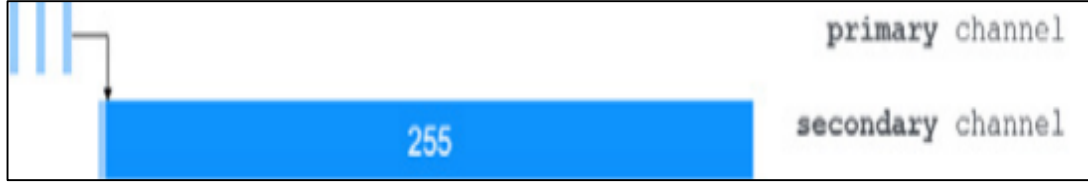
LE Coded yapı olarak $S = 2$ ve $S = 8$ olarak adlandırılan 2 farklı kodlama şeması seçeneğiyle kullanılabilir. Örüntü Eşleştiricisi, her biti evrişimli FEC kodlayıcısından P sembollerine dönüştürür, burada P değeri kullanılan kodlama şemasına bağlıdır. $S = 2$ ise, aslında, hiçbir değişiklik yoktur (yani $P = 1$), ancak $S = 8$ ise, FEC kodlayıcısının her biti, Desen Eşleştiriciden 4 çıkış biti (yani $P = 4$) üretir.

Tanıtım (Advertise); Bluetooth 5 ile birlikte değişen bir diğer özellik ise tanıtım yapısıdır. BLE bağlantı kurmadan yaptığı tanıtım yayınlarını sadece 37, 38 ve 39 numaralı kanallardan ve 37 byte uzunluğunda bir veri ile yapabilmekteydi. Bluetooth 5 ile birlikte ISM bandındaki bütün kanallardan tanıtım yayını yapabilir hale gelmiştir. 37, 38 ve 39 numaralı kanallar “primary” olarak diğer kanallar ise “secondary” olarak yayın amacıyla kullanılmaktadır. Bu kanalların frekans bandına yerleşimi Şekil 1.17’de gösterilmiştir [12].

Channel	Frequency	Channel	Frequency	Channel	Frequency
37	2402 MHz	38	2424 MHz	39	2446 MHz
0	2404 MHz	11	2428 MHz		
1	2406 MHz	12	2430 MHz		
2	2408 MHz	13	2432 MHz		
3	2410 MHz	14	2434 MHz		
4	2412 MHz	15	2436 MHz		
5	2414 MHz	16	2438 MHz		
6	2416 MHz	17	2440 MHz		
7	2418 MHz	18	2442 MHz		
8	2420 MHz	19	2444 MHz		
9	2422 MHz	20	2446 MHz		
		21	2448 MHz		
		22	2450 MHz		
		23	2452 MHz		
		24	2454 MHz		
		25	2456 MHz		
		26	2458 MHz		
		27	2460 MHz		
		28	2462 MHz		
		29	2464 MHz		
		30	2466 MHz		
		31	2468 MHz		
		32	2470 MHz		
		33	2472 MHz		
		34	2474 MHz		
		35	2476 MHz		
		36	2478 MHz		

Şekil 1.17. Bluetooth 5 frekans dağılımı [12]

Mesajların hangi kanaldan gönderileceği primary kanaldan belirtilerek asıl haberleşmenin secondary kanal üzerinden yapılması sağlanmıştır. Bu sayede paket uzunluğu 37 byte'dan 255 byte'a çıkarılmış ve bağlantı kurmadan (pairing yapmadan) doğrudan çoğa gönderim (broadcast) yaklaşımı ile görece daha büyük veriler gönderebilir hale gelmiştir. Bununla ilgili kanalların yerleşimi Şekil 1.18'de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Bluetooth 5 kanal ayrımı [12]

1.3. Bluetooth classics, bluetooth smart ready, bluetooth smart

Bluetooth 1999 yılından beri geliştirilmekte ve farklı versiyonları yayınlanmış bir protokol olarak güncelliği korumaktadır. Bu versiyonlar temel fonksiyonları açısından 3 ana başlık altında toplanabilir. Bluetooth klasik, BLE öncesini temsil etmektedir. Bu cihazların BLE ile uyumlu çalışıp çalışmama durumuna göre de smart ve smart ready etiketleri oluşturulmuştur. BLE versiyonlarında dual mode desteği sunan versiyonlar smart ready olarak adlandırılmaktadır. Bluetooth smart ready BLE 4.1 ile birlikte tanımlanmıştır. Tüm Bluetooth versiyonlarının kullanıldığı senaryoyu gösteren yapı Şekil 1.19'da gösterilmiştir.

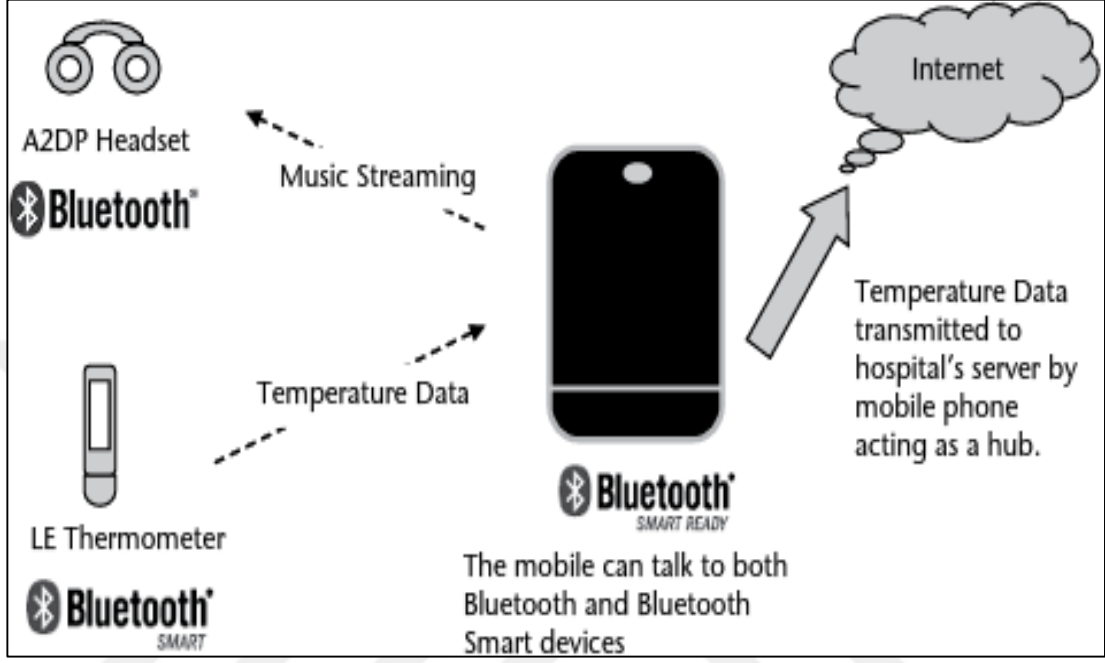
1.4. Privacy nedir?

Privacy (Gizlilik) Bluetooth SIG grubu tarafından tanımlanmış ve Bluetooth LE versiyonları ile birlikte Bluetooth çekirdeğinin içine gömülmüştür. Privacy sistemi 15 dakikada bir adres değiştirerek takip edilebilirliğini engellemektedir. Bunu yaparken;

- Device Address
- Resolving List
- Identity Address
- Resolvable Private Address
- Resolvable Private Address Only
- White List

yapılarından destek almaktadır.

Bluetooth “device privacy mode” ve “network privacy mode” olmak üzere 2 farklı privacy moduna sahiptir.



Şekil 1.19. Bluetooth - BLE smart - BLE smart ready örnek kullanımı [11]

Device privacy mode; Cihaz sadece kendi gizliliği ile ilgilenmektedir. Bunun anlamı cihaz sadece eşlendiği cihazdan belirlediği ID'lerdeki mesajları ve özel anahtarla eşleşen verileri alacaktır.

Network Privacy Mode; Her iki cihaz da Kimlik Çözümleme Anahtarlarını (IRK) dağıtırsa, yerel cihaz yalnızca eş aygıtın Çözülebilir Özel Adresinden gelen yayın / tarama / bağlantı paketlerini kabul eder. Bluetooth 5.0 ile birlikte eklenen bu özellik varsayılan mod olarak tanımlanmıştır [16].

1.5. Bluetooth 4.2 ve Bluetooth 5 Karşılaştırması

Bluetooth 5'in kullanıcıya etkisi olan 3 ana başlıkta Bluetooth 4.2'ye üstünlüğü bulunmaktadır. Bunlar; genellikle 2 kat hız, 4 kat mesafe ve 8 kat veri miktarı olarak ifade edilmektedir.

Bu farkları sağlayan fiziksel ve uygulama katmanındaki farklar ise Tablo 1.9'da gösterilmiştir.

Tablo 1.9. Bluetooth versiyonlarının karşılaştırılması

Özellik	BT BR/EDR/HS	BLE	Bluetooth 5
Frekans	2.4GHz ISM (2400MHz ~ 2483.5MHz)	2.4GHz ISM (2400MHz ~ 2483.5MHz)	2.4GHz ISM (2400MHz ~ 2483.5MHz)
RF Kanal	79 ($f=2402+k$ MHz, $k=0, \dots, 78$) 1MHz separation	40 ($f=2402+k*2$ MHz, $k=0, \dots, 39$) 2 MHz separation	40 ($f=2402+k*2$ MHz, $k=0, \dots, 39$) 2 MHz separation
Mesafe	10m~100m	10m~50m	100m~500m
Modülasyon	GFSK (BR) $\pi/4$ -DPSK, 8DPSK (EDR)	GFSK	GFSK
Modülasyon İndeks	0.28~0.35	0.5	0.495 - 0.505
Max TX gücü	+20 dBm (Class 1) +4 dBm (Class 2) 0 dBm (Class 3)	+10 dBm	+10 dBm
Sembol hızı	1 MS/s (BR) 2 MS/s $\pi/4$ -DPSK (EDR) 3MS/s 8DPSK (EDR)	1 MS/s	1 MS/s 2 MS/s
Uygulama hızı (Application Throughput)	0.7 – 2.1 Mbit/s	0.27 Mbit/s	0.6 Mbit/s
Çoklu erişim yöntemi	TDMA	TDMA / FDMA	TDMA / FDMA
Güvenlik	56-bit E0 (classic)/128-bit AES (AMP)	128-bit AES	128-bit AES
Bekleme	100 ms	3 ms	3 ms
Ses aktarabilme	Evet	Hayır	Hayır
Bağlantı süresi	20 ms	2,5 ms	2,5 ms
En yüksek akım	< 30mA	< 20mA	< 10mA

2. AĞ YAPILARI

Birbirleri ile haberleşme ihtiyacı duyan cihaz sayısı ve çeşitliliği arttıkça farklı modellerde ağ yapıları tanımlanmıştır. Bu ağ yapılarının her birinin avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. İlk alt bölümde ağ yapıları hakkında temel bilgiler verilecektir. İkinci alt bölümde ise Bluetooth mesh ağ yapısı hakkında ayrıntılı bilgilere yer verilecektir.

2.1. Klasik Ağ Yapıları

Klasik ağ yapılarını 7 alt başlık olarak incelenecektir bu ağ yapılarının avantajlarına ve dezavantajlarına yer verilecektir.

2.1.1. P2P bağlantı

Uçtan uca (P2P) sistemler genel olarak kablolu bağlantılar üzerinde dosya transferi, video gönderimi amaçlı kullanılır. Bunun dışında, bu tip ağların sağladığı altyapı, çevrimiçi oyunlarda, e-mail servislerinde, Bluetooth, Wi-Fi ya da 3G gibi protokollerde kullanılmaktadır [18]. P2P ağ modelinde cihazlar arasında herhangi bir aracı bulunmaz cihazlar sadece birbirleriyle iletişim halindedir. Bu modelin server-client mekanizmasına göre en büyük avantajı birden fazla cihazın tek bir server cihazına bağlanarak oluşturduğu trafiğe kıyasla P2P sisteminde daha az trafiğin oluşmasıdır. Çünkü bu yapıda cihazlar server üzerinden değil doğrudan birbirleriyle iletişim kurar. P2P bağlantı yapısı Şekil 2.1’de gösterilmiştir [17].

P2P topolojisinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- P2P topolojisinde cihazlar doğrudan birbirleriyle iletişim kurdukları için merkezi yönetim kurabilmek mümkün değildir.
- Yine aynı sebepten dolayı güvenlik zaafı oluşabilmektedir.
- Cihazlar kendi kaynaklarını diğer istemcilerle paylaşabildiği için desteklenebilecek cihaz sayısı da sınırlıdır.

- P2P sistemler kurulmuş bir alt yapının olmadığı sistemlerde kullanışlı olabilir, Ad Hoc sistemler gibi.



