

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NESNELERİN İNTERNETİ TEMELLİ UYGULAMALARDA
KULLANILABİLECEK DÜŞÜK GÜÇLÜ KABLOSUZ
HABERLEŞME PROTOKOLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

YİĞİT YAŞAR

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



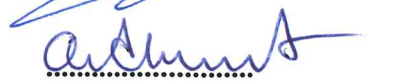
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NESNELERİN İNTERNETİ TEMELLİ UYGULAMALARDA
KULLANILABİLECEK DÜŞÜK GÜÇLÜ KABLOSUZ
HABERLEŞME PROTOKOLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YİĞİT YAŞAR

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 sistemlerinde kullanılan amiral protokoller ile çalışma yapmam için imkân sağlayan ve yönlendiren Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve haberleşme anabilim dalı öğretim görevlisi Prof. Doç. Oğuzhan URHAN'a, çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen Ali ERGÜN ve Ali YAŞAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2019

Yiğit YAŞAR



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ.....	1
1. NESNELERİN İNTERNETİ.....	3
1.1. Nesnelerin İnterneti Nedir?.....	3
1.2. IP Nedir?.....	4
1.3. IPv4 Nedir?.....	6
1.4. IPv6 Nedir?.....	9
2. AĞ TOPOLOJİLERİ.....	13
2.1. P2P (Peer to Peer) Bağlantı.....	13
2.2. Yol Bağlantı (Bus Topology).....	14
2.3. Halka Bağlantı(Ring Topology).....	15
2.4. Yıldız Bağlantı (Star Topology).....	15
2.5. Büyütülmüş Yıldız Bağlantı (Extended Star Topology).....	16
2.6. Ağaç Bağlantı (Tree Topology).....	17
2.7. Mesh Bağlantı.....	18
3. NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN KULLANILABİLECEK YAKIN ALAN HABERLEŞME PROTOKOLLERİ.....	19
3.1. 802.15.4 Standardı.....	19
3.1.1. 802.15.04 P2P topolojisi.....	20
3.1.2. Fiziksel katman (Physical layer).....	20
3.1.3. Medya erişim katmanı (MAC layer).....	21
3.2. 6LowPAN Topolojisi.....	21
3.3. Thread Protokolü.....	22
3.3.1. Thread protokolündeki cihaz türleri.....	23
3.3.1.1. Sınır yönlendirici (Border Routers).....	23
3.3.1.2. Yönlendirici (Router).....	23
3.3.1.3. Yönlendirici uyumlu uç cihazlar (Router Eligible End Devices).....	24
3.3.1.4. Uyuyan uç cihazlar (Sleepy End Devices(SEDs)).....	24
3.4. ZigBee Protokolü.....	25
3.4.1. ZigBee protokolündeki cihaz türleri.....	26
3.4.1.1. ZigBee koordinatörü (ZigBee Coordinator).....	26
3.4.1.2. ZigBee yönlendiricisi (ZigBee Router).....	26
3.4.1.3. ZigBee uç cihaz (ZigBee End Device).....	26
3.5. Bluetooth 5 Protokolü.....	27
4. TEST ORTAMI VE DENEYSEL SONUÇLAR.....	29
4.1. Test Ortamı.....	29

4.2. Testler.....	29
4.2.1. Düğümler arası mesafe ve seyahat hızı testi.....	30
4.2.1.1. Düğümler arası mesafe testi.....	30
4.2.1.2. Seyahat hızı testi.....	31
4.2.2. Kaynak kullanımı testi.....	32
4.2.3. Güç t�keticimi testi.....	33
4.2.3.1. Bluetooth 5.0 g�ç t�keticim testi.....	34
4.2.3.2. Thread g�ç t�keticim testi.....	38
4.2.3.3. Zigbee g�ç t�keticim testi.....	41
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR.....	48
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	54



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	IP protokol temel katmanları	5
Şekil 1.2.	IPv4 paket yapısı	6
Şekil 1.3.	TCP/IP paketinin kapsüllenmesi	7
Şekil 1.4.	TCP/IP paketi	7
Şekil 1.5.	IPv6 paket yapısı	10
Şekil 1.6.	Sonraki başlık dosyası yapısı	11
Şekil 2.1.	Peer to Peer topoloji	13
Şekil 2.2.	Yol topoloji	14
Şekil 2.3.	Halka topoloji	15
Şekil 2.4.	Yıldız topoloji	16
Şekil 2.5.	Genişletilmiş yıldız topoloji	17
Şekil 2.6.	Ağaç topolojisi	18
Şekil 2.7.	Mesh topoloji	18
Şekil 3.1.	802.15.04 Peer to Peer ve Star topoloji	20
Şekil 3.2.	6LowPAN mimarisi	22
Şekil 3.3.	Thread protokol mimarisi	23
Şekil 3.4.	Thread protokolünde ki cihaz türleri	24
Şekil 3.5.	ZigBee mimarisi	25
Şekil 3.6.	ZigBee Cihaz Türleri	26
Şekil 3.7.	Bluetooth 5.0 Mimarisi	27
Şekil 4.1.	nRF52840	29
Şekil 4.2.	Düğüm arası mesafe testi sonuçları	30
Şekil 4.3.	Düğüm arası haberleşme seyahat hızı test sonuçları	31
Şekil 4.4.	Protokoller arası kaynak kullanım sonuçları	32
Şekil 4.5.	SLWSTK6020B Blok şeması	33
Şekil 4.6.	Güç tüketim testlerinin yapıldığı alan	34
Şekil 4.7.	Bluetooth, kapalı alan mesaj alma güç ölçümü	35
Şekil 4.8.	Bluetooth, kapalı alan mesaj yollarken güç ölçümü	35
Şekil 4.9.	Bluetooth, açık alan(20m) mesaj alma güç ölçümü	36
Şekil 4.10.	Bluetooth, açık alan(20m) mesaj yollama güç ölçümü	37
Şekil 4.11.	Thread, kapalı alan mesaj alma güç ölçümü	38
Şekil 4.12.	Thread, kapalı alan mesaj yollama güç ölçümü	39
Şekil 4.13.	Thread, açık alan(10m) mesaj alma güç ölçümü	39
Şekil 4.14.	Thread, açık alan(10m) mesaj yollama güç ölçümü	40
Şekil 4.15.	ZigBee, kapalı alan mesaj alma güç ölçümü	41
Şekil 4.16.	ZigBee, kapalı alan mesaj yollama güç ölçümü	42
Şekil 4.17.	ZigBee, açık alan(10m) mesaj alma güç ölçümü	43
Şekil 4.18.	ZigBee, açık alan(10m) mesaj yollama güç ölçümü	43
Şekil 4.19.	Tüm protokollerin tükettiği akım değerleri	45
Şekil 4.20.	Tüm protokollerin karşılaştırılması	46

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	Bazı protokol değerleri	9
Tablo 1.2.	Ek başlık dosyasının alabileceği değerler	12
Tablo 4.1.	Bluetooth mesaj yollama değerler	37
Tablo 4.2.	Bluetooth mesaj alma değerleri	37
Tablo 4.3.	Thread mesaj yollama güç değerleri	40
Tablo 4.4.	Thread mesaj alma güç değerleri	41
Tablo 4.5.	ZigBee mesaj yollama güç değerleri	44
Tablo 4.6.	ZigBee mesaj alma güç değerleri.....	44
Tablo 4.7.	Protokollerin periyodik veri yollama tüketeceği enerji	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

6LowPAN	: IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (Düşük Güçlü Kişisel Kablosuz Ağlar İçin IPv6)
AEM	: Advanced Energy Monitor(Gelişmiş Enerji Monitörü)
BLE	: Bluetooth Low Energy(Bluetooth Düşük Enerji)
CoAP	: Constrained Application Protocol (Kısıtlı Uygulama Protokolü)
ICMP	: Internet Control Message Protocol(İnternet Kontrol Mesaj Protokolü)
IoT	: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IP	: Internet Protocol(İnternet Protokolü)
IPv6	: Internet Protocol Version 6 (İnternet Protokolü Versiyon 6)
P2P	: Peer to Peer(Uçtan uca)
PHY	: Physical Layer(Fiziksel Katman)
RPL	: Routing Protocol For Low-Power and Lossy Network (Düşük Güçlü Cihazlar İçin Rotalama Protokolü)
SED	: Sleepy End Devices(Uyuyan Uç Cihaz)
TCP	: Transmission Control Protocol(Geçiş Kontrol Protokolü)
UDP	: User Datagram Protocol(Kullanıcı Veri Bloğu Protokolü)

NESNELERİN İNTERNETİ TEMELLİ UYGULAMALARDA KULLANILABİLECEK DÜŞÜK GÜÇLÜ KABLOSUZ HABERLEŞME PROTOKOLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Teknolojinin hızla gelişmesi ile beraber nesnelerin interneti giderek önem kazanmaya başlamış ve farklı çalışma alanındaki ihtiyaçları karşılamaya aday olmuştur. Günümüz teknolojisinde nesnelere İnternet ağına erişerek çeşitli bilgileri alması veya tam tersi bilgileri uzaktaki noktaya yollaması beklenmektedir. Ayrıca nesnelerin bir sistemin parçası olarak birbiriyle de haberleşmeleri gerekebilmektedir. Bu amaçla kullanılabilir düşük güç tüketen protokollerden bazıları Zigbee, Thread ve Bluetooth 5.0'dır. Bu çalışma kapsamında bu protokollerin mesh topolojisini destekleyen ağ protokollerinin güç tüketimi, kaynak kullanımı, haberleşme mesafesi ve düğümler arası seyahat hızı kategorileri altında birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma boyunca bütün protokol için de ortak donanım platformu kullanılmıştır. Böylece protokollerin donanımdan bağımsız olarak karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bluetooth 5.0, Mesh Ağı, Thread, Zigbee.

COMPARISON OF LOW POWER WIRELESS COMMUNICATION PROTOCOLS THAT CAN BE USED IN IOT BASED APPLICATIONS

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) has been gained importance with fast developing technology and is a good candidate for requirements in different areas. Today, objects are expected to access the Internet network for receiving and transmitting various information. It is also needed for them to communicate with each other as part of a system. ZigBee, Thread and Bluetooth5.0 protocols can be used for these purposes. A comparison of these protocols supporting mesh topology in terms of power consumption, resource utilization, communication distance and speed is carried out within the scope of this study. All protocols are implemented on the same hardware platform so that a fair comparison without hardware effect is performed.

Keywords: Bluetooth 5.0, Mesh Network, Thread, ZigBee.

GİRİŞ

Tarih boyu teknoloji kümülatif olarak ilerlemiştir, yani yeni bulunan bir cihaz veya yöntem kendisinden de yeni teknolojilerin doğmasına sebep olmuştur, bu savın bir sonucu olarak “Moore Yasası” [1] gösterilebilir. Böyle bir ilerleme teknolojinin ivmelenerek sürekli gelişmesini sağlamıştır. Günümüz dünyasında artık bir kuşak önce insanlar tarafından yapılan işlerin çoğu artık makineler tarafından veya makine yardımıyla yapılmaktadır. Makinelerin hayatımıza bu denli girmesi onların kontrolünün ve gerektiği zaman kendi aralarında haberleşmelerini gerekli kılmıştır. Örneğin insansız hava araçları uzaktan kontrol edilerek hedefe yönlendirilir olası bir kaza ve saldırı sonucu hiç kimse can kaybına uğramaz. Diğer bir senaryo ise şöyle olabilir; birden fazla insansız hava aracı ortak bir görev için ilgili bölgeyi tarayıp, hangi bölgelerin tarandığını birbirlerine bildirebilir ise görev daha kısa süre içerisinde başarılı biçimde tamamlanabilir. Bunun gibi birçok ihtiyacın karşılanabilmesi için kablosuz haberleşmenin gelişmesi ve uygulanabilirliğinin artırılması gereksinimi doğmuştur.

Zaman içerisinde IoT için mevcut çeşitli protokollerin kullanılmış, bunun yanı sıra çeşitli ihtiyaçlara göre yeni protokoller de tasarlanmıştır. Böylece daha etkin IoT sistemleri geliştirilmiş ve güç tüketimi, düğümler arası seyahat hızı ve haberleşme mesafesi açısından daha da verimli cihazlar ortaya konmuştur. IoT cihazların birbirleri ile haberleşmesi için kullanılan protokoller yıldız (Star), ağaç (Tree) gibi görece basit topolojilerin yanı sıra mesh (örgü) ağı topolojisi de kullanabilmektedir. Mesh topolojisinde bir cihaz komşusu olan bütün cihazlarla haberleşebilmekte olup bu yaklaşım sistemlerin verimliliğini yükseltebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında IoT sistemlerin birbirleri ile haberleşmesi amacıyla kullanılan Thread, ZigBee ve Bluetooth5.0 protokolleri çeşitli test senaryolarında çalıştırılmıştır. Bu senaryoların amacı protokolleri güç tüketimi, düğümler arası seyahat hızı ve kaynak kullanımı bakımından karşılaştırarak, protokollerin IoT uygulamaları açısından güçlü ve zayıf taraflarının tespit edilmesidir.

Tezin 1. bölümünde Nesnelerin İnterneti hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bunun yanı sıra IPv4 ve IPv6 detaylı bir biçimde açıklanmıştır. Tezin 2. bölümü gerek Nesnelerin İnterneti dünyasında gerek ise diğer ağ uygulamalarında kullanılan popüler ağ topolojileri anlatılmıştır. Tezin 3. bölümünde Nesnelerin İnterneti uygulamalarında kullanılacak önceden belirlenmiş yakın alan haberleşme protokolleri ve bu protokollerin kullanıldığı önemli standartlar ve topolojiler açıklanmıştır. Tezin 4. bölümünde belirlenen protokollerin hangi başlıklarda test edileceği ve bu testlerin hangi ortamlarda gerçekleştirileceği açıklanmıştır öte yandan yapılan test çalışmalarının sonuçları da bu bölümde paylaşılmıştır.