Şekil 2.1. P2P bağlantı

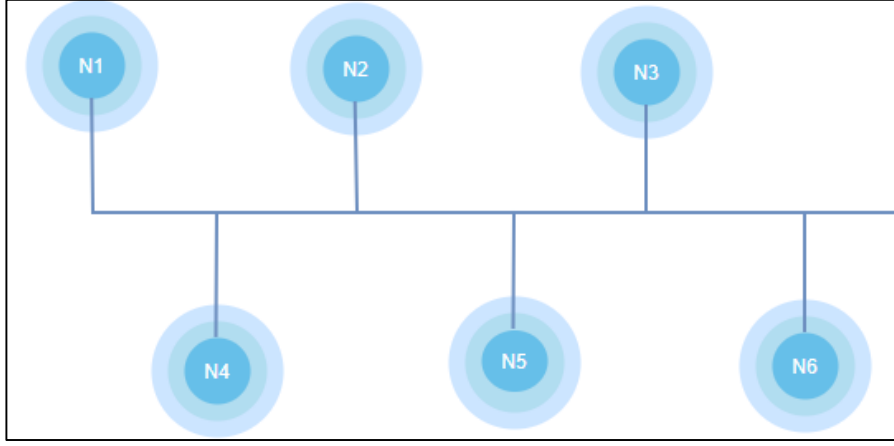
2.1.2. Bus bağlantı

Bus bağlantıda tüm cihazlar ortak bir doğrusal hatta bağlıdır. Her cihazın adı is node (Düğüm) olarak nitelendirilir. Bu doğrusal hattın literatürdeki adı omurga (backbone) veya trunk'dır. Genel olarak Bus topolojisinde mesaj tüm Node cihazlar tarafından alınır. Node'lar mesajın kendilerine yollanıp yollanılmadığını kontrol eder ve mesaj kendilerine gelmiş ise buna göre cevap verir. bus bağlantı hattı sonlandırıcı (terminator) ile sonlandırılır. Aksi takdirde mesajın hatta geri yansması gereksiz trafiğe yol açabilmektedir.

Yol topolojisinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yol topolojisi, kurulum maliyetleri bakımından avantajlıdır.
- Ayrıca çok kolay genişleyebilen bir topolojidir.
- Ancak hattaki cihaz sayısının artması haberleşme performansını düşmesine neden olabilir. Bunun sebebi hattaki cihazların herhangi bir zamanda veri yollayabilmesi ve cihaz sayısı arttıkça veri yollarken oluşabilecek çarpışma (collision) ihtimalinin de yükselmesidir. Bu tür çakışmaların engellemek için genellikle Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection (CSMA/CD) gibi bir erişim kontrol protokolü kullanılır.
- Öte yandan Yol topolojisinde bütün cihazlar tek bir hatta bağlı oldukları için oluşabilecek olası bir arıza durumunun kaynağı bulmakta güçleşmektedir.
- Ana hatta arıza oluşması durumunda bütün ağ bundan etkilenmektedir ve haberleşme durabilmektedir. Bu da önemli bir dezavantajdır. [

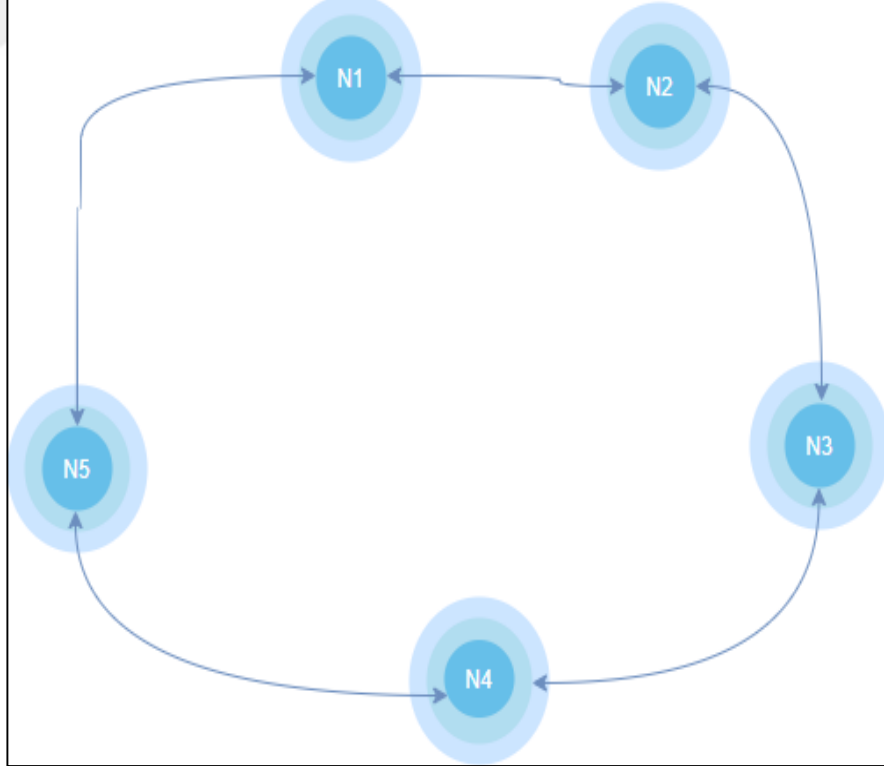
Bus bağlantı yapısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir [17].



Şekil 2.2. Bus bağlantı

2.1.3. Halka bağlantı

Halka bağlantı topolojisinde cihazlar birbirlerine bağlanarak bir döngü oluşturmaktadır. Bu bağlantı tipinde her cihaz 2 cihazla bağlantı kurabilir ve sonuç olarak ağdaki tüm cihazlar birbirine bağlanmış olur. Gönderilecek veri hedefe ulaşana kadar bir düğümden diğerine aktarılır. Bu bağlantı yapısı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Halka bağlantı

Halka topolojisinin avantajları aşağıdaki gibi listelenebilir.

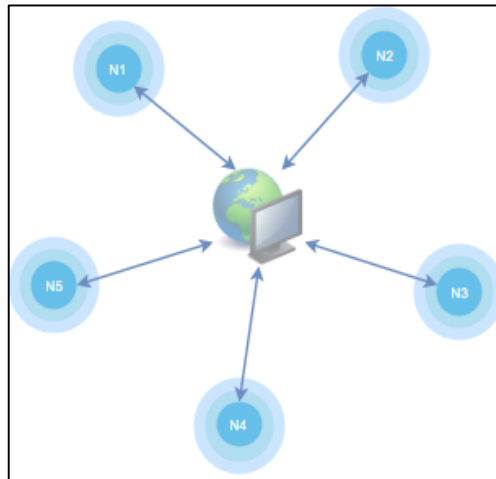
- Tüm veriler bir yönde akar ve paket çarpışma ihtimalini azaltır.
- Her iş istasyonu arasındaki ağ bağlantısını kontrol etmek için bir ağ sunucusuna gerek yoktur.
- Veri iş istasyonları arasında yüksek hızlarda transfer edebilir.
- Ağın performansını etkilemeden ek iş istasyonları eklenebilir.

Halka topolojisinin dezavantajları ise

- Ağ üzerinden aktarılan tüm veriler ağdaki her iş istasyonundan geçmelidir. Bu nedenle yıldız topolojisinden daha yavaş çalışır.
- Bir iş istasyonu kapanırsa tüm ağ etkilenir.
- Her bir iş istasyonunu ağa bağlamak için gereken donanım Ethernet kartlarından ve hub'larından / anahtarlarından daha pahalıdır [18].

2.1.4. Yıldız bağlantı

Yıldız bağlantı topolojisinde, her Node birbirinden bağımsız olarak, merkezi bir Switch veya Hub işlevine sahip bir cihaza bağlanarak haberleşmesi yapar. Veri hedefe ulaşabilmek için bu cihazdan geçer. Ağın tüm fonksiyonlarını bu Switch veya Hub cihaz gerçekleştirir. Şekil 2.4'te örnek bir yıldız bağlantı gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Yıldız bağlantı

Yıldız topolojisinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Ağa yeni cihaz eklenmesi kolaydır.
- Merkezi bir birim olduğunda ötürü yönetimi kolaydır.

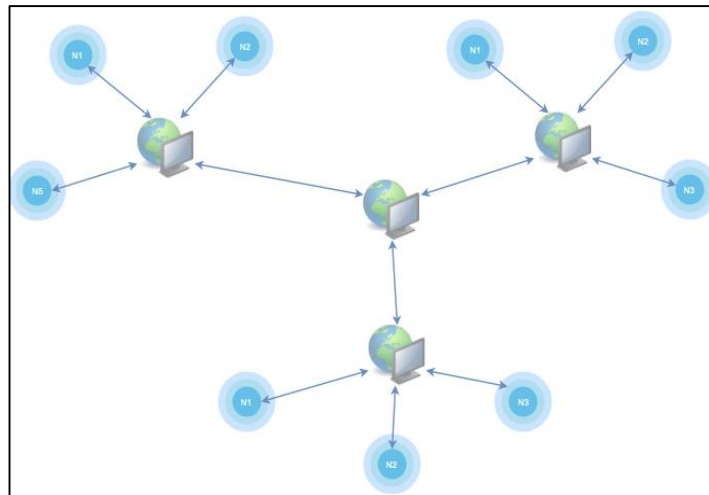
- Arızalı cihaz tespiti kolaydır ve başka bir Node'daki arızadan etkilenmez.
- Ancak merkezde ki Hub veya Switch'den kaynaklanan arızadan tüm Node'lar etkilenir.
- Merkezdeki Hub veya Switch cihazının performansı ağda ki tüm cihazların haberleşme performansını etkiler [17].

2.1.5. Genişletilmiş yıldız bağlantı

Genişletilmiş Yıldız Bağlantı, birden fazla yıldız topoloji ile çalışan ağın birbirine yine bir merkez düğüm etrafında bağlanarak haberleşmesi olarak tanımlanabilir. Bu durumda veri önce kendi merkezindeki Switch veya Hub cihaza gider. Eğer veri aynı alt ağdaki bir cihaza gidecek ise bağlı olduğu merkezdeki Switch veya Hub cihaz ilgili cihaza mesajı aktarır. Veri yollanan cihaz aynı alt networkte değil ise veri önce cihazın bağlı olduğu alt ağdaki merkezi birime gider. Buradan da ağın alt ağlarının bağlı olduğu merkezi birime gönderilir. Bu noktaya kadar ulaşan veri hedef cihaz hangi alt ağda ise onun merkezi birimine yönlendirilir. Veriyi alan merkezi birim elemanı ilgili cihaza veriyi iletir. Şekil 2.5'de örnek bir genişletilmiş yıldız bağlantı gösterilmiştir.

Genişletilmiş Yıldız Topolojisinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Bağımsız alt ağlar oluşturulabilir.
- Merkezdeki Hub veya Switch cihazının performansı ağdaki tüm cihazların haberleşme performansını etkiler.
- Arızalı cihaz tespiti kolaydır ve başka bir Node'daki arızadan etkilenmez [17].



Şekil 2.5. Genişletilmiş yıldız bağlantı

2.1.6. Ağaç bağlantı

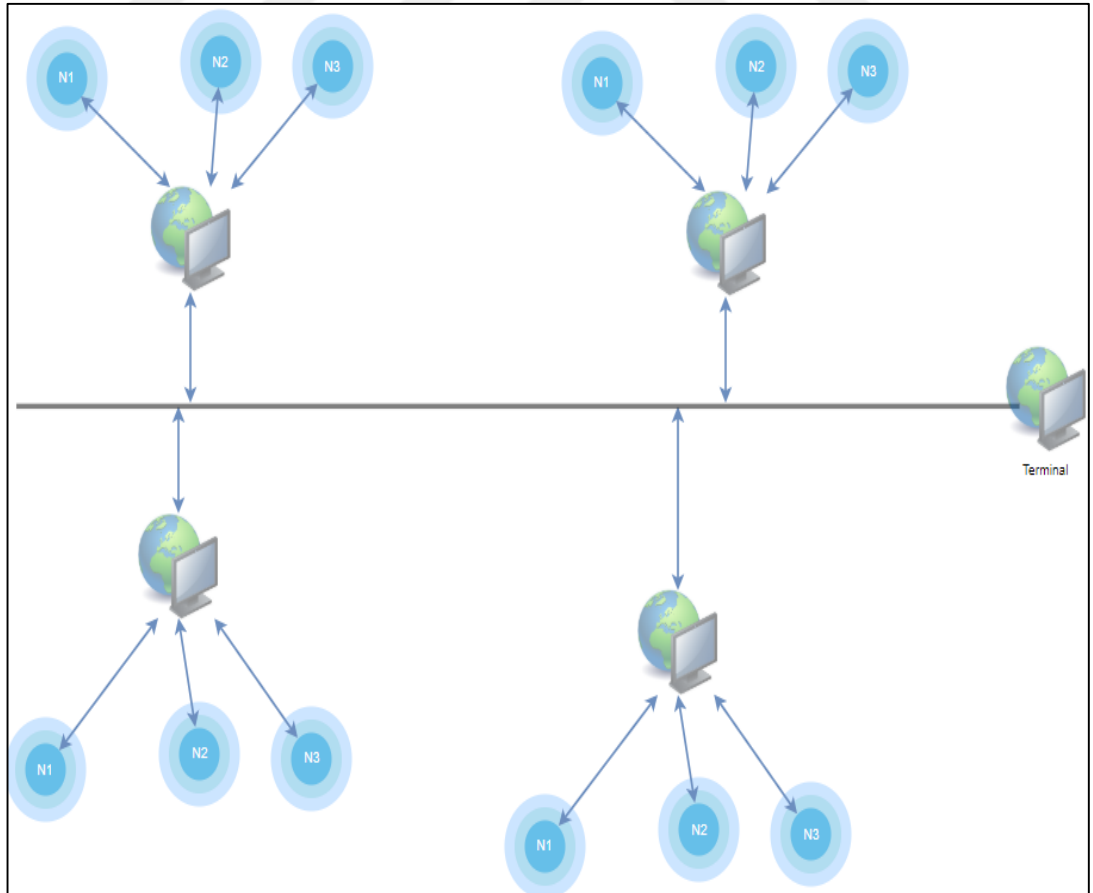
Ağaç topolojisi, bir ağacın dalları gibi birçok bağlantılı elemanın düzenlendiği özel bir yapı türüdür. Bir ağaç topolojisinde, bağlı iki düğüm arasında yalnızca bir bağlantı olabilir. Ağaç bağlantı örneği Şekil 2.6’da verilmiştir.

Bu yapının avantajları;

- Her bir cihaz için P2P bağlantı yapısı kullanılır, böylece cihazda oluşan bir kesinti halinde diğerleri etkilenmez.
- Birbirinden farklı donanım ve yazılım üreticilerinin sağladıkları ürünler uyum içerisinde çalışabilir.

Dezavantajları ise;

- Eğer ana omurga (trunk) yapısında bir kopma olursa tüm ağ işlevini kaybeder.
- Konfigürasyonu diğer tüm topolojilerden oldukça daha zordur [17].



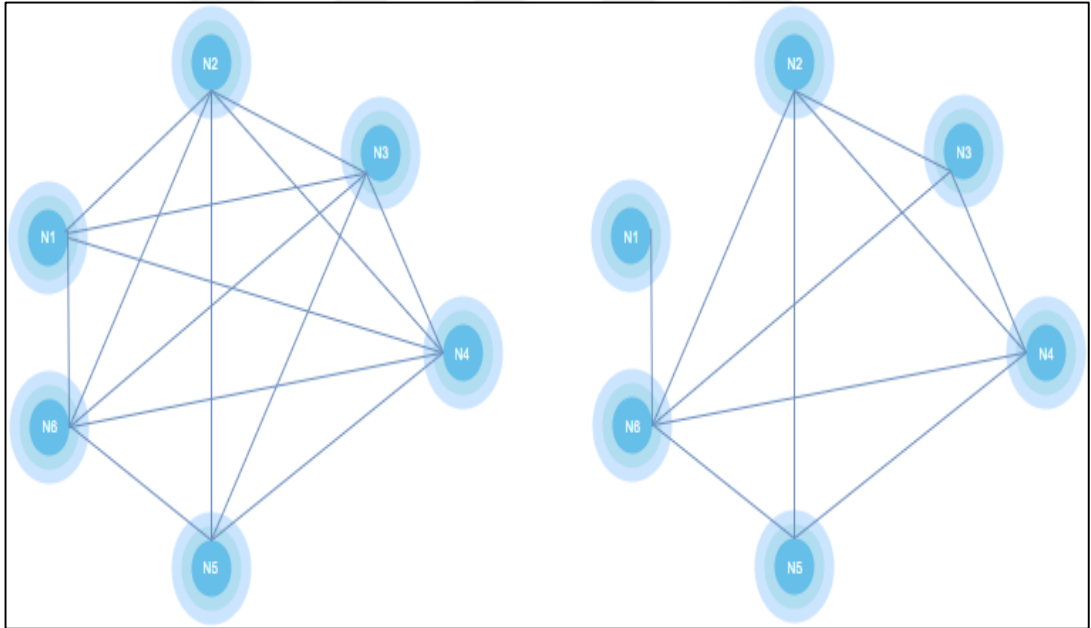
Şekil 2.6. Ağaç Bağlantı

2.1.7. Mesh bağlantı

Mesh bağlantı yapısı tüm cihazların birbirleri ile server-client yapısı olmadan kurduğu bağlantı türüdür. Mesh bağlantı yapısı kendi içinde tam mesh bağlantı ve kısmi mesh bağlantı olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Kısmi mesh ve tam mesh bağlantıya örnek Şekil 2.8’de verilmiştir.

Tam mesh bağlantısı; Sistemdeki tüm düğümlerin birbirleri ile olabilecek tüm bağlantıları kurduğu ve sistemden herhangi birinin düşmesi durumunda diğer düğümlerin etkilenmediği sistem yapısıdır.

Kısmi mesh bağlantı; Kısmi mesh bağlantısında tam mesh bağlantısının aksine tüm düğümler birbiri ile bağlantılı değildir. Ana hatlar ve bu hatlara bağlı ana düğümler bulunmaktadır. Bu düğümlere bağlı kenar düğümler oluşmaktadır. Ana düğümlerin devre dışı kalması halinde bazı düğümlerde devre dışı kalmaktadır.



Şekil 2.7. Tam mesh bağlantı ve kısmi mesh bağlantı

Bu yapının avantajları;

- Her istasyonun kendi başına diğerleri ile uçtan uca bağlantı kurmasından dolayı, çoklu bağlantı oluşmakta ve böylece herhangi bir bağlantının kopması durumunda sinyalin hedefine ulaşabilmesi için diğer bağlantıları kullanması mümkün olmaktadır.

- Bir istasyondan yayınlanan sinyal farklı hedeflere yöneldiğinde çoklu oluşan bağlantı sayesinde kısa süre içerisinde ağdaki hedeflerine varacak ve böylece taşınım zamanı kısılacaktır.

Dezavantajları ise;

- Ağ üzerinde az sayıda düğümün bulunduğu durumlarda ve ortam boyutunun küçük olması halinde ortaya çıkan bağlantı miktarının çok fazla gözükmesi ve bu durumda ağ hızının yavaşlaması.

2.2. Bluetooth Protokolünde Mesh Bağlantı

Genel olarak Bluetooth cihazları birbirleri ile piconet veya P2P bağlantısı kurarak haberleşir. Piconet bağlantı sisteminde master cihaz birden fazla bağlantı kurabilir ve aynı anda birden fazla cihaz ile haberleşebilir. Ancak slave olan cihazlar birbirleri ile doğrudan haberleşme gerçekleştiremezler. P2P bağlantı da ise 2 cihaz kendi arasında haberleşme yapmaktadır.

Mesh ağ yapısı sayesinde Bluetooth cihazları çoktan çoğa haberleşme kabiliyetine kavuşmuştur. Bu durumda bütün cihazlar master ve slave olabilir ve böylelikle birbirlerine mesaj gönderebilir. Bu sayede bir Bluetooth'un cihazının doğrudan kapsama alanının içinde bulunmayan cihazlara diğer cihazlar üzerinden haberleşme gerçekleştirmek mümkün hale gelmektedir [19].

2.2.1. Bluetooth mesh ağı bileşenleri

Bluetooth LE teknolojisine mesh yeteneği kazandırılırken uygulama tarafında cihazlara bazı görev tanımlamaları yapılmıştır. Bu başlık altında bu tanımlardan bahsedilecektir.

2.2.1.1. Cihazlar ve Düğümler

Bir mesh ağa eklenmiş cihazlardan düğüm eklenmemiş olanlara “unprovisioned devices” denir. Yeni bir cihazı mesh ağına katmak için provizyon işlemi yapmak gerekmektedir. Provizyon işlemi sonrasında bu cihazın adresi diğer cihazlar tarafından da bilinmektedir. Ayrıca ağ üzerinden aktarılan mesajların anlaşılır hale gelmesi için provizyon esnasında “public key” denilen güvenlik anahtarları da paylaşılmaktadır.

2.2.1.2. Elemanlar

Her bir düğüm kendi altında barındırdığı elemanlara sahip olabilir. Bu, gönderilmek istenen mesajların alt ağlara doğru yayılmasını daha kolay bir hale getirmek için yapılmış bir mimari sistemdir.

2.2.1.3. Adres

Mesh sisteminde mesajların doğru yere gönderilmesi için gerekli olan bir adres tanımı vardır. Mesh sisteminde “unicast adres”, “group adres” ve “virtual adres” olmak üzere 3 farklı adres tanımı mevcuttur.

Tek nokta adres (Unicast adres); tek bir elemana verilen eşsiz adrestir. Tüm ağ üzerinde sadece bir cihazda olabilir.

Grup adres (Group adres); grup adresi bir veya daha fazla elemanın ortak adresi olarak tanımlanmıştır. Bu adresler Bluetooth SIG tarafından da tanımlanabilir veya dinamik olarak da sisteme girilebilir.

Sanal adres (Virtual adres); bir veya daha fazla düğüme yayılan bir veya daha fazla elemana verilebilecek adres tipidir. Herhangi bir ögenin ilişkilendirilebileceği 128 bitlik UUID etiketine çok benzer [19].

2.2.1.4. Publish/Subscribe

Mesh ağında mesajlar gruplara gönderilir, gruplar ise o mesaj kendisine ait ise elemanlarına gönderir. Bu şekilde mesajın ilgili yere gitmesi daha kolay ve daha az efor ile sağlanmış olur. Şekil 2.8’de gösterilen yapıda anahtarlar ve lambalardan kurulu bir mesh ağı gösterilmiştir. Bu ağda 5 adet oda grubu kurulmuştur. Mesajın gruplara kadar olan kısmı “publish” gruplardan, lambalara kadar olan kısmı ise “subscribe” olarak adlandırılmıştır.

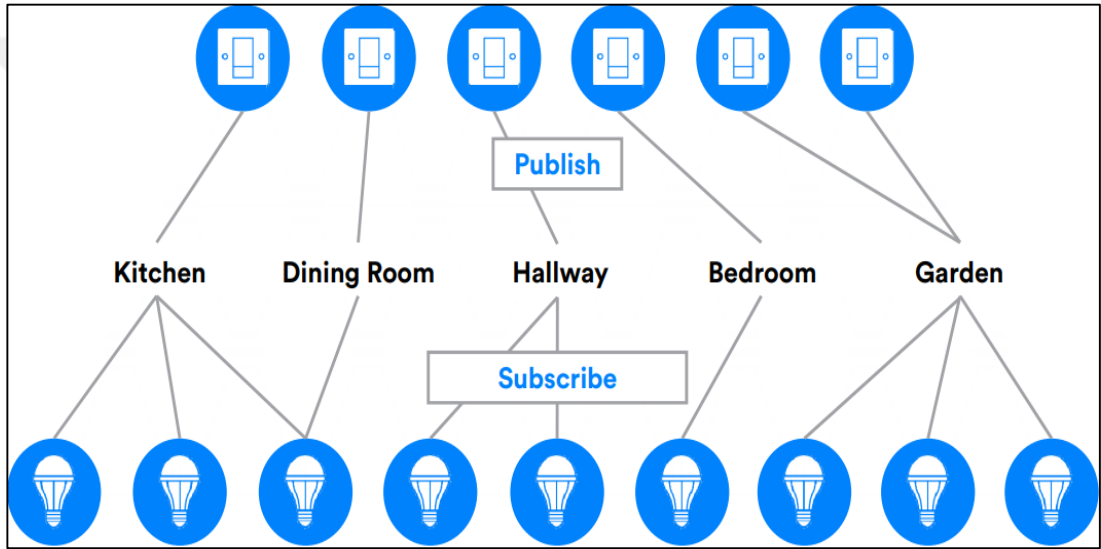
2.2.2. Bluetooth mesh ağı mimarisi

Bluetooth mesh ağı BLE katmanı üzerine inşa edilmiş yeni bir protokol olarak karşımıza çıkmaktadır. BLE mimarisini önceki başlıklarda incelendiği için bu kısımda sadece mesh ile ilgili olan katmanları incelenecektir. Mesh protokolü Bluetooth SIG

grubu tarafından standart olarak yayınlanmıştır. Mesh mimarisinin katmanları Şekil 2.9’da gösterilmiştir [20].

2.2.2.1. Taşıyıcı katman (Bearer layer)

Bearer katmanında advertising bearer ve GATT bearer olmak üzere 2 adet alt katman bulunmaktadır. Advertising bearer katmanında mevcut PDU’ları (Packet data unit) göndermek için BLE’nin GAP advertising ve GAP scanning özellikleri kullanılır. GATT bearer de ise advertising bearer özelliğini desteklemeyen cihazların mesh ağına bağlanmaları sağlar.



Şekil 2.8. Örnek Mesh ağı [20]

2.2.2.2. Network katmanı (Network layer)

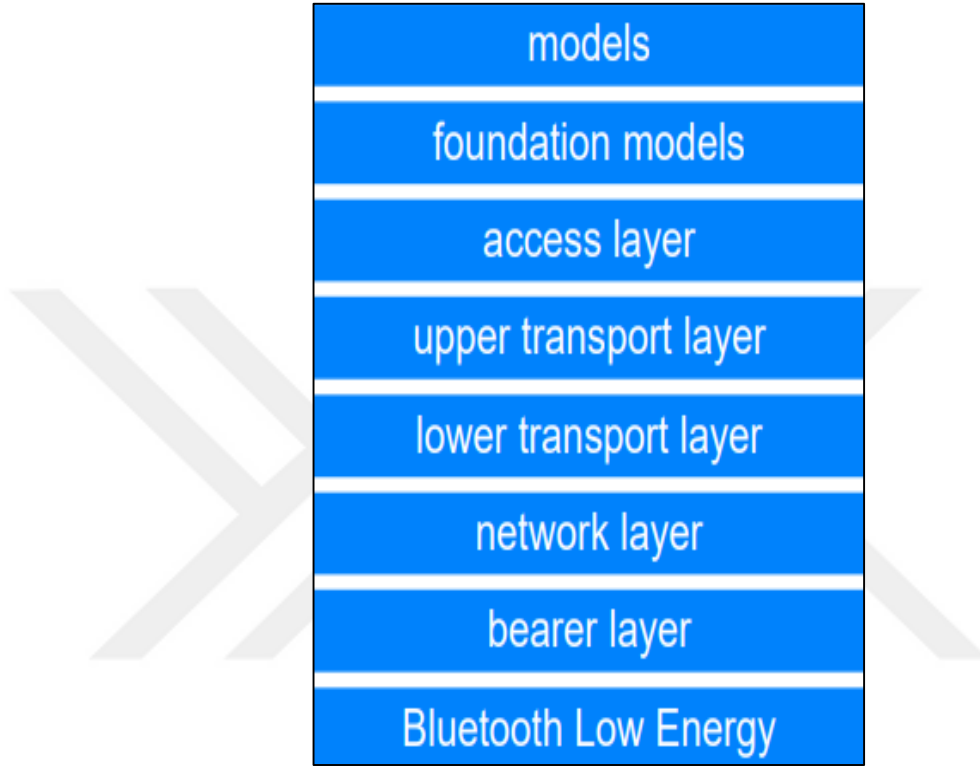
Bu katmanda mesajları gönderirken hangi arayüzlerin kullanılacağı belirlenir. Ayrıca bu katmanda gelen mesajlar ve giden mesajlar için ayrı ayrı filtre uygulanarak bu mesajların tekrar gönderilip gönderilmeyeceği ya da iletilip iletilmeyeceği kontrol edilir.