1. NESNELERİN İNTERNETİ

1.1. Nesnelerin İnterneti Nedir?

Internet of Things (IoT), teknoloji alanında son zamanların en popüler konularından biri olup, Türkçe'ye genellikle "Nesnelerin İnterneti" olarak çevrilmiştir. Burada nesneden kasıt çeşitli elektronik cihazlardır. IoT, bu elektronik nesnelerin İnternet üzerinden veri alıp vermesi ile oluşan büyük ekosistemin genel adıdır. Bu alt yapı cihazlara insan müdahalesinin asgari düzeye indirerek daha hızlı, verimli ve otonom sistemlerin oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu doğrultuda IoT tabanlı çalışan cihazların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Önemli araştırma firmalarından biri olan Gartner'ın konu ile alakalı yapmış olduğu araştırma sonucuna göre 2020 senesine kadar yaklaşık olarak 24 milyar cihaz IoT tabanlı çalışacaktır [3].

1999 yılında MIT'nin Auto-ID Merkezi'nin kurucularından olan Kevin Ashton tarafından IoT[2] fikrini ortaya atması, daha sonrasında etrafında geniş destekçi toplanması ile IoT fikri yayılmaya başlamıştır. Kevin Ashton'un IoT fikri, cihazlar arası bağlantı kurmak için radyo frekansı tanıma teknolojisini (RFID) kullanma üzerine odaklanmak üzerineydi. Ancak günümüzdeki anlamını bu tanımdan biraz daha farklı olup en önemli farklılıklardan biri cihazlar arasındaki haberleşme IP ağı üzerinden sağlanmasıdır. Ancak konsept olarak, anlatılmak istenin yapı günümüz IoT anlayışı ile örtüşmektedir. İkisi de cihazların birbirleriyle haberleşmesi yapısını odağında barındırmaktadır.

IoT cihazları hemen hemen bütün sektörler de hayatımıza girmeye devam ediyor ve gelecekte de birçok alanda hayatımızı kolaylaştırmaya yardımcı olacaktır. Ancak şu an için bu cihazların günümüzde aktif olarak kullanıldığı bazı uygulamaları inceleyelim.

Çevre: 7 küsur milyarlık nüfusu ile Dünya, doğal kaynaklarının yönetimi açısından büyük bir problem haline gelmektedir. Nüfus artışına bağlı çevreyi korumak ise daha da zor bir hal almaktadır. Öte yandan IoT, temiz su, hava kirliliği, katı atık depolama sahası ve orman kaybı gibi problemlere çözüm üretmek için eşsiz fırsatlar sunabilmektedir. Örneğin IoT tabanlı sensörlü sistemler ile çöp konteynırlarından veri toplanarak ilgili

birimlerin zamanında bu bölgeye yönlendirilmesi sağlanabilmektedir. Çevreye bağlı tehditlerin bazıları karmaşık olabilmektedir, fakat IoT bunun için burada diyebiliriz. En azından sorunu teşhis edip, ölçümlemek IoT sayesinde mümkün olabilmektedir. Buna örnek proje olarak Air Quality Egg[4], BigBelly[5] ve Evreka[6] gibi projeler gösterilebilir.

Tarım: IoT, tarımsal üretimi arttırmak için her adımın gözlemlenebildiği akıllı tarlalar kurulmasına olanak sağlayabilmektedir. Buna ek olarak, gıda güvenliği açısından IoT'nin sunduğu veri tabanlı çözümler tüketicilere yedikleri yemeğin dahi takibini yapabilme seçeneği sunmaktadır. Örnek olarak Agritech[7] ve Libelium [8] gibi projeler gösterilebilir.

Enerji: Nüfus ve talep artışına bağlı olarak, global enerji tüketiminin giderek yükseldiği bir dönemde, IoT'nin bu konuda da faydalı olacağı değerlendirilmektedir. IoT, global enerji sorununa; temiz enerji teknolojileri üreterek ve hali hazırdaki ürünlerin verimliliğini optimize ederek katkıda bulunmaktadır. Akıllı ev konseptlerinin birçoğu bu amacı esas alarak çalışmaktadır. Örnek olarak Nest[9] ve Smarthings[10] gibi projeler gösterilebilir.

1.2. IP Nedir?

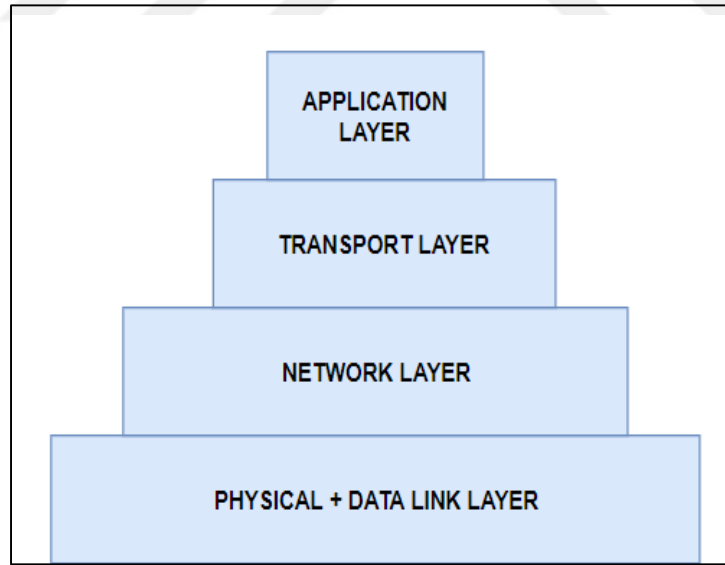
Internet'in ortaya çıkışı Amerikan Federal Hükümeti Savunma Bakanlığı'nın araştırma ve geliştirme kolu olan "Savunma İleri Düzey Araştırma Projeleri Kurumu"na (DARPA - Defense Advanced Research Project Agency) dayanır. 1969'da çeşitli bilgisayar ve askeri araştırma projelerini desteklemek için Savunma Bakanlığı ARPANET adında paket anahtarlamalı bir ağ tasarlamaya başladı. Bu ağ, ABD'deki üniversite ve araştırma kuruluşlarının değişik tipteki bilgisayarlarını da içerecek büyüdü. 1973 yılında, ağ için bir protokol seti geliştirmek amacıyla Stanford Üniversitesi'nde daha sonra BBN (Bolt Beranek ve Newman)'in ve University College, London'ın da dahil olduğu bir internetworking projesi başlatıldı.

IP protokol ailesinin ilk temelleri Vint Cerf ve Bob Kahn tarafından 1974 yılında önce TCP daha sonra IP biçiminde tasarlanmaya başlanmıştır. 1978'e kadar "İletim Kontrol Protokolü"nü (TCP - Transmission Control Protocol) dört uyarlaması geliştirildi ve denendi. 1980'de bu küme sabitleşti ve ARPANET'e bağlı bilgisayarlar arasındaki

iletişimi kolaylaştırdı. 1983'te tüm ARPANET kullanıcıları İletim Kontrol Protokolü/İnternet Protokolü (TCP/IP) olarak bilinen yeni protokole geçiş yaptılar ve bununla birlikte bu ağın popülaritesi de giderek artmaya başlamıştır. O yıl TCP/IP, ARPANET'i de içeren Savunma Bakanlığı İnternet'inde kullanılmak üzere standartlaştırıldı. ARPANET, Haziran 1990'da kullanımdan kaldırıldı. Yerini ABD, Avrupa, Japonya ve Pasifik ülkelerinde ticari ve hükümet işletimindeki omurgalar (backbone) aldı. ARPANET'in kaldırılmasına rağmen, TCP/IP protokolü kullanılmaya devam etti ve gelişti.

İnternet, bilgisayar ve haberleşme dünyasını daha önce hiç görülmedik bir şekilde etkilemiştir. Telgraf, telefon, radyo ve bilgisayarın icadı ile bu hizmetler entegre hale getirilmiştir. İnternet, dünya çapında bir yayın özelliği, bilgilerin paylaşımı için bir mekanizma ve coğrafi yerlerinden bağımsız olarak bilgisayarları birbirine bağlayan bir ortamdır [11].

IP protokol ailesinin temel protokolleri dört katmandan oluşmaktadır[12]. Bu katmanlar Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. IP protokol temel katmanları

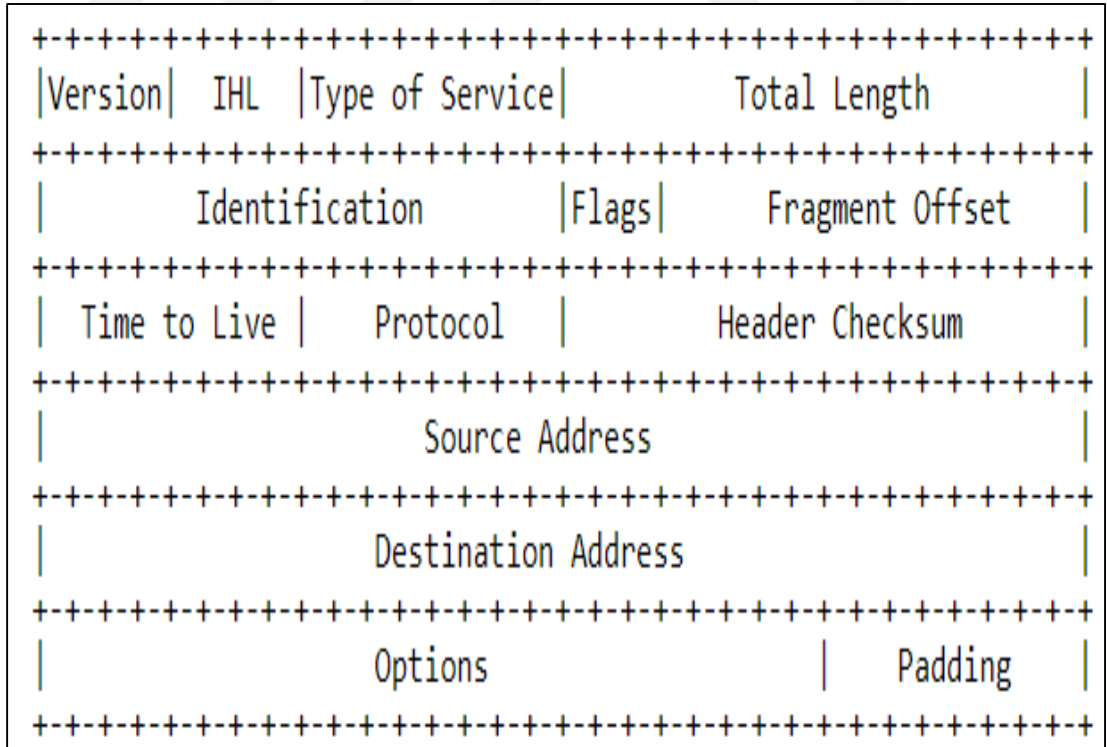
IP (Internet Protocol) açık bir protokol ailesidir. Burada "açık"lık hiçbir şirketin malının olmadığı, bağımsız konsorsiyumlar tarafından yönetildiği anlamına gelmektedir. Ayrıca dokümanlar herkes tarafından paylaşılmakta ve isteyen kişiler önerilerde bulunabilmektedir. Protokolün ilk ciddi gerçekleştirimi soket API'leriyle BSD sistemlerinde yapılmıştır [11]. IP protokol ailesi geniş bir ailedir, ailenin en önemli

taban protokolü IP (Internet Protocol) protokolüdür. Zaten aileye ismini bu protokol vermiştir. IP protokolü paket anahtarlama (packet switching) bir protokoldür [11]. IP protokolünde adresleme artık fiziksel değil mantıksaldır. IP protokol ailesinde ağa bağlı her birime “host” denilmektedir. IP protokolünde her host'un IP adresi denilen mantıksal bir adresi vardır. Mantıksal adres bunun donanımsal olarak belirlenmediği yazılımsal olarak atandığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla mantıksal adresler dinamik, fiziksel adresler statiktir. Mantıksal adresler bir host ağa dahil olduğunda host'a atanmaktadır.

1.3. IPv4 Nedir?

IPv4 ilk olarak Ocak 1980 yılında RFC760 ile tanımlanmıştır, daha sonra Eylül 1980 yılında RFC791 ile tanımı genişletilmiştir. IPv4 adresleme için 4 byte yani 32 bitlik bir alan kullanılır bu da $4.294.967.296$ (2^{32}) cihazın adreslenmesine imkân vermektedir.

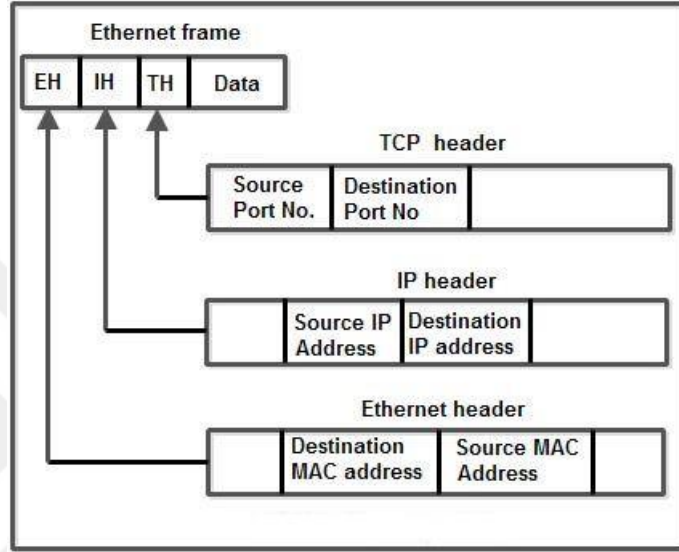
IP protokolü paket anahtarlama bir protokoldür. IP paket yapısı Şekil 1.2’de verilmiştir.