2.2.2.3. Alt taşıma katmanı (Lower transport layer)

Upper transport layer’den alınan mesajları iletmek için kullanılır. Gerektiğinde mesajların boyutuna göre uygun PDU boyutlarına böler ve karşı tarafın başarılı şekilde mesajı almasına yardımcı olur. Alıcı tarafta ise parçalara ayrılmış mesajları toplayarak tek mesaj haline getirme işlemini yapar.

2.2.2.4. Üst taşıma katmanı (Upper transport layer)

Verilerin şifrelenmesi, şifrelerin çözülmesi ve yetkilendirmelerin yapıldığı katmandır. Ayrıca, farklı eş düğümlerdeki Upper Transport Layer arasında dahili olarak oluşturulan ve gönderilen taşıma kontrol mesajlarından da sorumludur.



Şekil 2.9. Mesh Protokol katmanları [20]

2.2.2.5. Erişim katmanı (Access layer)

Uygulamaların Upper Transport Layer nasıl kullanabileceğini tanımlamaktan sorumludur ve aşağıda listelenen üç görevi vardır.

- Uygulama verilerinin formatını tanımlama.
- Üst taşıma katmanında gerçekleştirilen şifreleme ve şifre çözme işlemlerini tanımlama ve kontrol etme.
- Veriyi aktarmadan önce Upper Transport Layer'dan alınan verilerin doğru ağ ve uygulama için olduğunu doğrular.

2.2.2.6. Temel modeller katmanı (Foundation models)

Bu katmanda mesh network modelleri ve mesajları saklanmaktadır.

2.2.2.7. Modeller katmanı (Models)

Genel kullanıcı senaryolarının standartlaşması için gerekli olan modellerin tanımlandığı katmandır.

2.2.3. Bluetooth mesh ağlarında güvenlik

BLE teknolojisi güvenlik konusunda kullanıcıyı özgür bırakmıştır. Ekli olan güvenlik sistemlerini kullanıp kullanmamakta müşteri inisiyatif kullanabilmektedir. Ancak Bluetooth Mesh ağında güvenlik zorunlu hale getirilmiştir. Ağ, bireysel uygulamalar ve cihazlar tamamen güvenli olup ve güvenlik özelliği hiçbir şekilde kapatılamaz veya azaltılamaz.

Mesh ağı güvenliği temelleri

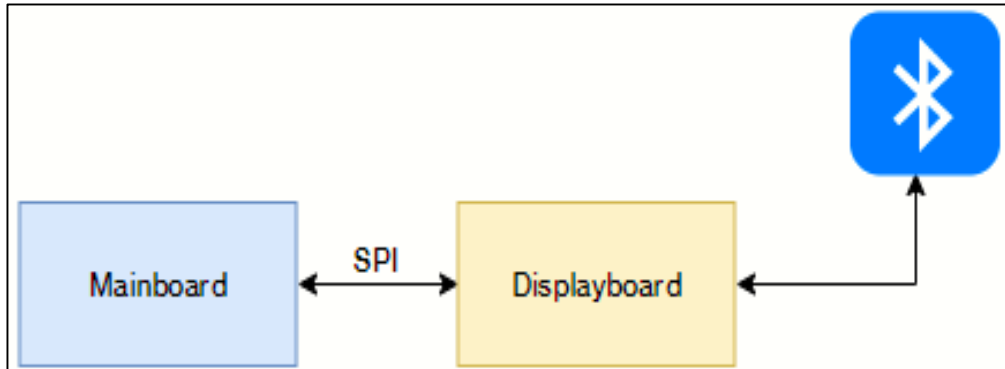
- Tüm mesh mesajları şifrelenir ve doğrulanır.
- Ağ güvenliği, uygulama güvenliği ve cihaz güvenliği bağımsız olarak ele alınmaktadır.
- Güvenlik anahtarları, ağın kullanım ömrü boyunca bir Anahtar Yenileme prosedürü ile değiştirilebilir.
- Mesaj gizleme, ağ içinde gönderilen mesajları izlemeyi zorlaştırır, düğümleri izlemeyi zorlaştırmak için bir gizlilik mekanizması sağlar.
- Mesh güvenliği, ağı tekrar eden saldırılarına karşı korur.
- Cihazların düğüm haline getirilmesi işlemi güvenli bir işlemdir.
- Trashcan saldırılarını önleyecek şekilde düğümler ağdan güvenli bir şekilde çıkarılabilir.

3. SİSTEM GERÇEKLEMESİ

Tez kapsamında iki adet mesh ağı kurulmuştur. Bu mesh ağlarından birincisi Bluetooth 4.2 ile çalışmaktadır. İkinci sistem ise Bluetooth 5 ile çalışmaktadır. Bu iki sistemin birbirlerine göre mesafe ve güç tüketimi karşılaştırılmıştır. Alınan sonuçlara göre sistemlerin performansları hakkında yorum yapılmıştır.

3.1. Bluetooth 4.2 İçin Tasarlanan Sistem

Bluetooth 4.2 ile çalışan sistemin donanımında 2 adet işlemci bulunmaktadır. Bu donanımın blok gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu sistemde birinci işlemci makinenin ana işlevlerini yerine getirmesi için tasarlanmış anakart (mainboard) görevi görmektedir. Bu kart üzerinde NXP firmasına ait bir ARM Cortex M0+ tabanlı KE04 serisi bir işlemci kullanılmaktadır. İkinci işlemci ise gösterge kartı (displayboard) görevini görmektedir ve kullanıcı arayüzü bu kart üzerinde bulunmaktadır. Bluetooth 4.2 yazılımları da gösterge kartı üzerinde bulunmaktadır. Bu kart üzerinde Cypress firmasının Cortex M0 tabanlı PSOC4200 serisi bir işlemcisi kullanılmaktadır. İki kart kendi arasında SPI protokolü ile haberleşmektedir.

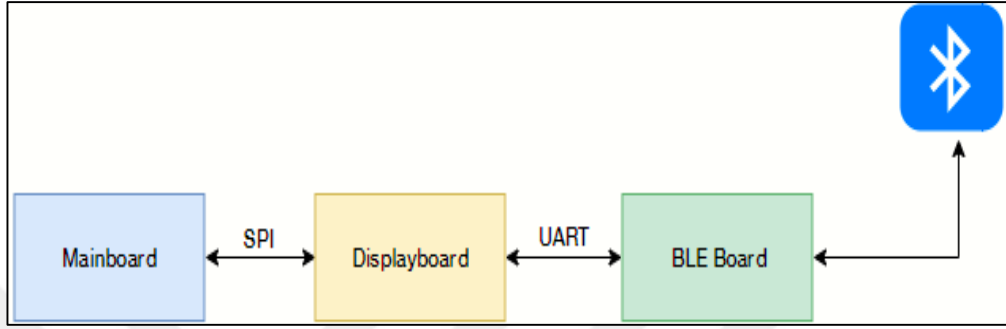


Şekil 3.1. Bluetooth 4.2’li sistem

3.2. Bluetooth 5 İçin Tasarlanan Sistem

Bu çalışmada kullanılan Bluetooth 5.0’lı sistemin blok şeması Şekil 3.2’de verilmiştir. Bluetooth 5.0’lı sistemin donanımında birinci sisteme ek olarak Bluetooth 5.0 destekleyen Silicon Labs EFR32xG21 Wireless Gecko Starter Kit kullanılmıştır.

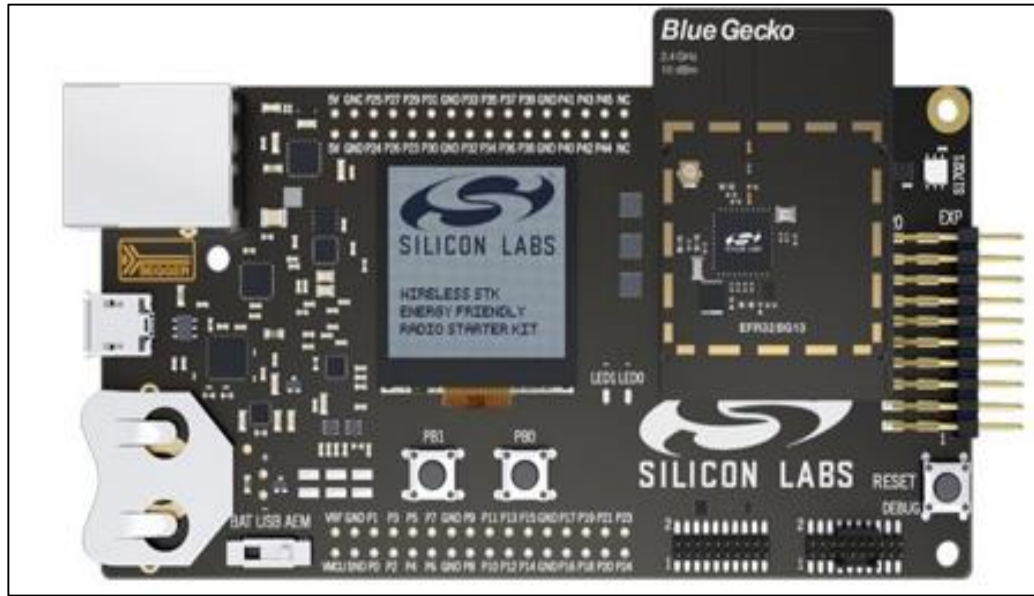
Bluetooth 5.0 destekli işlemci gösterge kartına UART protokolü üzerinden bağlanmaktadır. Bluetooth 5 “LE 1M”, “LE 2M” ve “LE Coded” olmak üzere 3 adet phy modunu desteklemektedir. Gerçekleştirilen deneylerde “LE Coded” PHY modunda çalışma yapılmıştır. Kullanılan Bluetooth modül LE Coded haricindeki modları desteklememektedir.



Şekil 3.2. Bluetooth 5’li sistem

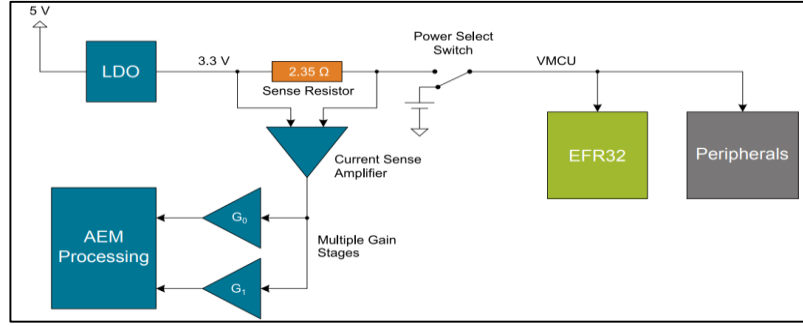
3.3. Güç Ölçüm sistemi

Güç ölçüm sistemi olarak Silicon Labs firmasının Şekil 3.3’te gösterilen SLWSTK6020B isimli geliştirme kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.3. SLWSTK6020B geliştirme kartı

Geliştirme kitindeki AEM (Advanced Energy Monitor) adı verilen güç ölçüm devresi ve buna ait bir PC yazılımı ile ölçümler alınmıştır. Güç ölçümünün yapıldığı sistemin blok şeması Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. SLWSTK6020B Blok şeması [21]

Sistemin 3.3 V hattına bağlanan 2.35 Ω direnç üzerinden geçen akım hesaplanarak güç ölçümü yapılmaktadır. Güç ölçüm sisteminde doğruluğu arttırmak için 2 aşamalı yükseltici devre bulunmaktadır. AEM sistemi 0.1 μ A ile 95 mA arasında güç ölçümü yapabilmektedir. 250 μ A üzerindeki akımlar için ölçüm doğruluğu 1 μ A olarak tanımlanmıştır. 250 μ A altındaki akımlar için ise 1 μ A doğruluk tanımlanmasına rağmen 100 nA miktarındaki değişiklikleri de algılayabilmektedir. AEM sistemi 10 kHz örnekleme hızına sahiptir. PC yazılımı akım tüketimini gerçek zamanlı olarak vermektedir [21]. Bluetooth 5 için doğrudan bu AEM sistemi üzerinden ölçümler alınmıştır. Bluetooth 4.2'li sistem bu karta çevresel birim (peripheral) gibi bağlanılarak güç değişimi incelenmiştir.

Şekil 3.5'de gösterilen ekran görüntüsünde A bölümü A/div B bölümü ise Time/Div ayarlarının yapıldığı yerdir. C kısmında ise standby esnasında sistemin tükettiği minimum akım gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Güç ölçüm sistemi ekranı

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde tasarlanan deneylerden alınan sonuçlar tablolar halinde verilmiş ve her bir deney için değerlendirmeler yapılmıştır.