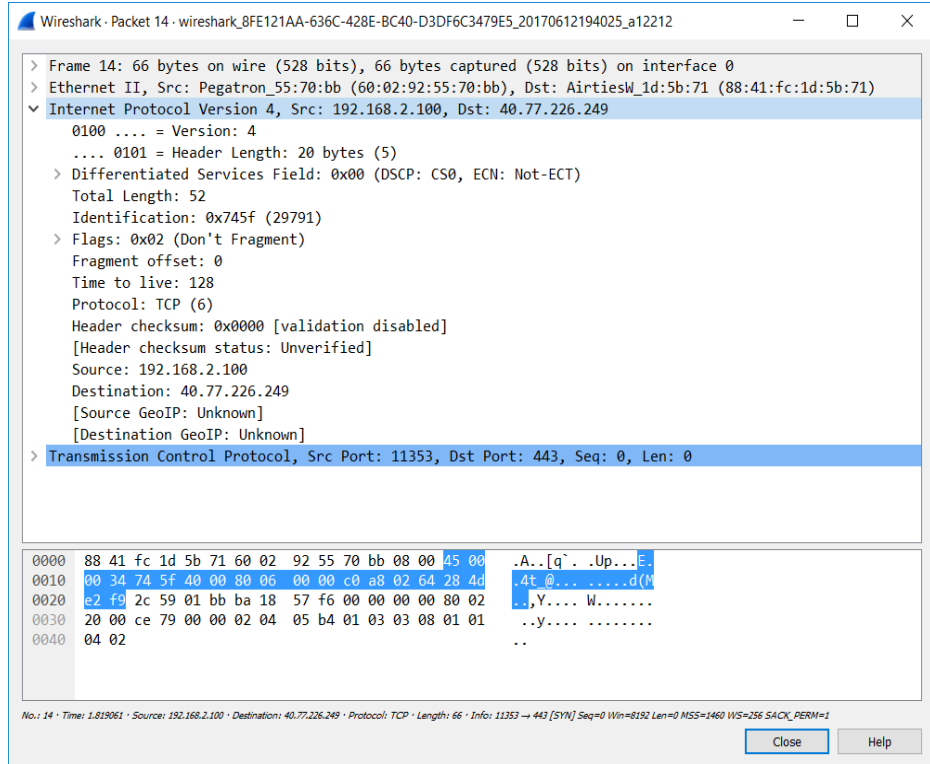
Şekil 1.2. IPv4 paket yapısı [13]

IP ailesinde ve genel olarak network katmanı protokollerinde gönderilip alınan verilere “datagram” da denilmektedir.

IP paketindeki bütün alanların özel bir anlamı bulunmaktadır. Şekil 1.4’de Wireshark kullanılarak elde edilmiş bir TCP/IP paketi paylaşılmıştır. Bu TCP/IP paketinin içerisinde bir Ethernet frame’i ve IP datagram verisi elde edilmiştir. Ethernet frame’i başında bir Ethernet başlığı bulunmaktadır. Aynı şekilde IP datagram verisinde ayrı bir başlığı bulunmaktadır. TCP/IP paketinin kapsülleme (encapsulation) yapısı Şekil 1.3’de paylaşılmıştır.



Şekil 1.3. TCP/IP paketinin kapsülleme



Şekil 1.4. TCP/IP paketi

- Başlığın ilk byte'ının yüksek anlamlı 4 biti versiyon numarasını belirtir. IPv4 için burada 4 bulunur.
- Başlığın ilk byte'ının düşük anlamlı 4 biti IP başlığının uzunluğunu belirtir. Buradaki değer 4 ile çarpılmalıdır (başka bir deyişle burada başlıkta kaç tane 4 byte olduğu bilgisi vardır.) IP başlığının en küçük uzunluğu 20 olabilir. Bu durumda bu alanda 5 değerini görmeliyiz. Bu alandaki en büyük değer 15 olabileceğine göre IP başlığının maksimum uzunluğu da 60 byte olabilir.
- IP başlığının ikinci byte'ı "servis türü (service type)" bilgisini içerir. Bu alanda zamanla bazı revizyonlar yapılmıştır. Buradaki byte bitlere ayrıştırılarak yorumlanmaktadır. Düşük anlamlı 2 bit kullanılmaz. Geriye kalan yüksek anlamlı 6 bite "code point" denilmektedir. Bu 6 bitin düşük anlamlı 3 biti 0 ise yüksek anlamlı 3 biti IP paketinin öncelik derecesini belirtmektedir. Bazen yönlendiriciye (router) kendi kuyrukları dolduğunda bazı paketleri atmak (discard) etmek zorunda kalabilirler. İşte bu durumda en düşük öncelikli paketler atılır (discard edilir). Eğer 6 bitin düşük öncelikli 3 biti sıfır değilse yüksek öncelikli bitleri servis türünü belirtmektedir.
- IP başlığının sonraki WORD değeri IP paketinin başlık kısmı dahil olmak üzere toplam uzunluğunu belirtir. Buradan da görüldüğü gibi IP paketi en fazla $2^{16} - 1 = 65535$ byte olabilir. Tabii bunun içerisine başlık kısmı da dahildir. Paketteki veri kısmının uzunluğu buradaki bilgiden başlık uzunluğun çıkartılmasıyla elde edilir.
- Başlığın "Identification", "Flags" ve "Fragmentation Offset" elemanları IP paketinin parçalandığı durumda parçalama hakkında bilgiler vermektedir. Bu konu ileride ele alınacaktır.
- Başlığın "Time To Live" kısmı IP paketinin yolunu kaybetmesi durumunda atılmasını sağlamak için düşünülmüştür. Tipik olarak kaynak yönlendiriciye buraya bir değer yazar (diyelim ki 15) sonra her yönlendiriciye bunu diğerine göndermeden önce 1 eksiltir. Bu değer 0'a geldiğinde ilgili yönlendirici artık paketi yönlendirmeyi bırakır ve bu paketi atar (discard eder). Tabii normalde rotalama (router) mekanizmasında böyle bir durumla karşılaşılması öngörülmemektedir. Ancak yönlendiriciye yönlendirme tabloları bozulmuş olabilir. Bu durumda paket yolunu kaybedebilir. Bir paketinde sürekli olarak ağda dolaşması gereksiz bir yük oluşturur. İşte bu alan belli bir noktadan sonra paketi atmak için kullanılmaktadır [14].
- Başlığın "Protocol" alanı bir byte uzunluktadır. Buraya IP paketinin veri kısmında bulunan üst düzey protokol bilgisi yerleştirilir. Örneğin bir TCP paketi yukarıda da

belirtildiği gibi aslında IP paketinin veri kısmına bulunmaktadır. İşte o halde bu “protocol” alanında TCP protokolünü belirten değer bulunur. Hangi 8 bir değer hangi protokolü belirttiği önceden belirlenmiştir. Bazı değerler Tablo 1.1 de görülmektedir:

Tablo 1.1. Bazı protokol değerleri

Protocol	Value
ICMP	1
IGMP	2
TCP	6
UDP	17
OSPF	89

- “Header Checksum” alanı paket bilgilerinin yolda bozulup bozulmadığını anlamak için kullanılmaktadır.

- Başlığın “Source IP” ve “Destination IP” elemanları IP paketinin çıktığı ve hedeflendiği host’u belirtmektedir. Bu alanlar paketin yolculuğu sırasında hiç değişmemektedir. Paket hedefe vardığında paketin hangi host tarafından gönderilmiş olduğu bilinmek zorundadır.

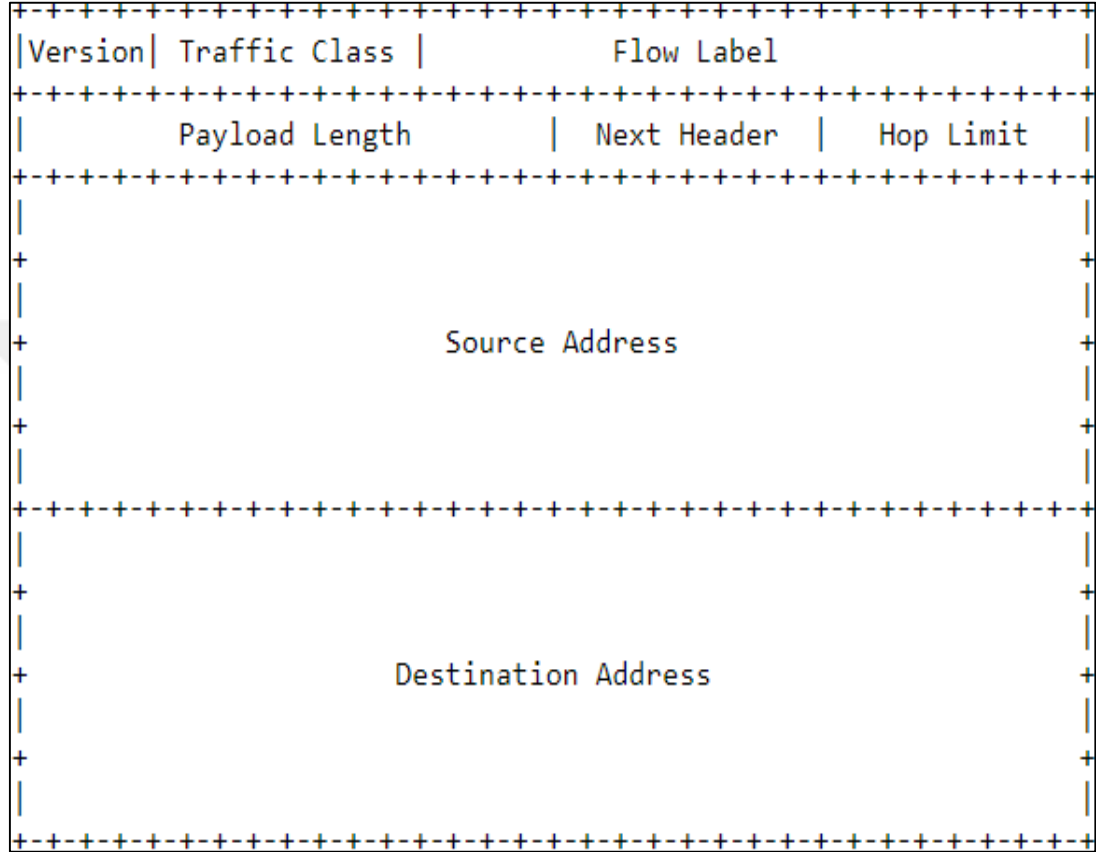
1.4. IPv6 Nedir?

IPv6’nın esas doğuş amacı IPv4’nin cihazları adresleme de yetersiz kalmasıdır. Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi IPv4 4byte (32 bit) adresleme alanı kullandığı için 4.294.967.296 (2^{32}) cihaza kadar adresleme yapabilmektedir. Ancak IPv6 da ise adresleme alanı 16 byte (128 bit) adresleme alanı kullanılır [15] bu da;

$2^{128} = 340.282.366.920.938.463.463.374.607.431.768.211.456$ cihaza kadar adresleme yapılabilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra IPv6’nın getirdiği diğer avantajlar şu şekildedir [15].

- IPv6 de başlık yapısı da yenilenmiştir, sabit uzunlukta bir başlık yapısı tasarlanmıştır.
- Uzantı Başlıkları adı altında ayrı bir bölüm oluşturulmuştur.
- Adres atama servisi olmaksızın, adres edinebilme mümkündür.

Şekil 1.5 de IPv6 başlık yapısı gösterilmiştir[15].



Şekil 1.5. IPv6 paket yapısı[15]

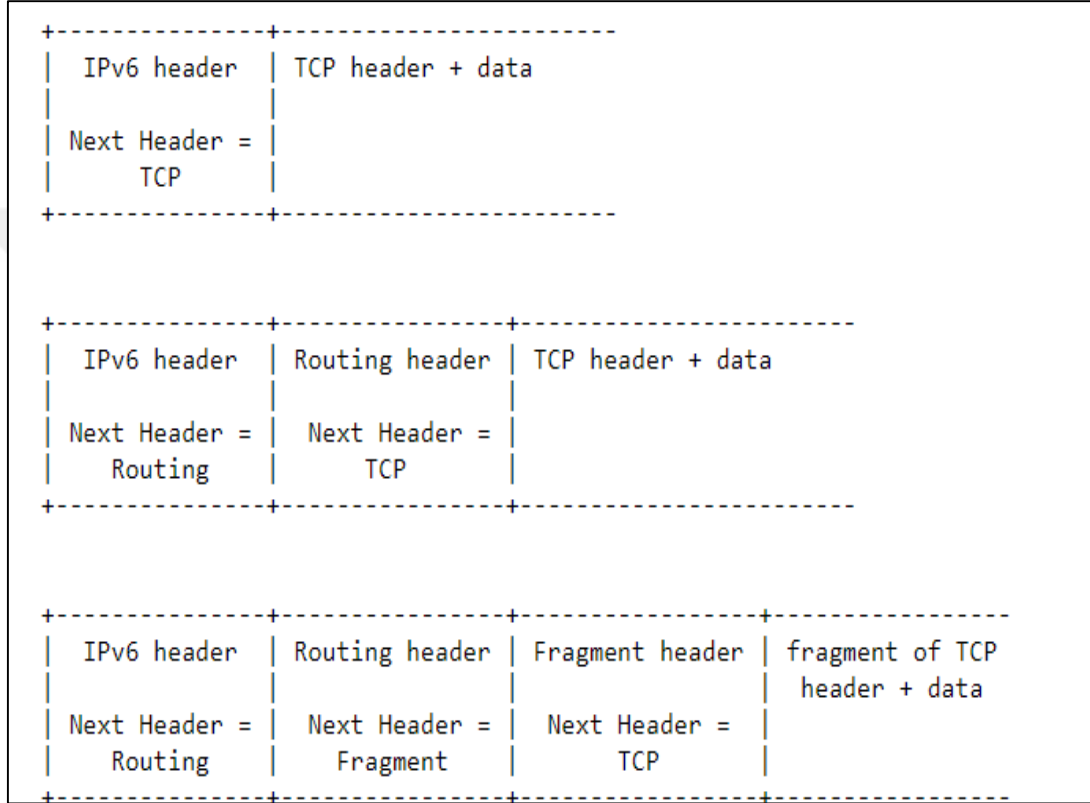
Version: 4 bitlik Internet Protocol versiyon numarasını belirtir.

Traffic Class: 8 bitlik Trafik Sınıf (Traffic Class) alanı; IP paketinin taşıdığı veri türüne göre yönlendirme sırasında

Flow Label: 20 bitlik Akış Etiketi (Flow Label); IP paketinin hedef IP'ye hangi yol ile ulaşacağını bilgisi tutulur. Paketlerin birbiriyle çakışmaması için bir paket hedef IP'ye ulaşmadan gönderilecek başka bir pakete aynı akış etiketi verilmez. Bu değer ile yönlendirme tablosuna her paket için bakılması gerekliliği ortadan kaldırılır.