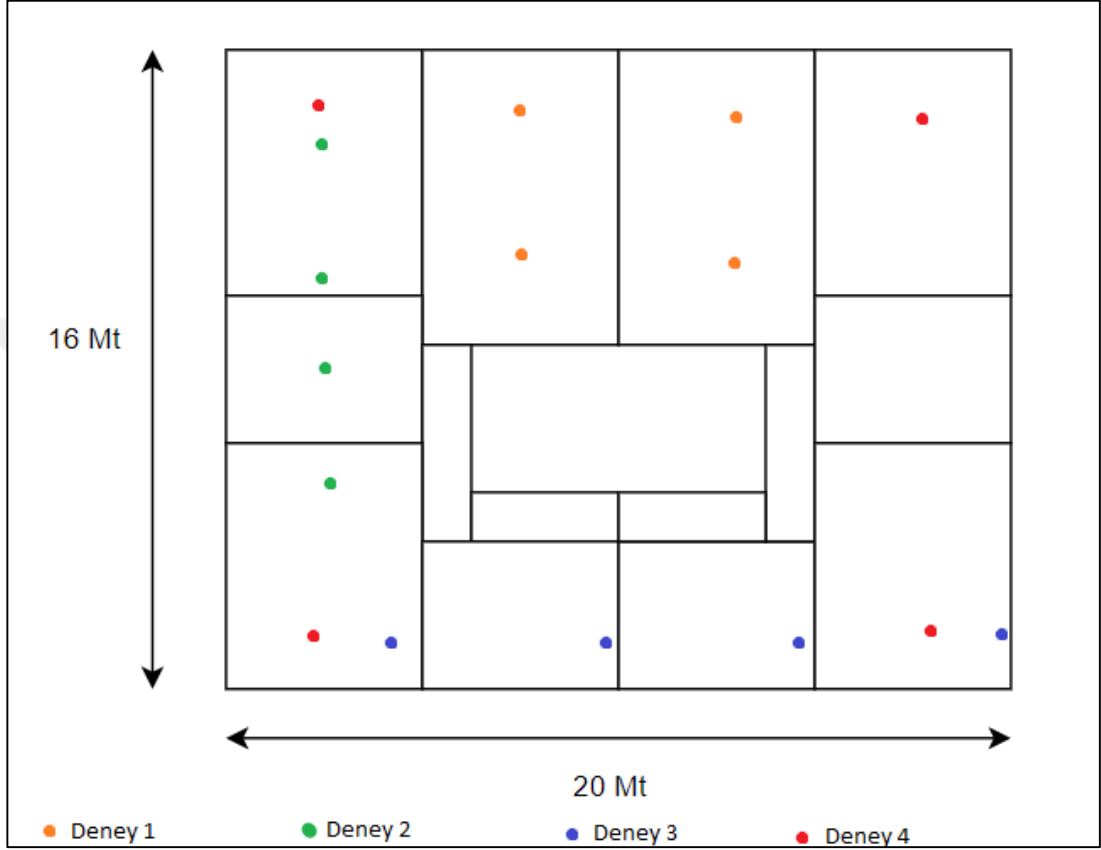
Bluetooth Mesh'li sistemler kurulduktan sonra farklı ortamlarda testlerinin yapılması ve bu testler sonucunda sistemlerin tükettiği güç, paket hata oranı, kapsama alanı gibi değerlerin karşılaştırılması tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Mesh ağını denemek için tasarlanan test sistemleri 2 ana gruba ayrılmıştır. Birinci grup kapalı alanda yapılan testlerdir. Bu testler de cihazlar arasında duvar vb. engeller mevcuttur. İkinci grupta ise açık alanda testler yapılmıştır. Cihazlar arasında engel ve duvar bulunmamaktadır.

4.1. Kapalı alan Test Sistemleri

Kapalı alanda yapılan Bluetooth testlerinde mesafeye göre hata oranı kontrol edilmiştir. Testlerde 4 adet cihaz ile hem Bluetooth 5 hem de Bluetooth 4.2'de mesh ağı oluşturulmuştur. Mesh ağı kapalı alanda 2 metre, 5 metre 7,5 metre mesafelerde yapılmıştır. Kapalı alanda yapılan testlerin kroki üzerinde gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Güç ölçümü tek cihaz üzerinden alınmış verini başarılı gönderildi bilgisi ise 4 cihazdan kontrol edilmiştir. Güç ölçümleri RX için ve TX için ayrı ayrı ölçülmüştür. Deney sistemlerinin sonuçları aşağıda tablolar halinde verilmiştir.

Birinci deneyde kartlar arasındaki mesafe 2 metre olacak şekilde ve kartlar arasında sadece 1 tane duvar olacak şekilde bir yerleşim yapılmıştır. İkinci deneyde kartlar arasındaki mesafe 3 metre olacak şekilde ve kartların arasında 2 tane duvar olacak şekilde bir yerleşim yapılmıştır. Bu yerleşimde en uzak iki cihaz arasında doğrudan veri transferi yapılamamaktadır. Üçüncü deney sisteminde doğrusal bir yerleşimle ancak bu sefer kartlar arasındaki mesafe 5 metre olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yerleşimde her düğüm arasında 1 duvar bulunmaktadır. Dördüncü deney sisteminde cihazlar kapalı alan içerisinde en uzak noktalara yerleştirilmiştir. Cihazların yerleşimi kare şeklinde yapılmıştır. Her deney sisteminde 50 defa veri gönderilmiş ve bütün

sistemlerden verinin başarılı bir şekilde alınıp alınmadığı kontrol edilmiştir. Sistem 1 veri gönderme göreviyle kullanıldığı için tablolara yazılmamıştır. Bluetooth 4.2 ile ilgili sonuçlar Tablo 4.1 ve Şekil 4.2’de, Bluetooth 5 ile ilgili sonuçlar ise Tablo 4.2 ve Şekil 4.3’te verilmiştir.



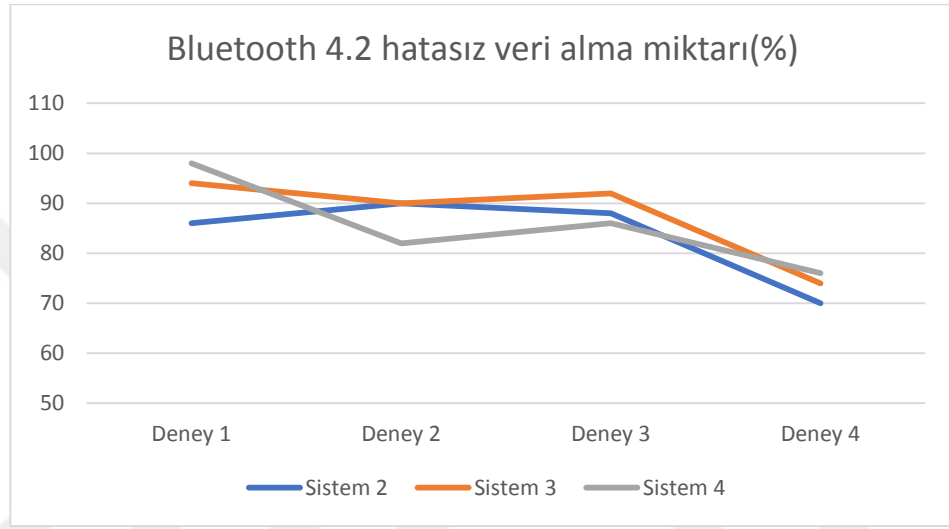
Şekil 4.1. Kapalı alan Kroki

Tablo 4.1. Bluetooth 4.2 Hatasız veri alma miktarı (%)

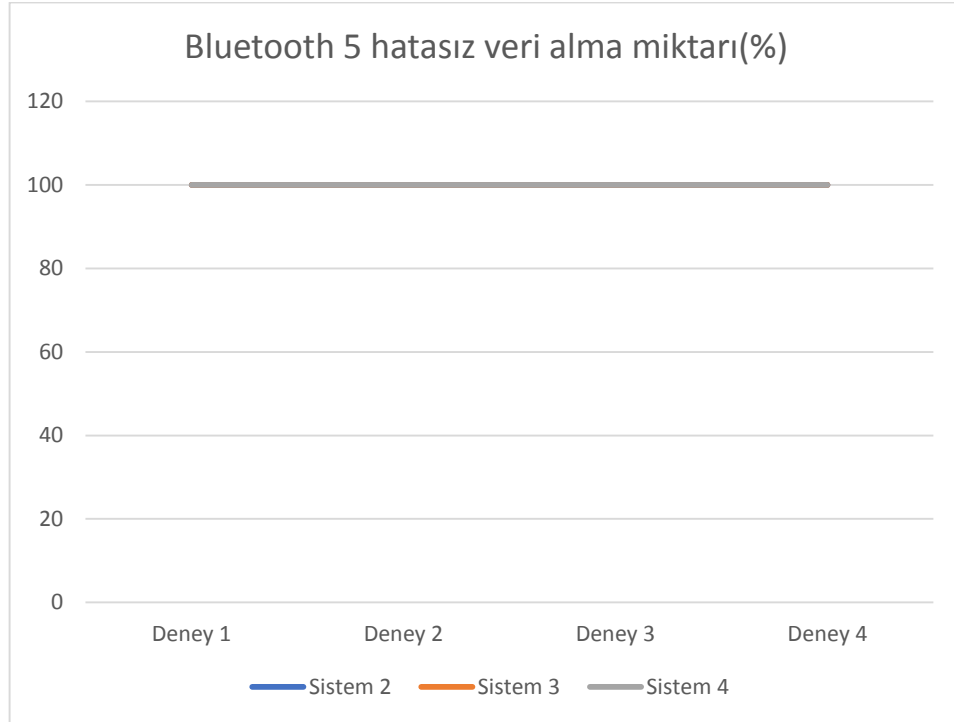
	Sistem 2	Sistem 3	Sistem 4
Deney 1	86	94	98
Deney 2	90	90	82
Deney 3	88	92	86
Deney 4	70	74	76

Tablo 4.2. Bluetooth 5 Hatasız veri alma miktarı (%)

	Sistem 2	Sistem 3	Sistem 4
Deney 1	100	100	100
Deney 2	100	100	100
Deney 3	100	100	100
Deney 4	100	100	100



Şekil 4.2. Bluetooth 4.2 kapalı alan testleri

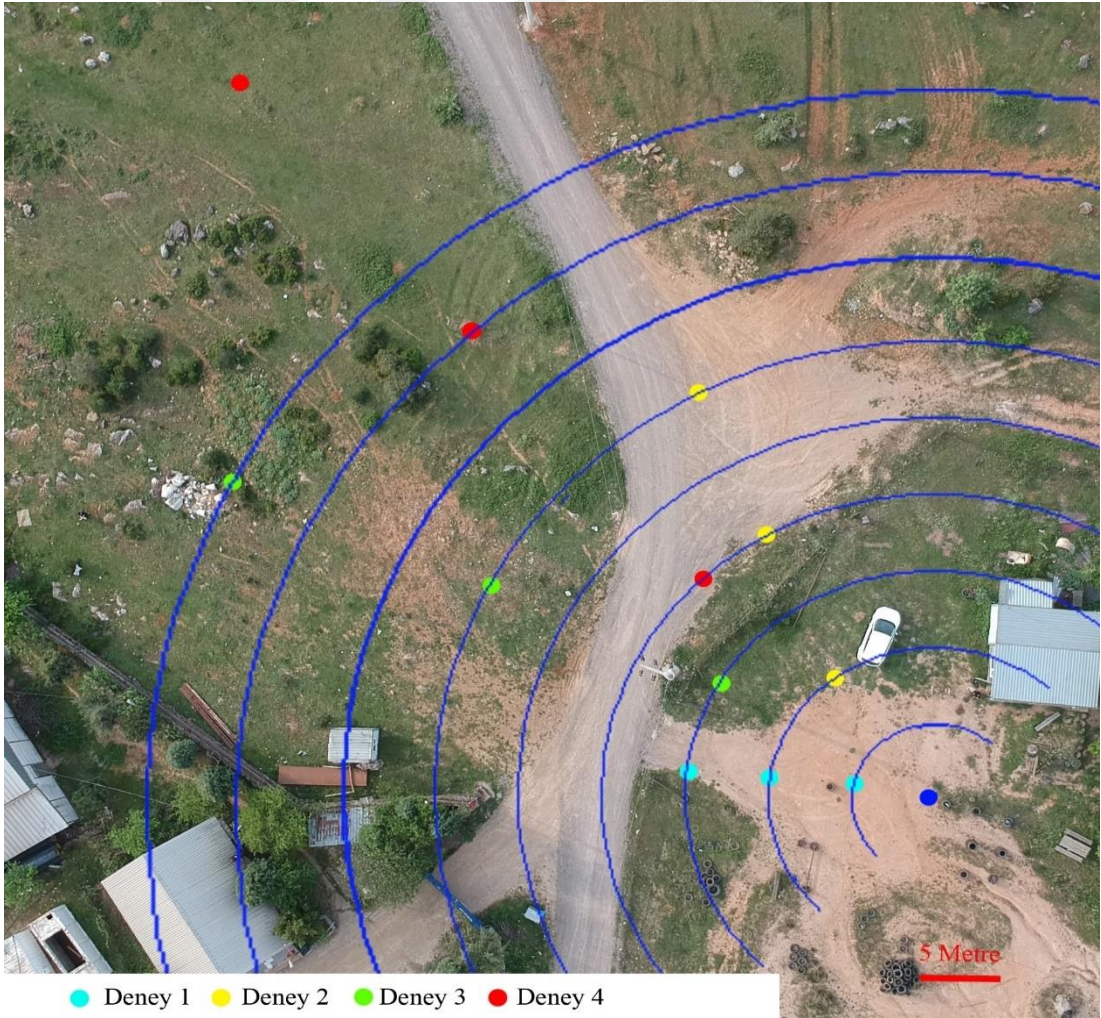


Şekil 4.3. Bluetooth 5 kapalı alan testleri

Yapılan deneylerden alınan sonuçlara göre Bluetooth 5 kapalı alanda Bluetooth 4.2'ye göre daha performanslı çalışmaktadır. Bununla birlikte Bluetooth 4.2'nin tek başına performansı değerlendirildiğinde aradaki duvarlara duyarlı olduğu ve duvarların haberleşme kalitesini bozduğu görülmektedir. Bluetooth 5 ise aynı şartlarda kapalı alanda hatasız olarak haberleşmektedir.