Payload Length: 16 bit uzunluğunda ki Payload Length; Ek başlık bilgisi ile verinin toplam boyutudur. Eğer 65536 byte'tan büyükse bu bölüm 0 olarak görünür ve paket boyutu sıçrama seçenekleri ek başlık bilgisinde bulunur.

Next Header: 8 bitlik alan kaplayan Sonraki başlık (Next Header) alanı; Eğer başlık bilgisinde ek başlık bulunmuyorsa, IPv4'teki protokol numarası kısmına karşılık gelir. Yani bu kısım bir üst katman bilgisini göstererek, paket başlığının TCP mi yoksa UDP mi olduğunu gösterir. Eğer ek başlık var ise sonraki başlıktan sonra gelecek olan ek başlığın türünü gösterir. IP paketinde bulunan en son ek başlıktan sonra bulunan sonraki başlıkta ise yine üst katman bilgisi bulunur. Şekil 1.6 de ilgili kısım gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Sonraki başlık dosyası yapısı [15]

Ek başlık dosyalarının alabilecekleri ve karşılık geldikleri değerler Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

Hop Limit: 8 bit alana sahip olan Sıçrama Limiti (Hop Limit); IP paketinin en fazla kaç yönlendiriciye üzerinden geçeceğini belirtir, paket her yönlendiriciye (router) üzerinden geçişinde alandaki değer bir azalttırılır, değer sıfıra ulaştığında IP paketi atılır (discard).

Source Address: 128 bitlik alana sahip Kaynak Adresi (Source Address); IP paketinin gönderildiği kaynağın IP adresini içerir.

Destination Address: 128 bitlik alana sahip Hedef Adresi (Destination Address); IP paketinin gönderildiği hedefin IP adresini içerir.

Tablo 1.2. Ek başlık dosyasının alabileceği değerler

Value (in decimal)	Header
0	Hop-by-Hop Options Header
6	TCP
17	UDP
41	Encapsulated IPv6 Header
43	Routing Header
44	Fragment Header
46	Resource ReSerVation Protocol
50	Encapsulating Security Payload
51	Authentication Header
58	ICMPv6
59	No next header
60	Destination Options Header

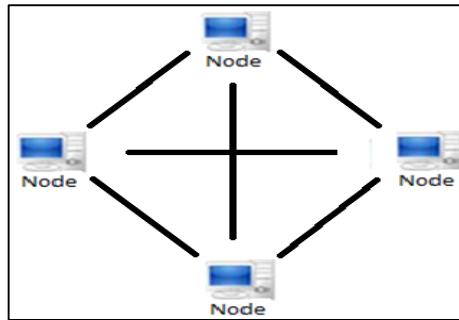
2. AĞ TOPOLOJİLERİ

Bir ağda ki cihazların fiziksel ve mantıksal olarak nasıl etkileşim kurulacağını belirten genel yapıdır. Genel olarak birçok ağ topolojisi mevcuttur ancak bu doküman içerisinde yalnızca çalışma yapılan ağ topolojileri ele alınmıştır.

2.1. P2P (Peer to Peer) Bağlantı

Tasarlanan hizmeti sağlamak için sistemi oluşturan unsurların kaynaklarını paylaşması durumunda sistemin Peer to Peer olarak düşünebiliriz [16]. Uçtan uca (Peer to Peer) 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, oluşan trafiğin Peer to Peer mekanizmasında daha az oluşmasıdır, çünkü cihazlar server üzerinden değil doğrudan birbirleriyle iletişim kurar. Peer to Peer topolojisinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Peer to Peer topolojisinde cihazlar doğrudan birbirleriyle iletişim kurdukları için merkezi yönetim kurabilmek mümkün değildir.
- Cihazlar kendi kaynaklarını diğer istemcilerle paylaşabildiği için desteklenebilecek cihaz sayısı da sınırlıdır.
- Peer to Peer sistemler kurulmuş bir alt yapının olmadığı sistemlerde kullanışlı olabilir, Ad Hoc sistemler gibi [16]. Temsili bir Peer to Peer topolojisi Şekil 2.1 de paylaşılmıştır.



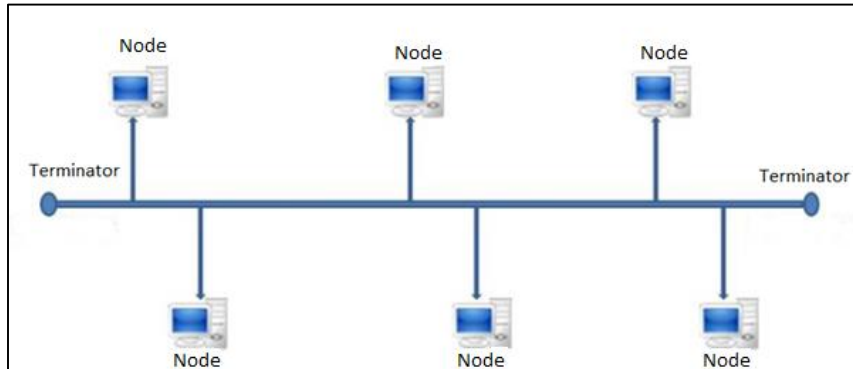
Şekil 2.1. Peer to Peer topoloji

2.2. Yol Bağlantı (Bus Topology)

Yol bağlantıda tüm cihazlar ortak bir doğrusal hatta bağlıdır. Her cihazın adı is Node(Düğüm) olarak nitelendirilir. Bu doğrusal hattın literatürdeki adı backbone(omurga)'dır diğer adı ise trunk'dır. Genel olarak Yol topolojisinde mesaj tüm Node cihazlar tarafından alınır ve mesajın kendilerine yollanıp yollanılmadığını kontrol ederler, mesaj kendilerine gelmiş ise buna göre cevap verirler eğer mesaj kendilerine gelmemiş ise hiçbir cevap vermezler[17]. Yol hattı terminator(sonlandırıcı) ile sonlandırılır aksi takdirde mesajın hatta geri yansması söz konusudur, bu da hatta gereksiz trafiğe yol açabilmektedir. Yol topolojisinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yol topolojisi, kurulum maliyetleri bakımından avantajlıdır,
- Ancak hattadaki cihaz sayısının artması haberleşme performansını düşürmektedir, bunun sebebi hattadaki cihazların herhangi bir zamanda veri yollayabilmesidir, cihaz sayısı arttıkça veri yollarken oluşabilecek collision (çarpışma) ihtimalinin de yükselmesidir. Bu tür çakışmaların engellemek için genellikle bir erişim kontrol protokolü kullanılır. (Örneğin; Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection (CSMA/CD)).
- 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 etkilenmekte ve haberleşme durabilmektedir. Bu da önemli bir dezavantajdır [17].

Temsili bir Yol Topolojisi Şekil 2.2 de paylaşılmıştır.



Şekil 2.2. Yol topoloji[29]

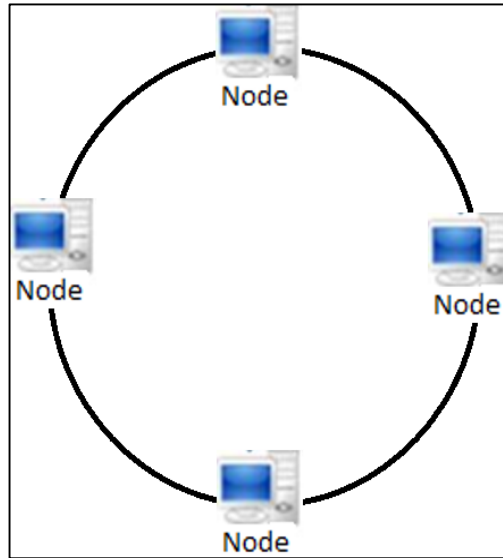
2.3. Halka Bağlantı(Ring Topology)

Halka bağlantı topolojisinde cihazlar birbirlerine bağlanarak bir döngü oluşturmaktadır. Bu bağlantı tipinde her cihaz 2 cihazla bağlantı kurabilir ve ağdaki tüm cihazlar birbirine bağlanmış olur. Gönderilecek veri hedefe ulaşana kadar bir düğümden diğerine aktarılır. Halka topolojisinin avantajları:

- Tüm veriler bir yönde akar ve paket çarpışma ihtimalini azaltır.
- Düğümler 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:

- Ağ üzerinden aktarılan tüm veriler ağdaki her iş istasyonundan geçmelidir, bu da onu bir yıldız topolojisinden daha yavaş hale getirebilir.
- Bir iş istasyonu kapanırsa tüm ağ etkilenir.
- Her bir iş istasyonunu ağa bağlamak için gereken donanım Ethernet kartlarından ve hublarından / anahtarlarından daha maliyetlidir.



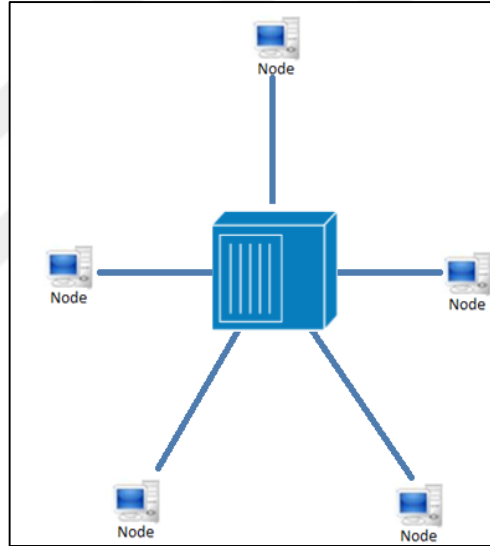
Şekil 2.3. Halka topoloji

2.4. Yıldız Bağlantı (Star Topology)

Yıldız bağlantı topolojisinde, her Node birbirinden bağımsız olarak, merkezi bir Switch veya Hub işlevine sahip bir cihaza bağlanarak haberleşmesi ile çalışır. Veri

hedefe ulaşabilmek için bu cihazdan geçer. Ağın tüm fonksiyonlarını bu Switch veya Hub cihaz gerçekleştirir. 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. Temsili bir Yıldız Topolojisi Şekil 2.4'te paylaşılmıştır.



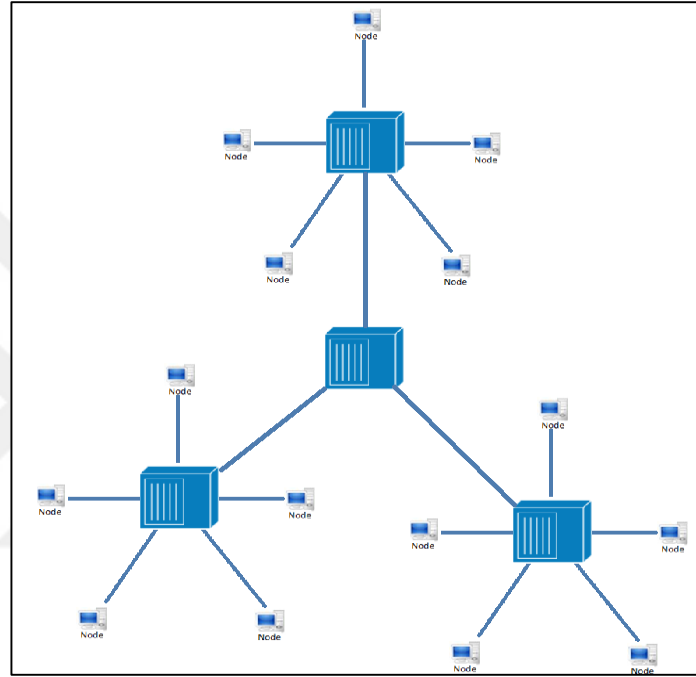
Şekil 2.4. Yıldız topoloji

2.5. Büyütülmüş Yıldız Bağlantı (Extended Star Topology)

Büyütülmüş Yıldız Bağlantı, birden fazla yıldız topoloji ile çalışan ağın birbirine yine bir merkez düğüm etrafında bağlanarak haberleşmesi olarak tanımlanabilir. Veri önce kendi merkezindeki Switch veya Hub cihaza gider eğer aynı alt ağdaki bir cihaza mesaj gidecek ise bağlı olduğu merkezde ki Switch veya Hub cihaz ilgili cihaza mesajı aktarır. Eğer mesaj yollanan cihaz aynı alt network'te değil ise veri önce cihazın bağlı alt ağda ki merkezi birime gider. Buradan da ağın alt ağlarının bağlı olduğu merkezi birime gönderilir. Buraya kadar ulaşan veri hedef cihaz hangi alt ağda ise onun merkezi birimine yönlendirilir. Veriyi alan merkezi birim elemanı ilgili cihaza veriyi iletir.

Genişletilmiş Yıldız Topolojisinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Bağımsız alt ağlar oluşturulabilir.
- Merkezdeki Hub veya Switch cihazının performansı ağda ki tüm cihazların haberleşme performansını etkiler.
- Arızalı cihaz tespiti kolaydır ve başka bir Node'daki arızadan etkilenmez. Temsili bir Genişletilmiş Yıldız Topolojisi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Genişletilmiş yıldız topoloji

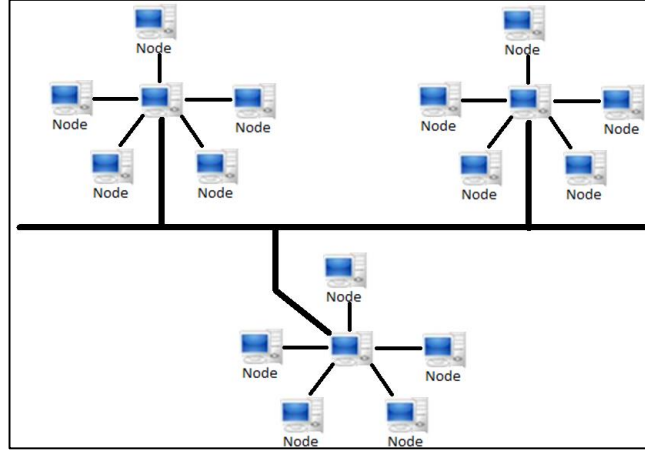
2.6. Ağaç Bağlantı (Tree Topology)

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. Bu yapının avantajları;

- Her bir segment için noktadan noktaya bir bağlantı yapısı kullanılır, böylece segmentlerde 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.