4.2. Açık Alan Test Sistemleri

Açık alanda yapılan Bluetooth testlerinde mesafeye göre hata oranı ve harcanan güç ölçümleri yapılmıştır. Mesafe bağlantı kopana kadar arttırılmış ve tablolar bu şekilde oluşturulmuştur. Güç ölçümü tek sistem üzerinden yapılmıştır. Verinin başarılı gönderildi bilgisi ise 4 sistemden kontrol edilmiştir. Test sistemlerinin sonuçları tablolar halinde gösterilmiştir. Bluetooth 4.2 ile yapılan testlerin kart yerleşimi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Bluetooth 4.2 cihazların yerleşimi

Bluetooth 5 de kapsama alanı daha fazla olduğu için testler farklı noktalara koyularak yapılmıştır. Çıkkılan maksimum mesafe 150 metre sistemler arası mesafedir. 10, 20, 50, 100 metre mesafelerde 4 cihaz 150 metre mesafede 3 cihaz kullanılmıştır. Şekil 4.5'te testlerin yapıldığı mesafe gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Bluetooth 5 cihazların yerleşimi

4.2.1. Bluetooth 4.2'li sistem

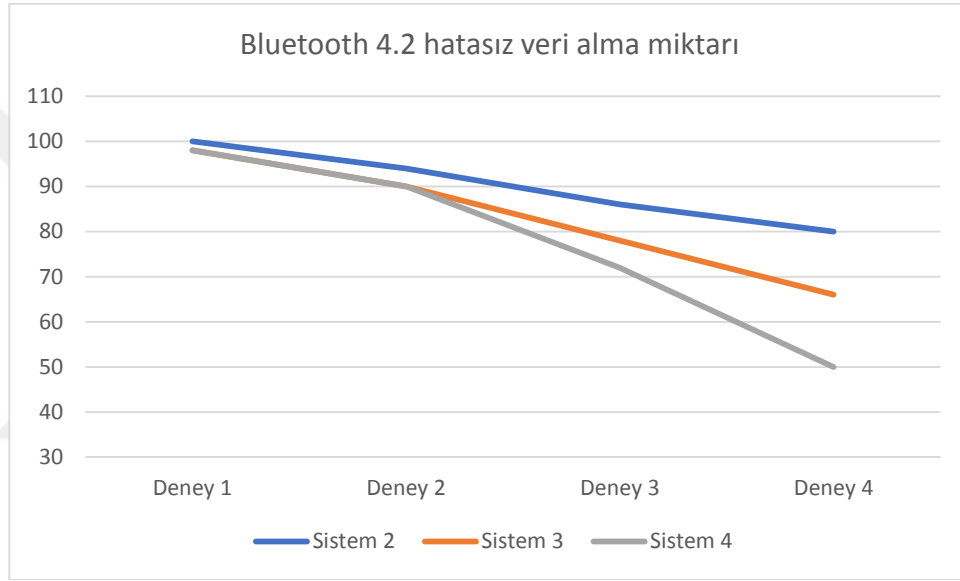
Bu bölümde Bluetooth 4.2 ile yapılan açık alan testleri ve bu testlerden çıkan sonuçlar paylaşılmıştır. PCB anten kullanıldığı için antenler yönlü çalışmaktadır. Bu nedenle bütün deneylerde cihazlar doğrusal olarak yerleştirilmiştir. Toplam 4 farklı mesafede deney yapılmıştır.

Birinci deneyde her bir cihaz arasında 5 metre mesafe olacak şekilde deneyler yapılmıştır. İkinci deneyde cihazlar arasındaki mesafe 10 metre olarak ayarlanmıştır. Üçüncü deneyde cihazlar arasındaki mesafe 20 metre olarak ayarlanmıştır. Dördüncü deneyde cihazlar arasındaki mesafe 30 metre olarak ayarlanmıştır. Birinci sistem üzerinden mesajlar gönderildiği için tabloya eklenmemiştir. Her deneyde 50 adet veri

gönderilmiş ve kartlardan tek tek kontrol edilmiştir. Alınan sonuçlar Tablo 4.3’de ve buna ait grafik Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Bluetooth 4.2 Hatasız veri alma miktarı (%)

	Sistem 2	Sistem 3	Sistem 4
Deney 1	100	98	98
Deney 2	94	90	90
Deney 3	86	78	72
Deney 4	80	66	50



Şekil 4.6. Bluetooth 4.2 açık alan testleri

Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre mesafe arttıkça veri kaybı artmaktadır. İkinci deneyden itibaren en uzaktaki cihaz birinci cihazın kapsama alanından çıkmıştır ancak diğer cihazlar üzerinden haberleşerek bazı verileri alabilmektedir. Bu da Bluetooth sisteminin kapsama alanını arttırmaktadır.

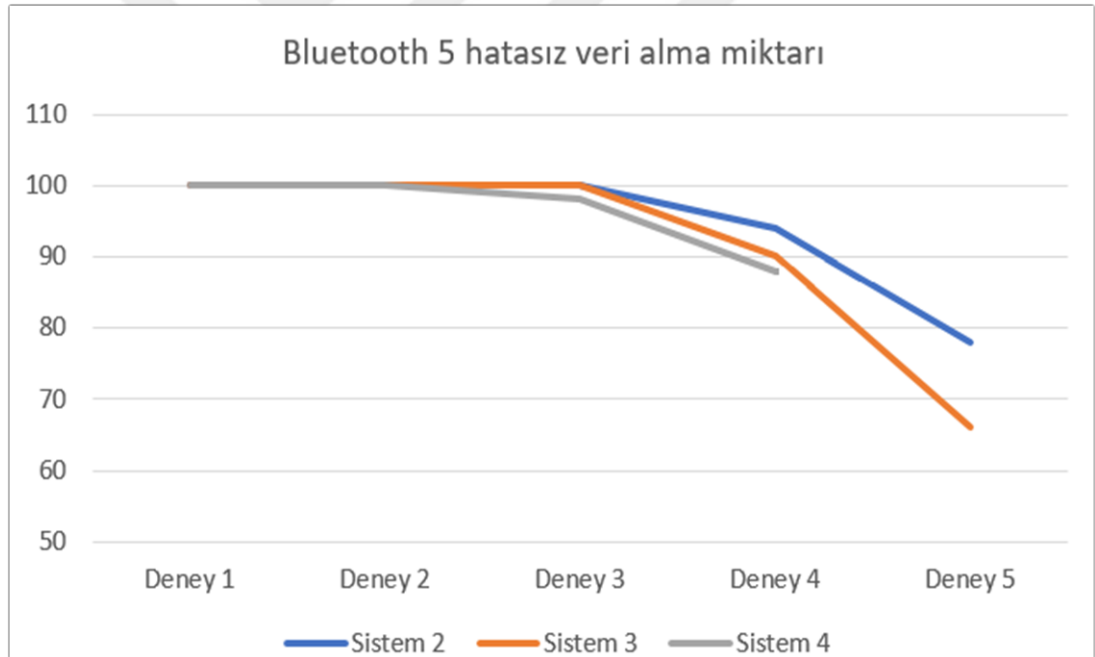
4.2.2. Bluetooth 5’li sistem

Bu bölümde Bluetooth 5 ile yapılan açık alan testleri ve bu testlerden çıkan sonuçlar paylaşılmıştır. PCB anten kullanıldığı için antenler yönlü çalışmaktadır. Bu nedenle bütün deneylerde cihazlar doğrusal olarak yerleştirilmiştir. Toplam 5 farklı mesafede deney yapılmıştır. Birinci deneyde her bir cihaz arasında 10 metre mesafe olacak şekilde deneyler yapılmıştır. İkinci deneyde cihazlar arasındaki mesafe 20 metre

olarak ayarlanmıştır. Üçüncü deneyde cihazlar arasındaki mesafe 50 metre olarak ayarlanmıştır. Dördüncü deneyde cihazlar arasındaki mesafe 100 metre olarak ayarlanmıştır. Beşinci deneyde cihazlar arasındaki mesafe 150 metre olarak ayarlanmıştır ve üçüncü sistem deneye dahil edilememiştir. Birinci sistem üzerinden mesajlar gönderildiği için tabloya eklenmemiştir. Her deneyde 50 adet veri gönderilmiş ve kartlardan tek tek kontrol edilmiştir. Alınan sonuçlar Tablo 4.4’de ve buna ait grafik Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Bluetooth 5 Hatasız veri alma miktarı (%)

	Sistem 2	Sistem 3	Sistem 4
Deney 1	100	100	100
Deney 2	100	100	100
Deney 3	100	100	98
Deney 4	94	90	88
Deney 5	78	66	N/A

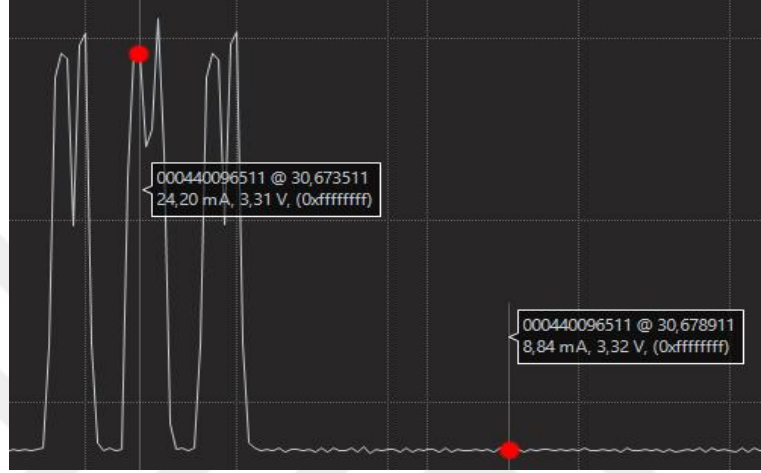


Şekil 4.7. Bluetooth 5 açık alan testleri

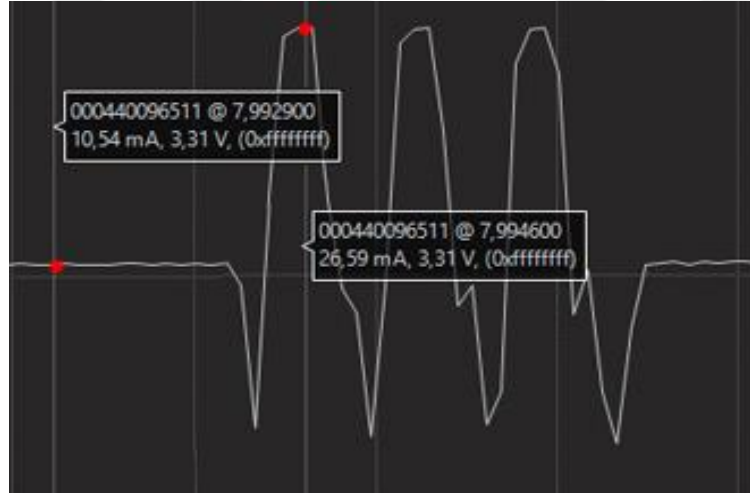
Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre Bluetooth 5 de kapsama alanı daha fazladır. Bluetooth 4.2’de 30 metrelerde haberleşmede problemler oluşmaya başlamasına rağmen Bluetooth 5’te 50 metreden sonra haberleşme de problemler başlamıştır ancak 150 metrede haberleşme devam etmektedir. Cihazlar birbirleri üzerinden haberleşme yeteneği sayesinde kapsama alanı dışındaki cihazlara başarılı bir şekilde veri göndermiştir.

4.3. Güç analizi

Yapılan testlerden alınan sonuçlara göre Bluetooth 4.2 ve Bluetooth 5 benzer tepe (peak) akım değerine sahip olmasına rağmen Bluetooth 5 sinyal yapısındaki farktan dolayı daha az güç tüketmektedir. Şekil 4.8’te Bluetooth 4.2’nin tepe akımı Şekil 4.9’da ise Bluetooth 5’in tepe akımı gösterilmektedir.

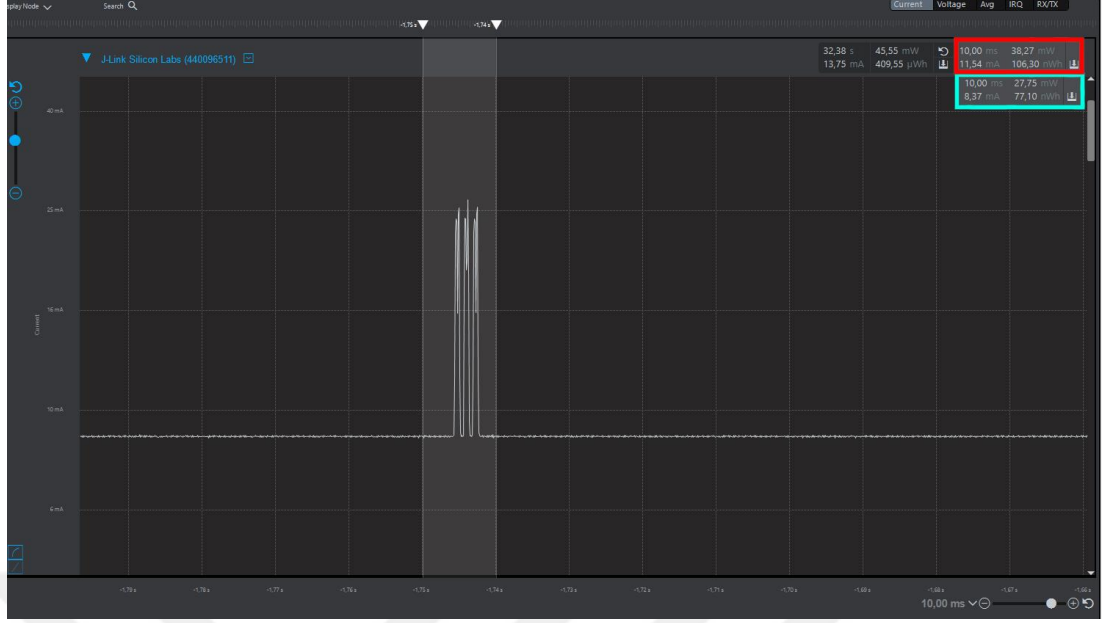


Şekil 4.8. Bluetooth 4.2 yayın akım grafiği

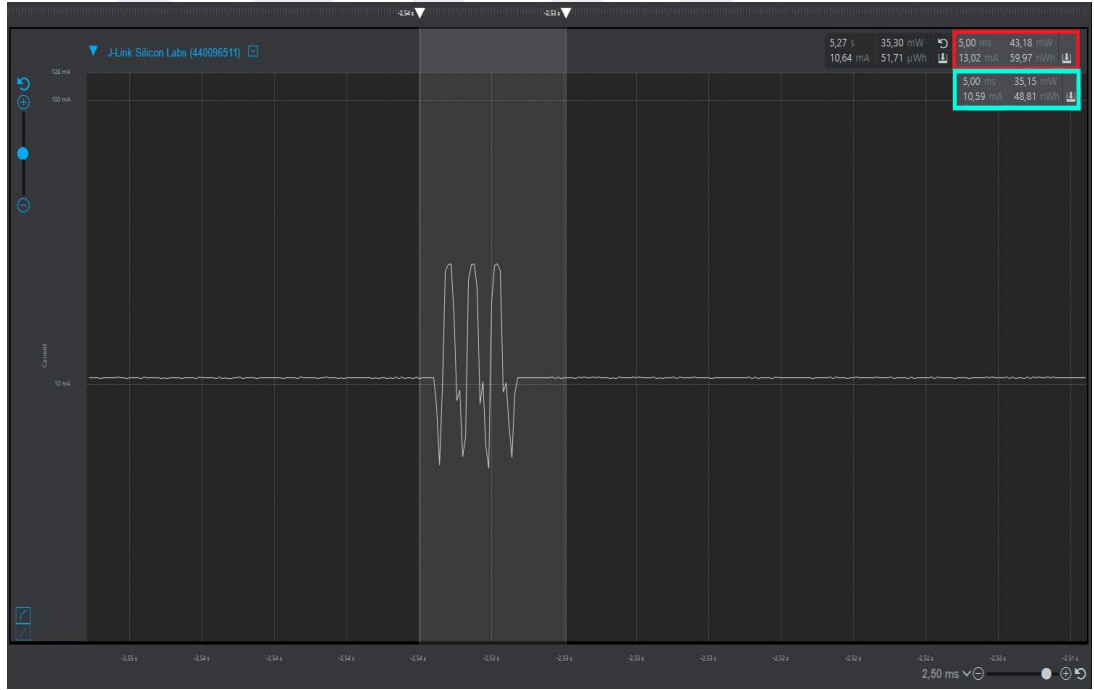


Şekil 4.9. Bluetooth 5 yayın akım grafiği

Şekil 4.10’da Bluetooth 4.2’nin yayın esnasında ki güç tüketimi Şekil 4.11’de ise Bluetooth 5’in yayın esnasındaki güç tüketimi gösterilmiştir. Kırmızı kutu içerisinde yayın esnasında ölçüm sisteminden ölçülen değer turkuaz kutu içerisinde ise yayın yapmıyorken ölçülen değer gözükmemektedir. Bu değerlerin tablo halinde özetlenmiş hali ise Tablo 4.5’de gösterilmiştir. Bluetooth 5, Bluetooth 4.2’ye göre 18,04 nWh daha az güç tüketmektedir.



Şekil 4.10. Bluetooth 4.2 ortalama yayın gücü



Şekil 4.11. Bluetooth 5 ortalama yayın gücü

Tablo 4.5. Yayın esnasında tepe akımı ve ortalama enerji değerleri

	Tepe akımı	Ortalama Enerji
Bluetooth 5	15,05 mA	11,16 nWh
Bluetooth 4.2	15,36 mA	29,2 nWh

Bluetooth mesh sistemi açık alanda olsa kapalı alanda olsa diğer cihazla olan mesafeyi bilmediği için sabit bir güçte yayın yapmaktadır. Yapılan güç ölçümü testleri de bunu göstermektedir. Bluetooth cihazlar arası mesafe artmasına rağmen yapılan güç tüketimi ölçümlerinde bir farklılık görülmemektedir. Benzer sonuçlar [22]'de elde edilmiştir.

Güç ölçümleri iki sistem içinde her mesafede 5'er tekrar şeklinde yapılmıştır. Bu ölçümler ile ilgili sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Yapılan ölçümlerde bekleme durumunda sistemin ölçtüğü güç not edilmiş daha sonra veri gönderme esnasında harcanan güç not edilmiş ve bunun farkına bakılmıştır. Güçler TX ve RX esnasında ayrı ayrı ölçülmüştür.

Bluetooth 4.2 TX ve bekleme (StandBy - SB) esnasında harcanan güç Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Bluetooth 4.2 TX güç tablosu

Mesafe	SB Güç (μ Wh)	TX Güç (μ Wh)	Fark (μ Wh)
10 m	8,88	9,21	0,33
10 m	8,92	9,32	0,41
10 m	8,90	9,24	0,35
10 m	8,87	9,21	0,35
10 m	9,05	9,33	0,28
15 m	8,86	9,19	0,33
15 m	8,81	9,19	0,39
15 m	8,91	9,23	0,33
15 m	8,88	9,17	0,29
15 m	8,90	9,24	0,35
20 m	8,68	8,99	0,31
20 m	8,88	9,26	0,39
20 m	8,90	9,30	0,40
20 m	8,86	9,29	0,43
20 m	8,91	9,18	0,27
30 m	8,73	9,17	0,45
30 m	8,85	9,23	0,38
30 m	8,85	9,19	0,33
30 m	8,93	9,34	0,40
30 m	8,92	9,34	0,42

Bu tablodaki verilere göre Bluetooth 4.2'li sistem TX ortalama 0,36 μ Wh güç tüketmektedir.

Bluetooth 4.2 RX esnasında harcanan güç ise Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Bluetooth 4.2 RX güç tablosu

Mesafe	SB Güç (μ Wh)	RX Güç (μ Wh)	Fark (μ Wh)
10 m	8,93	9,16	0,23
10 m	8,98	9,22	0,24
10 m	8,99	9,24	0,26
10 m	8,86	9,15	0,29
10 m	8,96	9,17	0,21
15 m	8,82	9,04	0,22
15 m	8,80	9,08	0,28
15 m	8,89	9,13	0,24
15 m	8,77	8,98	0,20
15 m	8,91	9,09	0,19
20 m	9,16	9,32	0,16
20 m	8,97	9,19	0,21
20 m	9,09	9,22	0,13
20 m	9,02	9,30	0,27
20 m	8,99	9,20	0,21
30 m	9,01	9,27	0,26
30 m	8,94	9,14	0,20
30 m	8,95	9,13	0,19
30 m	8,97	9,15	0,18
30 m	9,05	9,25	0,20

Bu tablodaki verilere göre Bluetooth 4.2'li sistem RX esnasında ortalama 0,22 μ Wh güç tüketmektedir.

Bluetooth 5 TX esnasında harcanan güç Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.8. Bluetooth 5 TX güç tablosu

Mesafe	SB Güç (μ Wh)	TX Güç (μ Wh)	Fark (μ Wh)
10 m	2,42	2,58	0,16
10 m	2,42	2,59	0,17
10 m	2,41	2,58	0,17
10 m	2,42	2,58	0,16
10 m	2,41	2,58	0,17
20 m	2,42	2,59	0,17
20 m	2,41	2,59	0,18
20 m	2,42	2,58	0,16
20 m	2,42	2,59	0,17
20 m	2,41	2,58	0,17
50 m	2,42	2,59	0,17
50 m	2,43	2,58	0,15
50 m	2,42	2,59	0,17
50 m	2,41	2,58	0,17
50 m	2,42	2,59	0,17
100 m	2,42	2,59	0,17
100 m	2,41	2,58	0,17
100 m	2,42	2,58	0,16
100 m	2,43	2,59	0,16
100 m	2,42	2,59	0,17
150 m	2,42	2,58	0,16
150 m	2,42	2,58	0,16
150 m	2,42	2,58	0,16
150 m	2,43	2,59	0,16
150 m	2,42	2,58	0,16

Bu tablodaki verilere göre Bluetooth 5’li sistem TX esnasında ortalama 0,17 μ Wh güç tüketmektedir.

Bluetooth 4.2 RX esnasında harcanan güç ise Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9. Bluetooth 5 RX güç tablosu

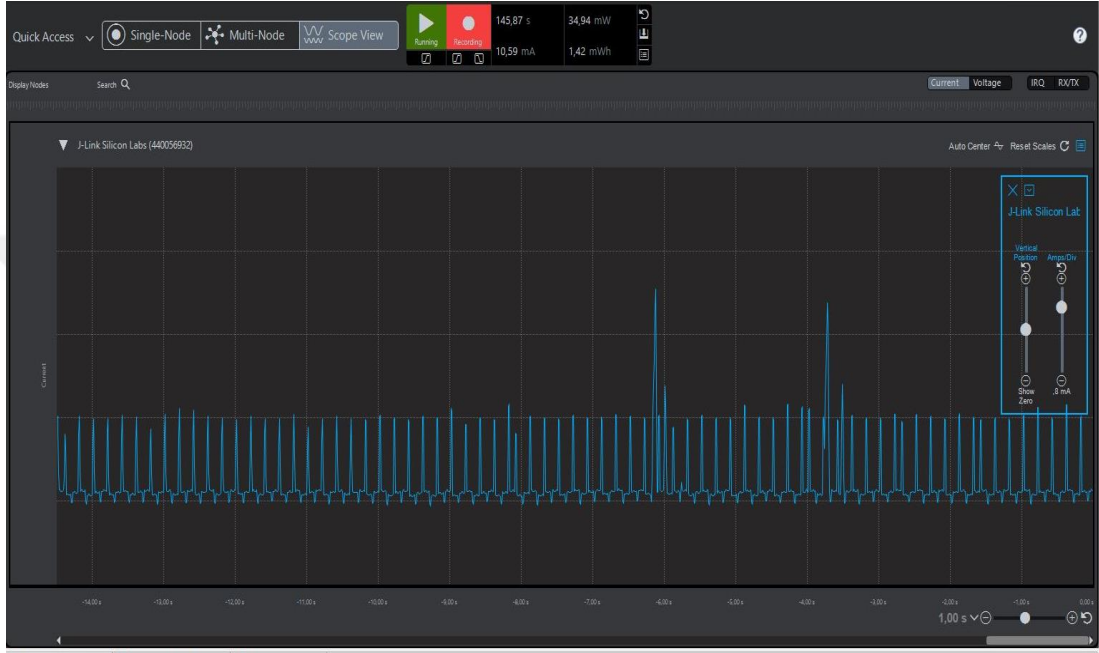
Mesafe	SB Güç (μ Wh)	RX Güç (μ Wh)	Fark (μ Wh)
10 m	2,45	2,56	0,11
10 m	2,45	2,55	0,10
10 m	2,46	2,56	0,10
10 m	2,45	2,56	0,11
10 m	2,46	2,56	0,10
20 m	2,45	2,55	0,10
20 m	2,45	2,56	0,11
20 m	2,45	2,56	0,11
20 m	2,46	2,57	0,11
20 m	2,46	2,56	0,10
50 m	2,45	2,55	0,10
50 m	2,45	2,56	0,11
50 m	2,46	2,57	0,11
50 m	2,46	2,56	0,10
50 m	2,45	2,55	0,10
100 m	2,46	2,56	0,10
100 m	2,45	2,55	0,10
100 m	2,46	2,57	0,11
100 m	2,45	2,56	0,11
100 m	2,46	2,55	0,09
150 m	2,45	2,55	0,10
150 m	2,45	2,56	0,11
150 m	2,45	2,56	0,11
150 m	2,46	2,55	0,09
150 m	2,46	2,56	0,10

Bu tablodaki verilere göre Bluetooth 5’li sistem RX esnasında ortalama 0,1 μ Wh güç tüketmektedir.