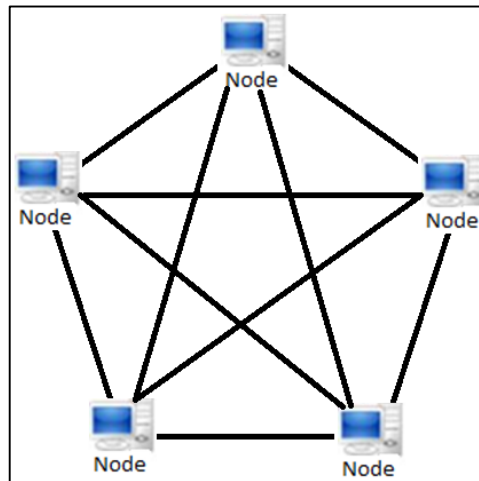
Şekil 2.6. Ağaç topolojisi

2.7. 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.

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. Mesh topoloji

3. NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN KULLANILABİLECEK YAKIN ALAN HABERLEŞME PROTOKOLLERİ

Bu bölümde Nesnelerin İnterneti için kullanabilecek yakın alan kablosuz haberleşme protokolleri ve onların kullandığı önemli standartlar incelenecektir.

3.1. 802.15.4 Standardı

IEEE 802.15.4, düşük hızlı kablosuz kişisel alan ağlarının (LR-WPAN) PHY ve MAC katmanlarını tanımlayan teknik bir standarttır. IEEE içerisinde 802 numaralı grup ağ operasyonları ve teknolojilerini içeren bölümdür, grup 15 daha temel olarak kablosuz ağlarla (WLAN) ilgili detayları içerir, grup 4 ise 802.15.4 kablosuz kişisel alan ağlarında (WPAN) düşük veri hızları standardını içerir. Star veya P2P topolojiyi destekler ve AES-128 destekler [18].

IEEE 802.15.4 protokolü Fiziksel katman (PHY) ve Medium Access Control (MAC) katmanların nasıl çalışacağını açıklar. Protokolün odaklandığı alan haberleşmenin düşük güç tüketimi ve düşük hızla ile gerçekleştirildiği düşük maliyetli uygulamalardır. Protokol iletilen ve alınan veri paketlerinin kontrolünden de sorumludur. Paket çakışmalarını engellemek amacıyla CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) veya ALOHA kullanır. IEEE 802.15.4 Thread, Zigbee, 6LowPAN, SNAP gibi protokollere temel oluşturmaktadır.

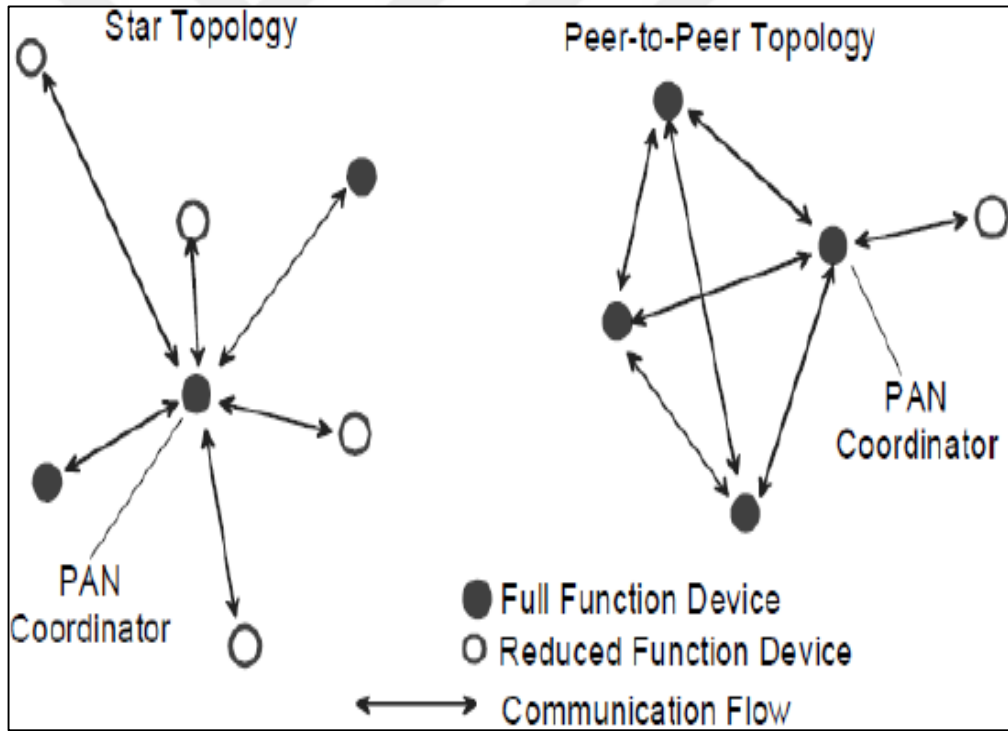
802.15.4 standardında bir cihazın iki farklı rolü olabilir, Full-Function Device (FFD) ve RFD (Reduced-Function Device). FFD, kişisel alan ağı (Personal Area Network - PAN) koordinatörü olarak hizmet eden bir cihaz vardır. RFD, koordinatör olarak hizmet vermez. RFD, basit uygulamaları gerçekleştirmek amacıyla oluşturulmuştur (örneğin: Lamba açma-kapama). RFD cihazın yüksek miktarda veri yollamasına gerek yoktur, sadece bir FFD cihaz ile ilişkilendirilir ve ondan gelen komutları gerçekleştirir veya ona çeşitli veriler gönderir.

802.15.4 standardının çalışabildiği ağ topolojilerinden olan yıldız topolojisinde, bir adet koordinatör cihaz bulunmaktadır. Ağdaki cihaz PAN koordinatörü ile iletişim

kurar. Yıldız topolojideki merkezi cihaz bu senaryoda PAN koordinatörüdür. PAN koordinatörü gerektiği zaman, kendisine bağlı olan cihazların özgün adreslerini kullanarak, ilgili cihaz ile iletişimi başlatır veya sonlandırır. Genellikle PAN koordinatörü doğrudan elektrik ile çalışır ancak diğer cihazlar batarya ile beslenir [18].Şekil 3.1’de Yıldız ve P2P topolojinin temsili gösterimi verilmiştir.

3.1.1. 802.15.04 P2P topolojisi

P2P topolojisininde de PAN koordinatörü vardır, ancak yıldız topolojisindeki PAN koordinatöründen farklıdır. P2P topolojisinde bir cihaz kendi kapsam alanındaki herhangi bir cihazla iletişim kurabilmektedir, diğer bir deyişle, başka bir cihaz ile iletişim kurabilmesi için PAN koordinatörüne ihtiyaç duymaz. Ayrıca cihazlar birbirleri üzerinden veri yollayabilir [18].



Şekil 3.1. 802.15.04 Peer to Peer ve Star topoloji [18]

3.1.2. Fiziksel katman (Physical layer)

Fiziksel katman (PHY), uluslararası OSI modelindeki ilk katmandır. Fiziksel katmanın yaptığı ana işlev veri aktarım hizmeti sağlamasıdır. Fiziksel katman veri aktarımı için gerekli olan fiziksel ve elektriksel altyapının tanımlamasını yapar. Aktarılabilecek verinin nasıl bir sinyal yapısına sahip olacağını (elektriksel, optik vs.) tanımlar. Kablosuz

protokoller için, haberleşmenin hangi kanalda yapılacağını tanımlar. 802.15.4 standardı bir kablosuz alan haberleşme standardı olduğu için RF alıcı-vericisini yönetimini, enerji ve sinyal yönetimini, modülasyonu ve haberleşmenin hangi kanallarda gerçekleşebileceğini tanımlar [18]. Buna göre haberleşme Dünya'nın farklı bölgelerine göre, şu kanallarda gerçekleşebilir;

- 868,0 – 868,6 MHz: Avrupa kıtasında kullanılabilir.
- 902 – 928 MHz : Amerika kıtasında kullanılabilir.
- 2400 – 2483,5 MHz : Dünya genelinde kullanılabilir.

3.1.3. Medya erişim katmanı (MAC layer)

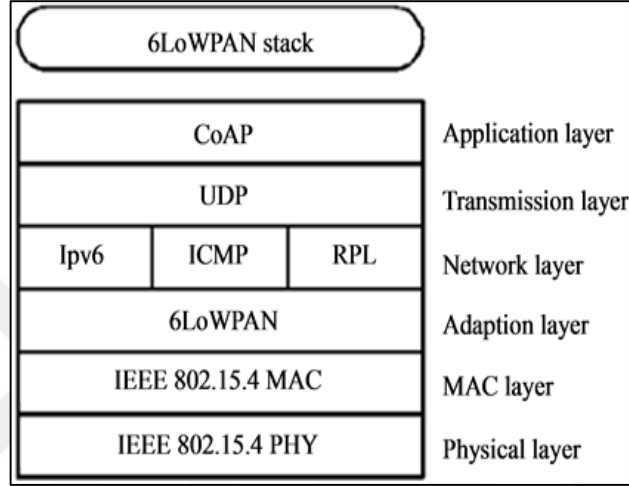
Medium Access Control katmanı OSI modelindeki ikinci katman olan Data Link Layer katmanına karşılık gelmektedir. MAC katmanı iki hizmetten sorumludur; MAC veri hizmeti ve MAC yönetim servisi. MAC veri hizmeti, PHY katmanını kullanarak veri iletilmesini ve gönderilmesini sağlar. MAC yönetim servisi ise cihaz yönetimi, kanal erişimi, veri paketinin doğrulanması, onay (ACK) mesajı gönderilmesi, doğrulanmış veri paketinin üst katmana aktarımından sorumludur [18].

3.2. 6LowPAN Topolojisi

6LowPAN açılımı, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks" tür. IETF tarafından RFC4944 [19] nolu doküman ile tanımlanmış açık bir standarttır. 6LowPAN IPv6 paketlerinin IEEE 802.15.4 protokolünü kullanarak verimli ve düşük enerji harcayarak iletilmesini ve alınmasını sağlayan bir ağ teknolojisidir. 6LowPAN topolojisinin bazı karakteristik özellikleri şu şekilde sıralanabilir [19]:

- Küçük veri paketlerini destekler.
- Adresleme için, 16 bit adres veya IEEE genişletilmiş MAC adres desteği bulunmaktadır.
- Düşük bant genişliği ile çalışır, haberleşme frekanslarına göre 2.4 GHz için 250 kbps, 915 MHz için 40 kbps, 868 MHz için 20 kbps bant genişliğini destekler.
- Düşük güç ile çalışır. Tipik olarak cihazlar batarya ile çalışır.
- Düşük maliyet. Kısıtlı kaynağı olan ve basit işlevler yapması için tasarlanmış cihazlar için tasarlanmıştır.

IPv6 minimum MTU(Maximum Transmission Unit) boyutu 1280 byte'tır[15] Fakat IEEE 802.15.4 ağlarında en fazla paket boyutu 128 byte'tır. 40 byte olan Ipv6 header'ı bile 128 byte'ın büyük çoğunluğunu kaplamaktadır ve fiziksel katmandaki bant genişliğini verimsiz kullanmaktadır. 6LoWPAN tarafından getirilen Adaptation Layer bu zorlukları gidermek amacıyla. Şekil 3.2'de 6LowPAN mimarisi gösterilmektedir.



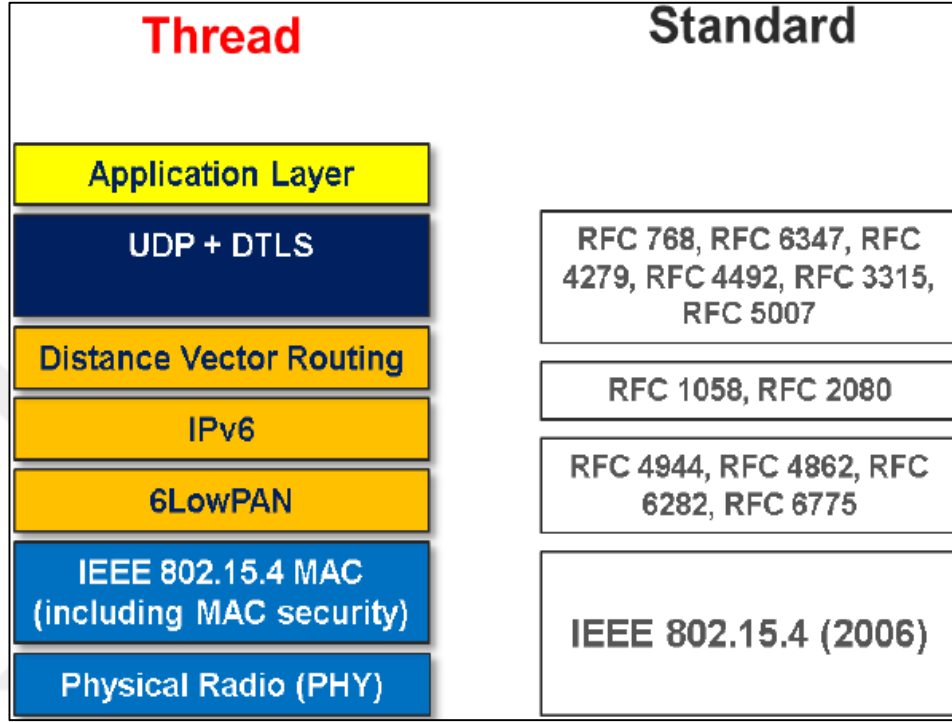
Şekil 3.2. 6LowPAN mimarisi

3.3. Thread Protokolü

Thread protokolü 2014 yılında Google Nest tarafından duyurulmuş, açık kaynaklı, düşük enerji tüketen, düşük maliyetli, güvenilir, kablosuz “device-to-device” haberleşme protokolüdür. Mesh topolojisi ile çalışmaktadır. Özellikle IP tabanlı haberleşmenin olduğu, uzaktan kontrol edilebilen ev uygulamaları için tasarlanmıştır. Protokolün sahip olduğu genel özellikler şu şekildedir [21]:

- Basit kurulum, bakım ve operasyon imkânı vermektedir.
- Ev uygulamaları odağına aldığı için geniş ağlarda hizmet verebilmek için tasarlanmıştır (Ev uygulamalarında çalışabilecek yüksek sayıda cihaz olabilir.)
- Cihaz yetkilendirilmediği sürece ağa bağlanılamaz. Tüm iletişim şifrelenmiştir ve güvenlidir.
- Tipik bir evde kapsama alanına sahip olabilecek şekilde tasarlanmıştır, Mesh ağı ile kapsama alanı genişletilebilir.
- SED (Sleepy End Device) cihazlar uyku modunda, AA sınıf bir pil ile birkaç yıl çalışabilir.