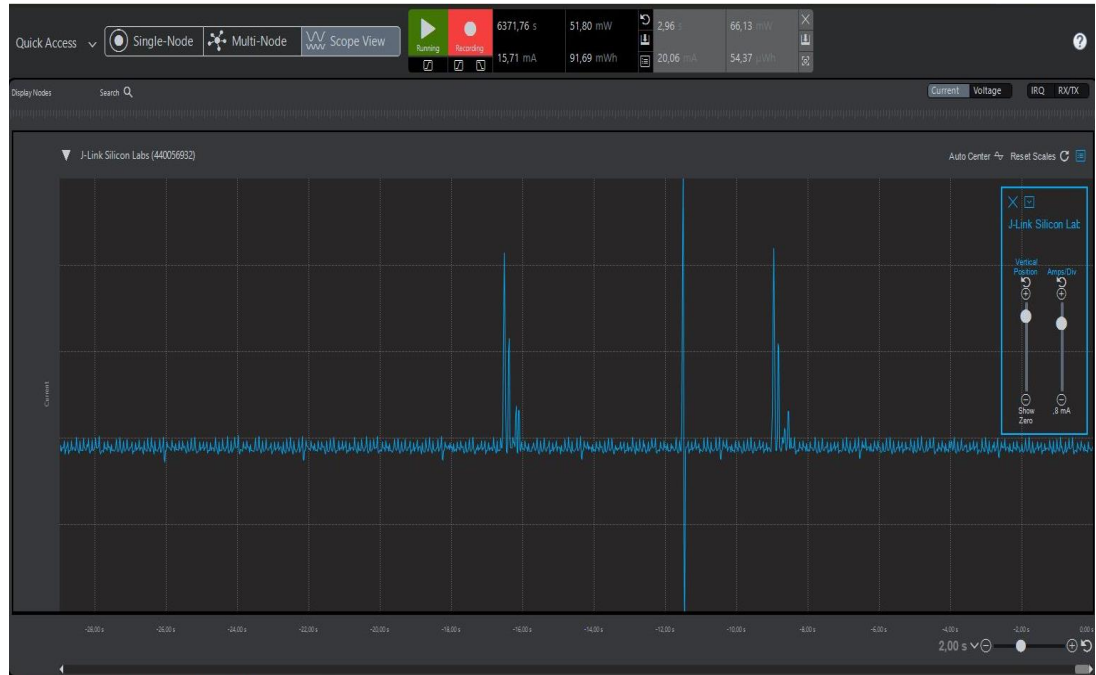
Bluetooth mesh ağında uygulama seviyesinde veri gönderen cihaz olarak ayarlanan sistemler daha düşük güç tüketmektedir. Sadece uygun zamanda sisteme veri gönderip

uyku moduna geçmektedir. Diğer cihazlar ise yayın dinledikleri için periyodik sinyal basmakta ve güç tüketimi bir miktar daha fazla olmaktadır. Eğer sistem sensörlerden veri toplayan bir şekilde kurulursa oldukça düşük güç tüketimine sahip olacaktır.

Şekil 4.12’de Bluetooth 5’te sürekli yayın yapan sistem Şekil 4.13’de ise Bluetooth 5’de veri gönderen sistemin akım grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Bluetooth 5 RX



Şekil 4.13. Bluetooth 5 TX

Uygulama yazılımındaki farklılıklardan dolayı Bluetooth 4.2’de daha uzun süreli veri gönderme hattı dinleme işlemi yapılmaktadır. Şekil 4.14’de Bluetooth 4.2’de RX esnasında harcanan güç ve Şekil 4.15’te TX esnasında harcanan güç ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Bluetooth 4.2 RX



Şekil 4.15. Bluetooth 4.2 TX

Tablo 4.10’da saniyede bir kere, dakikada bir kere ve saatte bir kere veri gönderme ve veri okuma durumunda iki sisteminde bu işlem için harcayacağı enerji miktarları gösterilmiştir. Bu enerji miktarlarına sistemlerin uyku modunda ya da bekleme modunda tükettiği enerjiler dahil değildir. 300 mAh’lık bir pil Bluetooth 4.2’de sadece veri gönderme için kullanıldığında 833.333 kere veri gönderebilir. Aynı şartlarda Bluetooth 5 ise 1.764.705 kere veri gönderebilir. Bu değerleri azaltan etken ise

sistemin beklerken tükettiği enerjidir. Bu veriler ile oluşturulan örnek sistemin 300 mAh kapasiteli bir pil ile yapılan teorik pil hesabı Tablo 4.11’de verilmiştir.

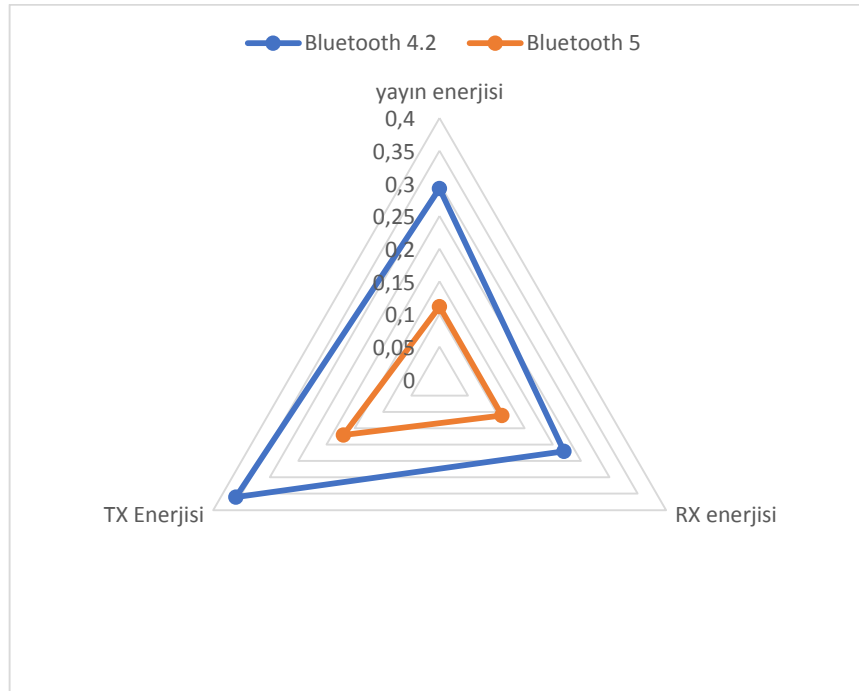
Tablo 4.10. 24 saatlik enerji tüketimi

	TX enerji (μ Wh)	RX enerji (μ Wh)	Saniyede Bir		Dakikada Bir		Saatte Bir	
			TX (μ Wh)	RX (μ Wh)	TX (μ Wh)	RX (μ Wh)	TX (μ Wh)	RX (μ Wh)
Bluetooth 5	0,17	0,11	14688,00	9504,00	244,80	158,40	4,08	2,64
Bluetooth 4.2	0,36	0,22	31104,00	19008,00	518,40	316,80	8,64	5,28

Tablo 4.11. Pil hesabı

	TX akım (mA)	Standby Akım(mA)	Saniyede Bir	Dakikada Bir	Saatte Bir
Bluetooth 5	26,54	0,0022	4,7 gün	266,9 gün	4256 gün
Bluetooth 4.2	26,78	0,0022	2,3 gün	136,67 gün	3390 gün

Bluetooth 4.2’nin ve Bluetooth 5’in yayın enerjisi TX enerjisi ve RX enerjisi Şekil 4.16’da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre Bluetooth 5 daha az güç tüketerek daha uzun mesafede haberleşebilmektedir. PHY katmanında yapılan değişiklikler bunu sağlamıştır.



Şekil 4.16. Bluetooth enerji karşılaştırması

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Bluetooth 4.2. ve Bluetooth 5'in mesh ağ topolojisi altında performansı gerçek bir uygulama üzerinden incelenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda Bluetooth 5'in kapsama alanı, veri aktarımı ve güç tüketimi başarımının daha iyi olduğu görülmüştür. Bluetooth 4.2'de cihazlar arası mesafe 15 metre civarındaki iken veri paketi kaybı yaşamaya başlarken, Bluetooth 5'te 50 metreye kadar herhangi bir veri kaybı yaşamamıştır. Yapılan testlerde Bluetooth 5 ile 150 metrede iki cihaz arasında haberleşme yapılabilmektedir. Bluetooth mesh ağının en büyük avantajlarından birisi olan cihazlar üzerinden kapsama alanı dışındaki cihaza veri gönderebilme özelliği test edilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Kapsama alanı dışındaki cihazlara aradaki cihazlar üzerinden başarılı bir şekilde veri gönderilmiştir. Bu sayede mesh ağı kapsama alanı düşük olan Bluetooth 4.2'nin kapsama alanını yükseltebilmektedir. Aynı şartlar Bluetooth 5 için de geçerli olmaktadır. Bluetooth 4.2 Bluetooth 5'in kapsama alanına birden fazla cihaz üzerinde aktarma yaparak ulaşabilmektedir. Bluetooth 5 daha hızlı bağlantı kurması ve bir pakette daha fazla veri göndermesi ile güç anlamında daha avantajlı hale getirmiştir. Bölüm 4.4 de yayın güçleri ile ilgili karşılaştırma sonucunda Bluetooth 5 daha avantajlı haldedir. Aynı şekilde veri gönderme ve veri alma esnaslarında da Bluetooth 5 daha düşük güç tüketmektedir. Yapılan bu deneysel çalışma ile de gösterilmiştir ki Bluetooth 5 kapsama alanı ve güç tüketimi ile birçok uygulamada kullanılabilir seviyeye gelmiştir. Bluetooth 5.0 ile birlikte gelen yenilikler sayesinde bu teknolojinin Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemlerinde hızla kullanım bulması olasıdır. Birçok mobil cihazın (akıllı telefon, tablet v.b.) dahili Bluetooth desteği sunması ekstra bir protokol dönüştürücü donanıma (gateway) gerek kalmadan uçbirimlere ulaşımı sağlamakta olup bu özellik sayesinde Bluetooth'un IoT uygulamalarda önemli bir avantaj sağlayacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Deng Q., Zhang W., Jiang J., , Short-range Wireless Communication Based On AVR Microcontroller, *IEEE*, DOI:10.1109/CECNet.2012.6201883.
- [2] Seth S, Tekeoglu A., Analyzing the Security of Bluetooth Low Energy, *IEEE*, DOI:10.23919/ELINFOCOM.2019.8706457.
- [3] Sharon P.S., Nagajayanthi B., Enhancing Security In Bluetooth Networks, *IEEE*, DOI:10.1109/ICSEMR.2014.7043560.
- [4] Powell M., Bluetooth Market Update 2018, Bluetooth SIG, https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/03/Bluetooth_Market_Update_2018.pdf, (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2019).
- [5] Powell M., Our History, Bluetooth SIG, <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history/>, (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2019).
- [6] URL-1: http://download.ni.com/evaluation/rf/intro_to_bluetooth_test.pdf, (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2019).
- [7] Güteryüz M. , Bölge Tanımlı Kapalı Alanalar için Düşük Güçlü Bluetooth Konumlama Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 421163.
- [8] URL-2: <https://www.bluetooth.com/specifications/>, (Ziyaret Tarihi : 12 Mayıs 2019).
- [9] Kamath S., Lindh J., Measuring Bluetooth® Low Energy Power Consumption, Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/an/swra347a/swra347a.pdf> , (Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2019).
- [10] Dian F.J., An Analytical Scheme For Power Consumption of Battery-Operated peripheral BLE nodes, *IEEE*, DOI:10.1109/CCWC.2019.8666550.
- [11] Gupta N., *Inside Bluetooth Low Energy* , 2. Baskı, Artech House Publishers, Boston, 2016
- [12] Woolley M, Bluetooth 5 Go Faster. Go Further, Bluetooth SIG, https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/03/Bluetooth_5-FINAL.pdf, (Ziyaret Tarihi : 8 Mayıs 2019).
- [13] URL-3: http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink_cc26x2_sdk_1_60_00_43/docs/ble5stack/ble_user_guide/html/ble-stack-5.x/phy-coded.html, (Ziyaret Tarihi: 12 Mayıs 2019).

- [14] URL-10: <https://www.bluetooth.com/blog/exploring-bluetooth-5-going-the-distance/>, (Ziyaret tarihi: 24 Haziran 2019).
- [15] Yin J, Yang Z, Cao H, Liu T, Zhou Z, Wu C, A Survey on Bluetooth 5.0 and Mesh: New Milestones of IoT, ACM Trans. Sen. Netw, 2019, 15,3,29.
- [16] URL-9: http://dev.ti.com/tirex/content/simplelink_cc26x2_sdk_1_60_00_43/docs/ble5stack/ble_user_guide/html/ble-stack-5.x/gapbondmng.html#privacy, (Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2019).
- [17] URL-5: <https://www.cozumpark.com/temel-ag-topolojileri/>, (Ziyaret tarihi: 4 Mayıs 2019).
- [18] URL-4: <https://www.computerhope.com/jargon/r/ringtopo.htm>, (Ziyaret tarihi: 4 Mayıs 2019).
- [19] Tanrıöven M. H. , Bluetooth ile Mesh Network Oluşturulması ve Menzil Analizinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta, 2019, 536980.
- [20] Woolley M., Bluetooth Mesh Networking, Bluetooth SIG <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/03/Mesh-Technology-Overview.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 13 Mayıs 2019).
- [21] KARAYER M. E. , Görevdeş Ağlarda İtme-Çekme Tabanlı Video Akışlandırma Uygulamaları için Çıkarsamaya Dayalı Alternatif Yol, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2014, 371346.
- [22] LYATUU C. A. , An Analysis of Bluetooth 5 Protocol In Comparision To The Preceding Bluetooth Versions, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018, 540388.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Ergün A., Bluetooth 5 ve Bluetooth 4'ün Mesh Topolojisindeki Performansının Gerçek Bir Uygulama Üzerinde Değerlendirilmesi, *IMASCON 2018, Kartepe Park Otel, Kocaeli, 23-24-25 Kasım 2018*,1738-1743.



ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Kocaeli/Gebze’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gebze’de tamamladı. 2010 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden 2015 yılında mezun oldu. 2015 – 2019 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dal’ında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2016 Yılından beri Arçelik firmasında Uzman Gömülü Yazılım Mühendisi olarak çalışmaktadır.