- Yazılım kütüphanesi açık kaynaktır. BSD lisans ile sunulmuş olup ticarileştirilebilir. Thread protokolü, IEEE 802.15.4 tabanlıdır ve 2.4 GHz bandında 250 kbps bant genişliği ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca protokol 6LowPAN Adaptasyon Katmanı ile çalışmaktadır. Protokolün mimari yapısı Şekil 3.3'deki gibidir. [22]



Şekil 3.3. Thread protokol mimarisi

3.3.1. Thread protokolündeki cihaz türleri

Thread protokolünde cihazların işlevlerine göre çeşitli rolleri olabilmektedir. Bu bölümde cihazların sahip olabildikleri roller ve bu rollerin özellikleri incelenecektir.

3.3.1.1. Sınır yönlendirici (Border Routers)

Border Router, 802.15.4 ağından diğer fiziksel katmanlardaki (Wi-Fi, Ethernet vb.) ağlarla bağlantı sağlayan spesifik bir router cihazdır. Ağ dışı işlemler için yönlendirme hizmetleri de dâhil olmak üzere, ağdaki cihazlara servis sağlar. Thread ağı tipik olarak bir veya daha fazla Border Router'a sahip olabilir.

3.3.1.2. Yönlendirici (Router)

Router, ağdaki cihazlara yönlendirme (routing) hizmeti sunmaktadır. Yönlendiriciler dışarıdan ağa katılmaya çalışan cihazlar için birleştirme (joining) ve güvenlik

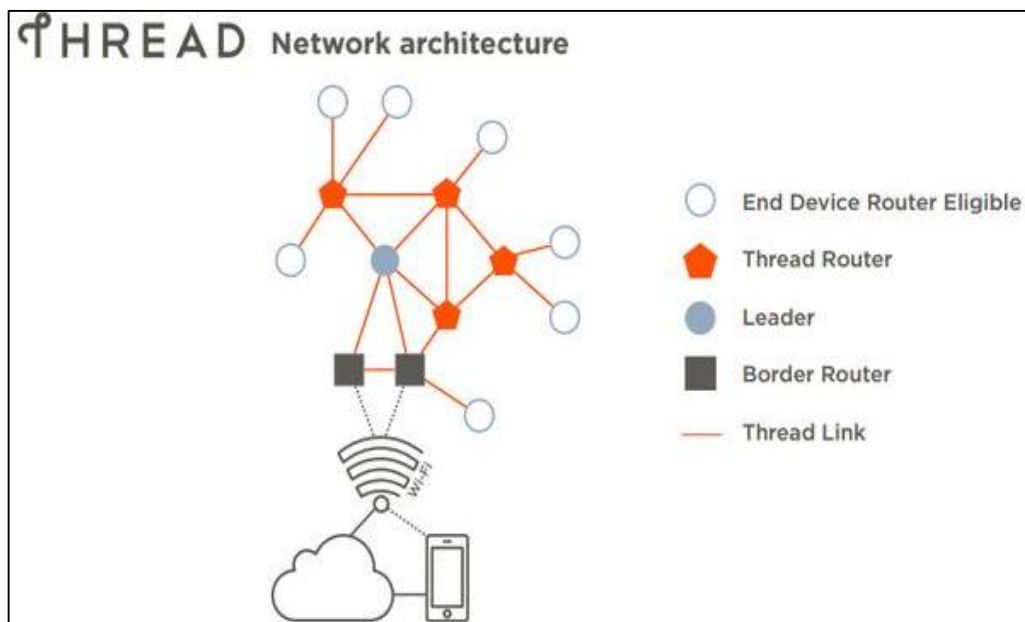
hizmetleri de sunar. Router'lar uyku moduna geçmezler. Router'lar işlevlerini düşürebilir ve REED (Router-Eligible End Devices) cihaz olabilir. Ayrıca ağ içerisinde cihazların rol atamasını yapan bir de Lider (Leader) bulunmaktadır. Lider, ağ ilk ayağa kalktığında yönlendiriciler arasından seçilmektedir. Lider cihazların rollerini kendi belleğinde saklamaktadır ayrıca bu bilgiler diğer yönlendiricilerde de bulunmaktadır. Bunun sebebi ise, herhangi bir nedenden dolayı lider ağdan ayrılır ise yönlendiricilerden birinin yani Lider olabilmesini sağlamaktır.

3.3.1.3. Yönlendirici uyumlu uç cihazlar (Router-Eligible End Devices)

REED cihazlar yönlendirici olabilir, ancak ağ topolojisi veya koşulları nedeniyle bu aygıtlar yönlendirici gibi davranmaz. Bu nedenle, REED cihaz tam olarak cihaz türü olmaktan ziyade yönlendirme işlemi yapabilecek cihazın bir durumudur (state). Bu cihazlar, mesajları iletmez veya ağdaki diğer cihazlar için birleştirme veya güvenlik hizmetleri sağlamaz. Gerekirse, ağ, kullanıcı etkileşimi olmadan bir cihazın REED'den yönlendiriciye geçişini yönetir.

3.3.1.4. Uyuyan uç cihazlar (Sleepy End Devices(SEDs))

Uyuyan Uç Cihazlar, yalnızca bağlı oldukları yönlendiriciler ile iletişim kurarlar ve diğer cihazlardan veri almazlar ve iletmezler. Şekil 3.4'de Thread protokolündeki cihaz türleri gösterilmiştir.

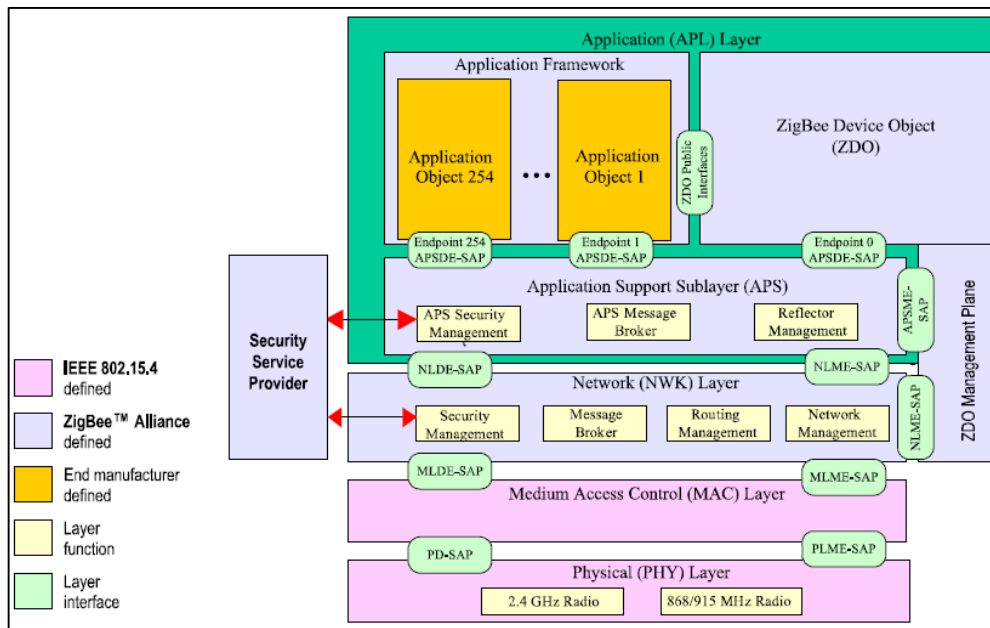


Şekil 3.4. Thread protokolünde ki cihaz türleri [30]

3.4. ZigBee Protokolü

ZigBee protokolünün ilk IEEE 802.15.4 tasarlanan versiyonun şpefikasyon dökümanı 2004 yılında yayınlanmıştır. ZigBee, kablosuz sensör teknolojisi için oluşturulmuş güç maliyetli, düşük güç tüketimine sahip, iki yönlü haberleşmenin yapılabildiği kablosuz haberleşme protokolüdür [23]. Protokolün Zigbee PRO, Zigbee RF4CE ve Zigbee IP olmak üzere üç farklı versiyonu bulunmaktadır (üç versiyon arasından Zigbee IP kullanılacaktır, sebebi IPv6 uyumlu olmasıdır). Zigbee IP, 802.15.4 temelli, düşük bant genişliğine sahip bir haberleşme protokolüdür. 2.4 GHz bandında çalışabildiği gibi 868 MHz ve 915 MHz bandında çalışabilmektedir, 2.4 GHz bandında 250kbps, 868MHz bandında 20kbps son olarak 915 MHz bandında 40kbps veri aktarım hızına sahiptir. Protokolün sahip olduğu genel özellikler şu şekildedir;

- Basit kurulum, bakım ve operasyon imkânı vermektedir.
- Düşük maliyetli.
- Düşük enerji tüketimine sahip.
- Tipik bir evde kapsam alanına sahip olabilecek şekilde tasarlanmıştır.
- Yazılım kütüphaneleri üretici firmalar tarafından sağlanmaktadır. Bazı üretici firmalar kütüphaneyi ücretsiz sağlarken, bazı firmalar belirli bir ücret karşılığında kütüphanelerini kullanıcıya açmaktadır. Protokolün mimari yapısı Şekil 3.5'deki gibidir [23].



Şekil 3.5. ZigBee mimarisi [23]

3.4.1. ZigBee protokolündeki cihaz türleri

ZigBee protokolünde cihazların işlevlerine göre çeşitli rolleri olabilmektedir. Bu bölümde cihazların sahip olabildikleri roller ve bu rollerin özellikleri incelenecektir.

3.4.1.1. ZigBee koordinatörü (ZigBee Coordinator)

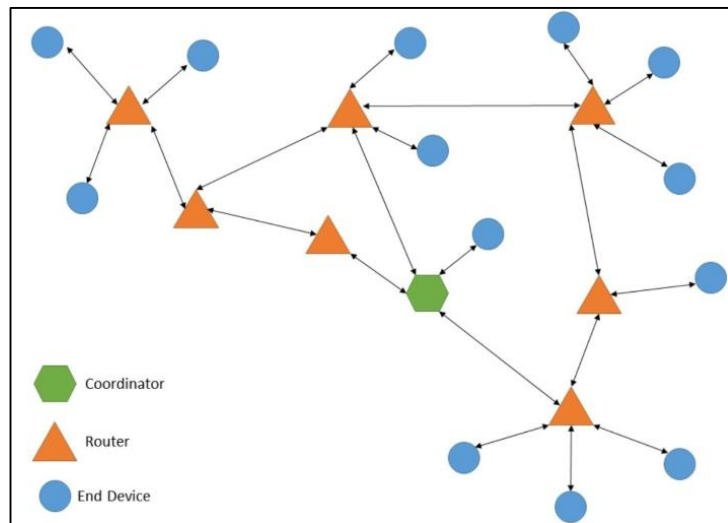
ZigBee Koordinatörü ağda yalnızca bir tanedir ve ağı başlatmakla görevlidir. Bütün ZigBee aygıtlarıyla iletişim halinde olarak ağ ile ilgili bilgileri depolamakla görevlidir. ZigBee Koordinatörün yalnızca yönlendirme özelliği fonksiyonel olarak çalışmaktadır. Ayrıca diğer ağlarla köprü işlevi yapmaktadır.

3.4.1.2. ZigBee yönlendiricisi (ZigBee Router)

ZigBee Yönlendiricisi isteğe bağlı bir bileşenlerdir. Düğümler arasında yönlendirme yapmakla görevlidir. Yapılan bu yönlendirmelerle kullanılan ağın kapsamını artırır. Ayrıca adresleme yapılıp yapılmaması işlevini yönetmektedir.

3.4.1.3. ZigBee uç cihaz (ZigBee End Device)

ZigBee Sonlandırıcısı, düşük güç tüketimini en iyi şekilde belirlemekle görevlidir. ZigBee sistemlerde kullanılan en pahalı alet tipidir. Ağ içinde sadece ZigBee Koordinatörü ile haberleşmektedir. ZigBee sistemlerin çekirdeği sayılan algılayıcılar bu bölümde bulunmaktadır. Şekil 3.6'de ZigBee protokolündeki cihaz türleri gösterilmiştir.



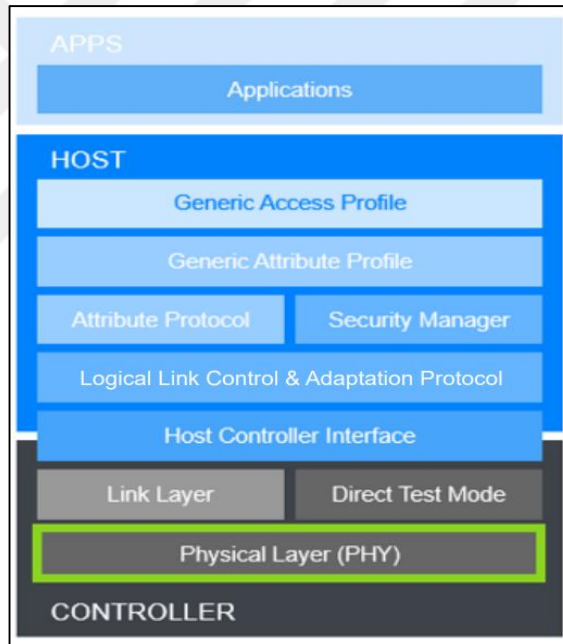
Şekil 3.6. ZigBee Cihaz Türleri [31]

3.5. Bluetooth 5 Protokolü

Bluetooth 5, 2016 yılında Bluetooth SIG tarafından duyurulmuştur. Temelde BLE ile aynı yapıya ve amaca sahip olsa da büyük farklılıkları mevcuttur. Bu farklılıkları aşağıdaki gibidir;

- 2× hız (2Mbps)
- 4× mesafe (240 m)
- 8× yayın kapasitesi (255 bayt)

Bu farklılıklar Bluetooth 5.0'ı IoT için daha önemli hale getirmiştir. Bluetooth 5 protokol mimarisi olarak BLE ile aynı yapıya sahiptir. Ancak mesafe, hız ve yayın kapasitesini arttırabilmek için PHY katmanında değişiklikler yapmıştır [24].



Şekil 3.7. Bluetooth 5.0 Mimarisi[24]

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 [24].

LE 1M; Bluetooth 4 de kullanılmaktadır. GFSK modülasyon yapısını kullanmakta ve 1 Mb/S oranına sahiptir. Eski versiyonlara bağlanmak için Bluetooth 5 de bu fiziksel katmana destek vermek zorundadır.

LE 2M; Yeni fiziksel katman tanımı ile birlikte Bluetooth 5'in data 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.

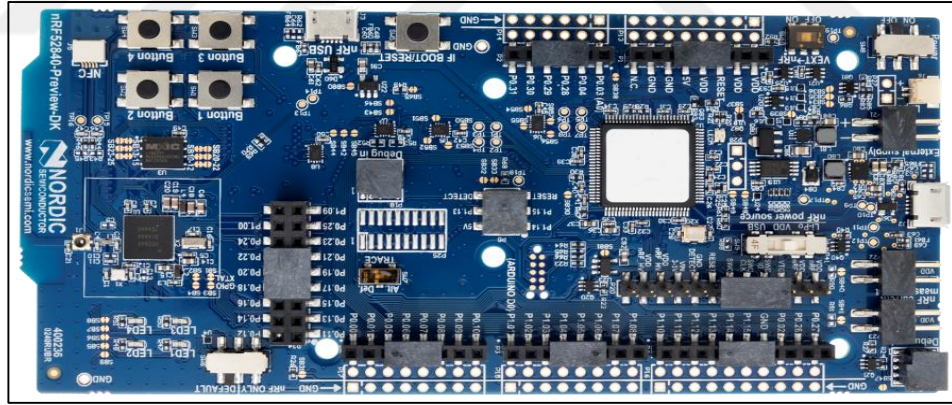
LE CODED; LE Coded fiziksel katman yapısı LE 1M ve LE 2M fiziksel katmana göre daha yüksek hassasiyetle veri aktarılmasını sağlar. Bu sayede mesafe artarken veri aktarma miktarı azalır.



4. TEST ORTAMI VE DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Test Ortamı

Bu tez çalışması kapsamında yakın alan kablosuz haberleşme protokollerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları tespit edilmek istenmiştir. Bu hedef doğrultusunda donanım farklılıklarını en aza düşürmek adil bir karşılaştırma yapabilmek için oldukça önemlidir. Bu nedenle, yapılacak testler için, bu üç protokolün (Bluetooth5.0, Thread, ZigBee) çalışabileceği bir donanım platformu belirlenmiş ve kullanılmıştır. Donanım platformu olarak Nordic firmasının ürettiği Şekil 4.1'de gösterilen nRF52840 geliştirme kartı [25] uygun bulunmuştur. Platform üç protokollü desteklemek ile beraber, üretici firma tarafından gerekli yazılım kütüphaneleri de sağlanmaktadır. Geliştirme ortamı olarak ise yine firma tarafından desteklenen Segger Embedded Studio kullanılmıştır.



Şekil 4.1. nRF52840

4.2. Testler

Protokoller için üç ana test konusu planlanmıştır. Bunlar;

- Düğümler Arası Mesafe ve Seyahat Hızı Testi
- Kaynak Kullanımı Testi
- Güç Tüketimi Testi

Testler için kullanılan yöntemler ve araçlar ilgili test başlığının altında açıklanacaktır.

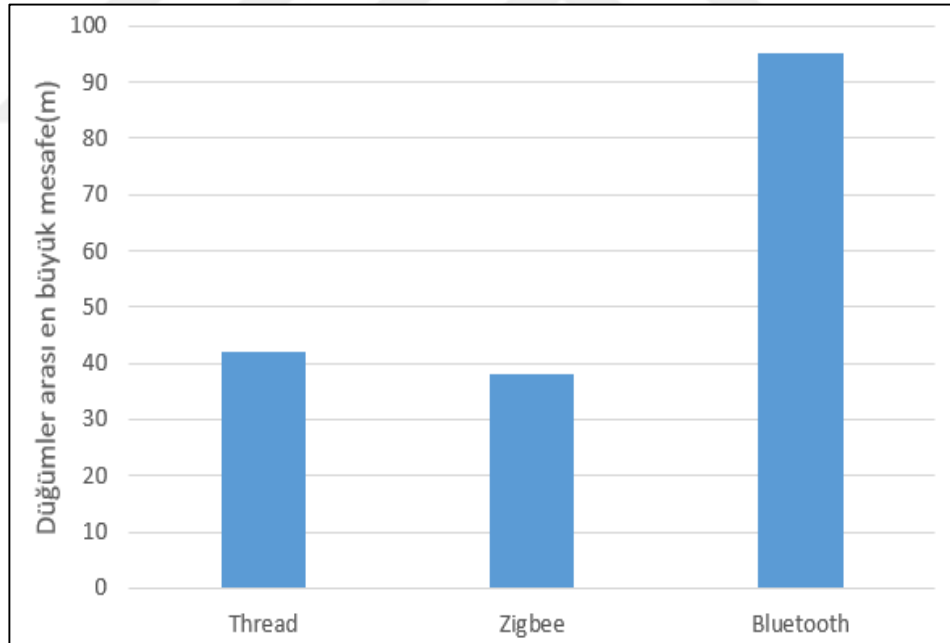
4.2.1. Dügümler arası mesafe ve seyahat hızı testi

4.2.1.1. Dügümler arası mesafe testi

Dügümler arası haberleşme mesafesini belirleyebilmek amacıyla bir iki düğüm arasında ki mesafe kademeli olarak artırılmıştır. Bu sırada düğümler birbirlerine sürekli olarak veri yollayıp almaktadır. Haberleşme kesilinceye kadar bu işleme devam edilmiş ve protokollerin yaklaşık olarak açık alanda düğümler arası ne kadar mesafeye kadar haberleşebildikleri tespit edilmiştir. Bu testler sırasında cihazlarda harici anten kullanılmamış, bord üzerindeki PCB tipi antenden faydalanılmıştır. Buna göre;

- Bluetooth 5.0 (LE 1M PHY): 95m kadar sağlıklı haberleşme sağlanabilmiştir.
- Thread: 42m kadar sağlıklı haberleşme sağlanabilmiştir.
- Zigbee: 38m kadar sağlıklı haberleşme sağlanabilmiştir.

Test sonuçları grafiksel olarak Şekil 4.2’de sunulmuştur.

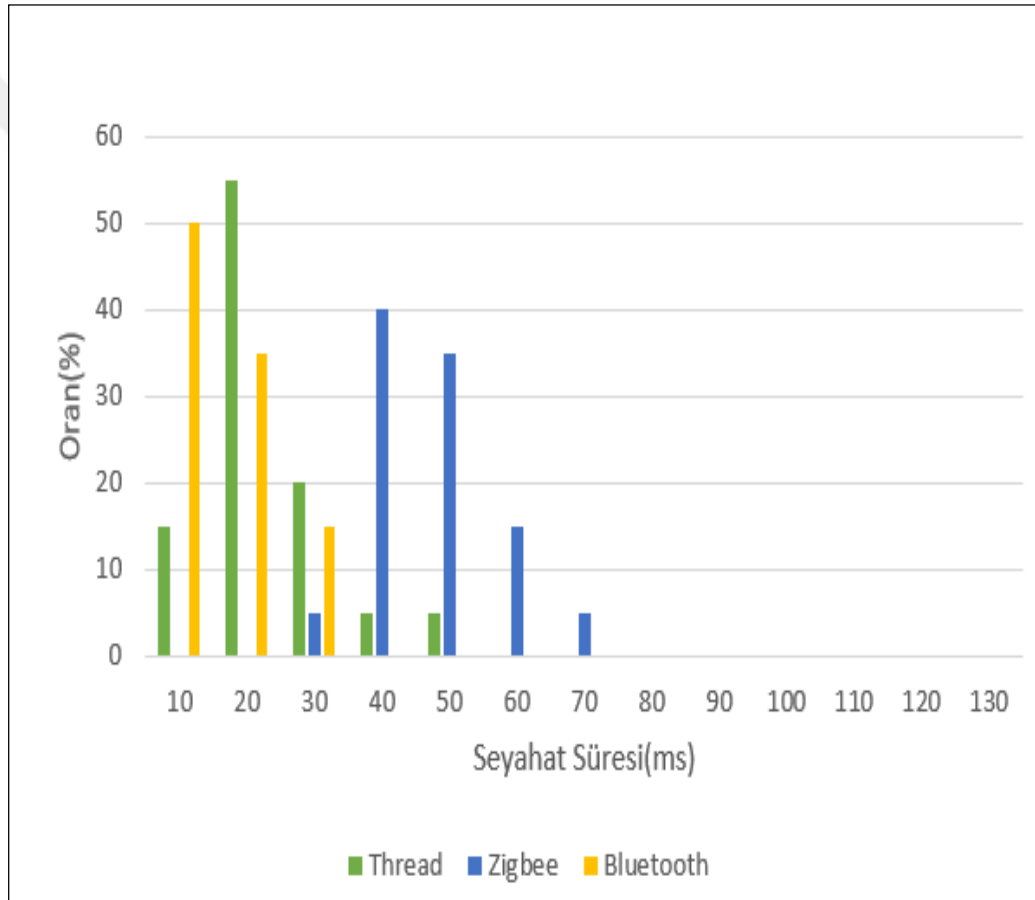


Şekil 4.2. Dügümler arası mesafe testi sonuçları

Testler sonucunda Thread ve Zigbee haberleşme mesafeleri birbirine çok yakın çıkarken, Bluetooth 5.0 bu iki protokole nazaran daha yüksek haberleşme mesafesine sahip olduğu sonucu çıkmıştır. Bunun nedeni Thread ve ZigBee protokollerinin PHY katmanında 802.15.4 standardını kullanırken, Bluetooth’un LE 1M PHY katmanı kullanmasıdır.

4.2.1.2. Seyahat hızı testi

Seyahat hızı testi için uygulanan senaryo şu şekildedir; Bütün protokollerden 8 byte veri gönderilmiş tüm düğümleri dolaşan 8 bayt uzunluğundaki veri paketi en son yollandığı düğüme geri gelmesi sağlanmıştır. Her paketin kaynak düğüme dönme süreleri Segger Embedded Studio IDE'si yardımıyla gözlemlenmiştir. Testler sırasında her düğüm arasında 10m mesafe bırakılmıştır. Son olarak mesajların ne kadarının, hangi gecikme aralığında kaynağa geri döndüğü tespit edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



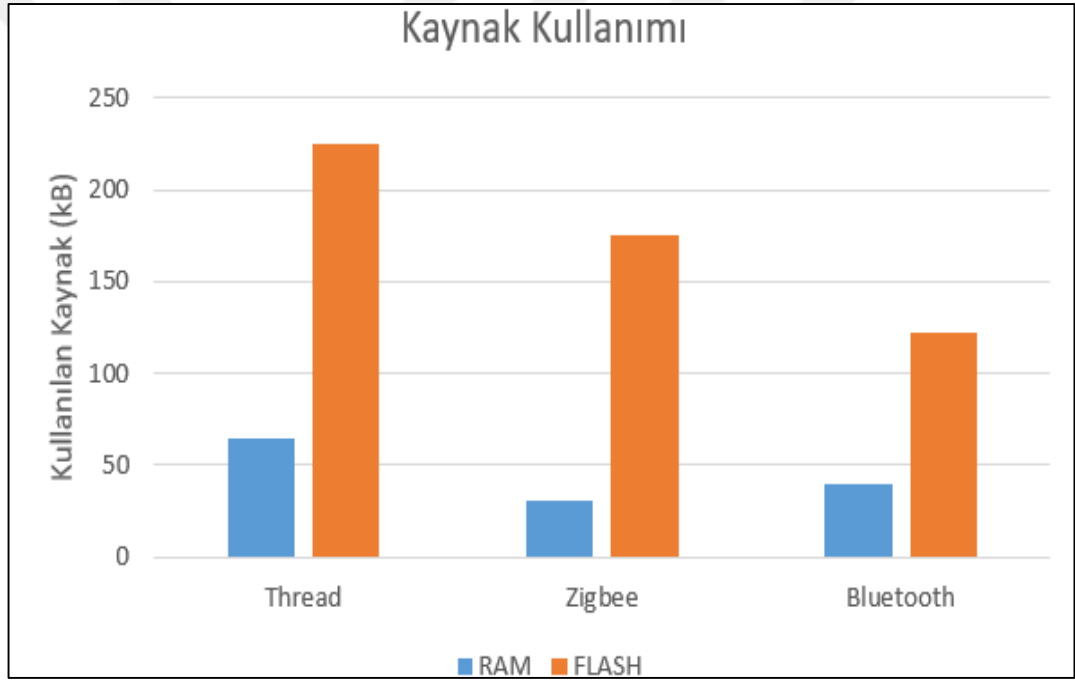
Şekil 4.3. Düğümler arası haberleşme seyahat hızı test sonuçları

Testler sonucunda ZigBee'nin diğer protokollere nazaran daha fazla gecikme yaşadığı görülmektedir. Bluetooth 5.0 protokolü LE 1M PHY katmanı kullandığı için bir nebze daha hızlı haberleşme sağlanmıştır. Ancak ZigBee ile Thread protokolleri ortak PHY ve MAC katmanı kullanmasına (her ikisi de 802.15.4 tabanlıdır) rağmen Thread hızında bir adım önde görünmektedir. Bunun nedeni Thread protokolünün üst katmanda daha yeni bir teknoloji olan 6LowPAN kullanmasıdır.

4.2.2. Kaynak kullanımı testi

Bir yazılımın kaynak kullanımı kullandığı kütüphanelere ve yazılım optimizasyon şekline ve seviyesine göre değişkenlik gösterebilir. Bu testin esas amacı protokollerin çalışabilecekleri cihaz grubu hakkında fikir verebilmektir. Bu çalışma sırasında Nordic firmasının ürünü kullanıldığı için ZigBee ve Bluetooth kütüphaneleri firma tarafından geliştirilmiştir ancak Üç protokollünde testleri yapılırken az kaynak kullanacak bir LED yakma uygulaması geliştirilmiştir, kullandıkları RAM ve FLASH bellek miktarı karşılaştırılmıştır. Derleme sırasında optimizasyon seviyesi 0'dır.

Buna göre farklı protokollerin kaynak kullanımı Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Protokoller arası kaynak kullanım sonuçları

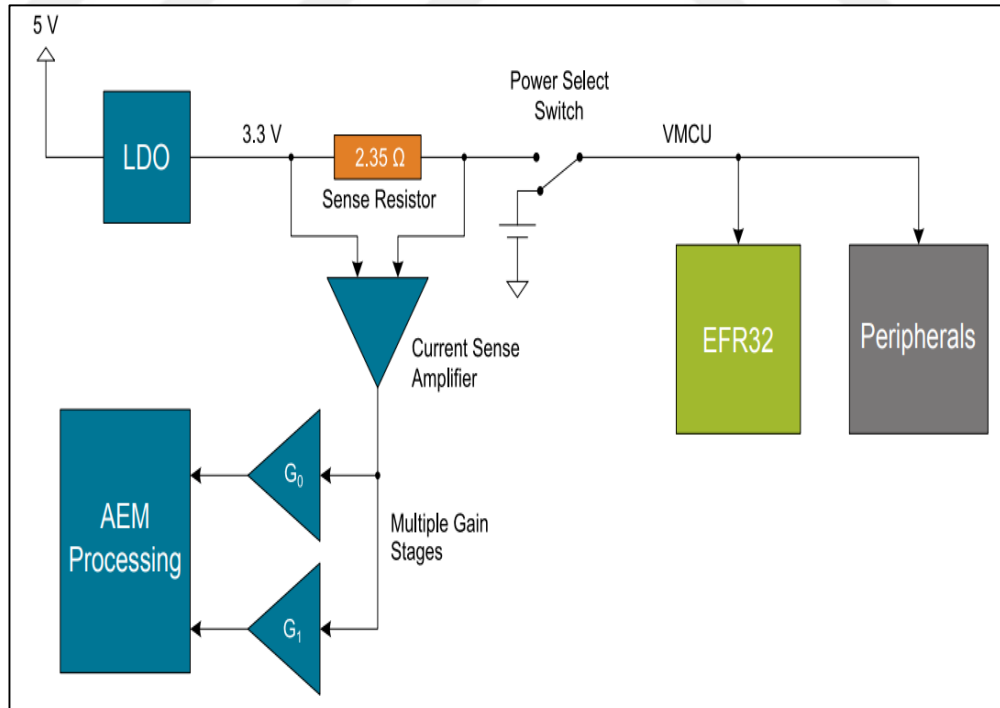
Thread protokolü dışında ki protokoller genellikle üretici firmalar tarafından sağlanan kütüphaneler ile çalışmaktadır. Thread protokolü şu an için, Google Nest tarafından geliştirilen yazılım kütüphanesi ile kullanıcılara hizmet vermektedir. Bu nedenle kaynak kullanımı yazılım kütüphanelere ve uygulamalara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Daha önce yapılan çalışmada Thread ile ZigBee arasında kaynak kullanımı testinde TI CC2652R bordu ile yapılan test sonuçları şu şekildedir;

Thread Protokolü için kullanılan FLASH hafıza 167KB, SRAM 37,658KB, Zigbee Protokolü için kullanılan FLASH hafıza 182KB, SRAM 35,752KB' dır.

4.2.3. Güç tüketimi testi

Protokollerin güç tüketimlerini karşılaştırmak için mesaj yollama ve mesaj alma sırasında tükettikleri akım miktarı ölçülmüştür. Bunun yanı sıra güç tüketiminin mesafeye ve kapalı veya açık alana bağımlılığı olup olmadığı irdelenmiştir. Deney düzeneği kurulduktan sonra düğümden düğüme butona basıldığı anda mesaj yollanmıştır. Bu amaçla ilk olarak açık alanda düğümler arasında belirli mesafeler konularak mesaj gönderilip, mesaj almaları sağlanmıştır. Aynı işlem kapalı ortamında da gerçekleştirilerek kapalı alandaki akım tüketimi tespit edilmiştir. Bütün testler 10 defa yapılmış olup çıkan sonuçların ortalamaları alınmıştır.

Protokollerin mesaj transferleri anında ki akım tüketimlerini ölçümleyebilmek için Silicon Labs firmasının SLWSTK6020B boardu kullanılmıştır. Bu donanımdan elde edilen verilerin gözlenebilmesi amacıyla yine aynı firmanın Simplicity IDE programından faydalanılmıştır. Bordan üzerinde ki AEM(Advanced Energy Monitor) birimi akım, voltaj ve güç tüketimi verilerinin elde edilmesini sağlamaktadır. AEM biriminin blok şeması Şekil 4.5’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.5. SLWSTK6020B Blok şeması [26]

Sistemin 3,3 V hattına bağlanan 2,35 Ω direnç üzerinden geçen akım hesaplanarak güç ölçümü yapılmaktadır. Güç ölçüm sisteminde doğruluğu arttırmak için iki 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 [26].

Açık alan testleri Şekil 4.6’te gösterilen alanda yapılmıştır.



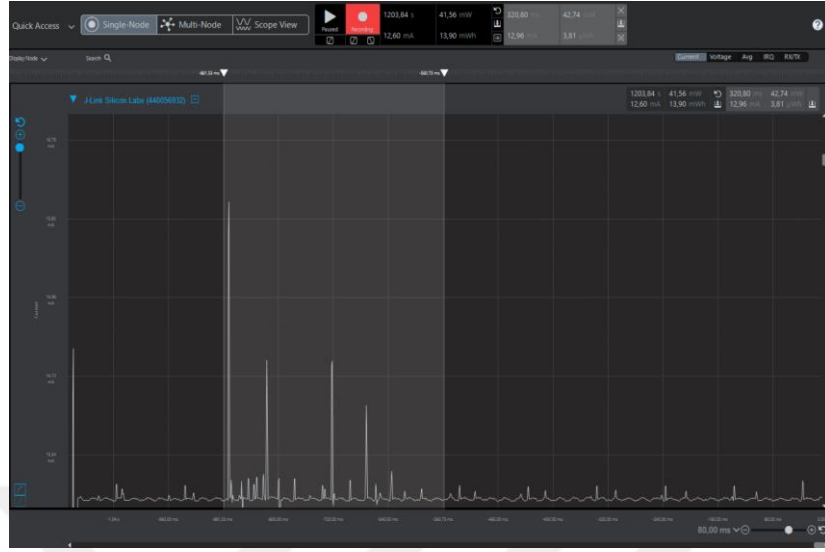
Şekil 4.6. Güç tüketim testlerinin yapıldığı alan

4.2.3.1. Bluetooth 5.0 güç tüketim testi;

Temsili bir Bluetooth 5.0 ağı kurularak, bir düğümün kapalı alan, açık alan mesaj alma ve mesaj yollama sırasındaki güç tüketimleri tespit edilmiştir.

Bluetooth 5.0 Kapalı Alan Güç Tüketim Testi; Basit bir ağ oluşturularak kapalı alanda çalışmasının güç tüketimine etkisi olup olmadığı gözlemlenilmiştir. Testler sırasında PHY modu olarak LE 1M kullanılmıştır. Bunun sebebi üretici firmanın mesh kütüphanesinde yalnızca bu PHY modunu desteklemesidir. Buna göre protokolün mesaj yollarken ve mesaj alırken tükettikleri akım miktarı şu şekildedir;

Mesaj Alırken;

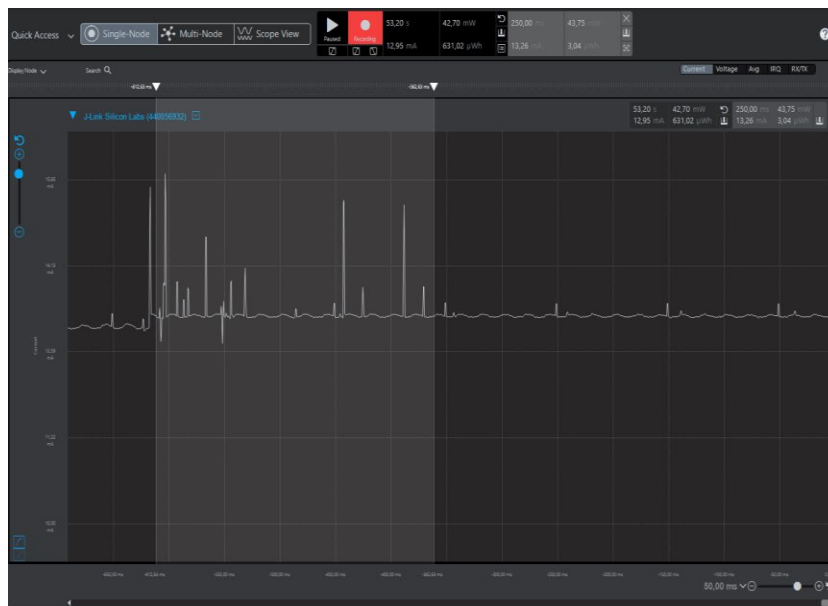


Şekil 4.7. Bluetooth, kapalı alan mesaj alma güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj alma anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım (akım değişikliğinin olmadığı alan): 12,60mA
- Maksimum çekilen akım: 15,92mA'dır.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 320ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,81μWh dir.

Mesaj Yollarken;



Şekil 4.8. Bluetooth, kapalı alan mesaj yollarken güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj yollama anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım (akım değişikliğinin olmadığı alan): 12,95mA
- Maksimum çekilen akım: 15,82mA'dir.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 320ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,04 μ Wh'dir.

Bluetooth 5.0 açık alan güç tüketim testi;

Düğüm arası mesafe 20m, 60m ve 95m olmak üzere üç farklı uzaklıkta mesaj alma ve mesaj yollama sırasında ki akım tüketimleri ölçülmüştür. Buna göre;

- 20m mesaj alma Şekil 4.9 ve mesaj yollama Şekil 4.10 sırasında tüketilen akım;

Mesaj Alırken;

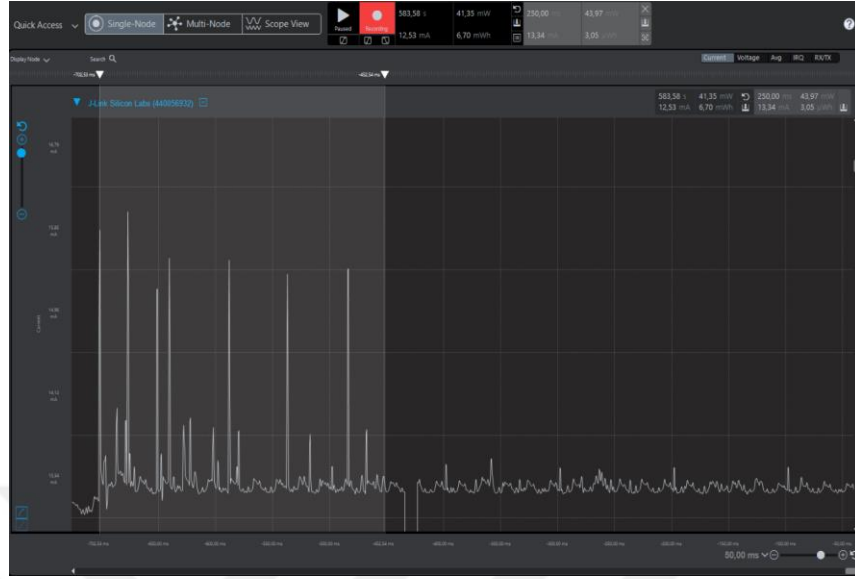


Şekil 4.9. Bluetooth, açık alan(20m) mesaj alma güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj alma anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım (akım değişikliğinin olmadığı alan): 12,66mA
- Maksimum çekilen akım: 15,88mA'dir.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,81 μ Wh'dir.

Mesaj Yollarken;



Şekil 4.10. Bluetooth, açık alan(20m) mesaj yollama güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj yollama anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım (akım değişikliğinin olmadığı alan): 12,53mA
- Maksimum çekilen akım: 15,89mA'dır.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,05μWh'dir.

Mesaj yollama sırasında kaydedilen güç değerleri;

Tablo 4.1. Bluetooth mesaj yollama değerler

Mesafe	StandBy Akımı(mA)	Tepe Akımı(mA)	İşlem Süresi(ms)	Harcanan Enerji(μWh)
20m	12,66	15,85	200	3,81
60m	12,67	15,86	200	3,81
95m	12,68	15,85	200	3,51

Mesaj alma sırasında kaydedilen güç değerleri;

Tablo 4.2. Bluetooth mesaj alma değerleri

Mesafe	StandBy Akımı(mA)	Tepe Akımı(mA)	İşlem Süresi(ms)	Harcanan Enerji(μWh)
20m	12,67	15,35	200	3,2
60m	12,67	15,45	200	3,25
95m	12,67	15,35	200	3,2

Bluetooth 5.0 açık alan testlerinden çıkarılan en önemli sonuç haberleşme sırasında tüketilen enerjinin mesafe ile bir ilişkisi olmadığıdır [27]. Öte yandan mesaj alınırken maksimum çekilen akım ile boş durumda ki akım farkı alınmıştır, bütün mesafelerde elde edilerek ortalaması 2,95mA akım tükettiği çıkarılmıştır. Mesaj yollarken maksimum çekilen akım ile boş durumda ki akım farkı alınmıştır, bütün mesafelerde elde edilerek ortalaması 3,22mA akım tükettiği çıkarılmıştır.

4.2.3.2. Thread güç tüketim testi;

Temsili bir Thread ağı kurularak, bir düğümün kapalı alan, açık alan mesaj alma ve mesaj yollama sırasındaki güç tüketimleri tespit edilmiştir.

Thread güç kapalı alan tüketim testi;

Basit bir ağ oluşturularak kapalı alanda çalışmasının güç tüketimine etkisi olup olmadığı gözlemlenilmiştir. Buna göre protokolün mesaj yollarken ve mesaj alırken tükettikleri akım miktarı Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 de gösterilmiştir.

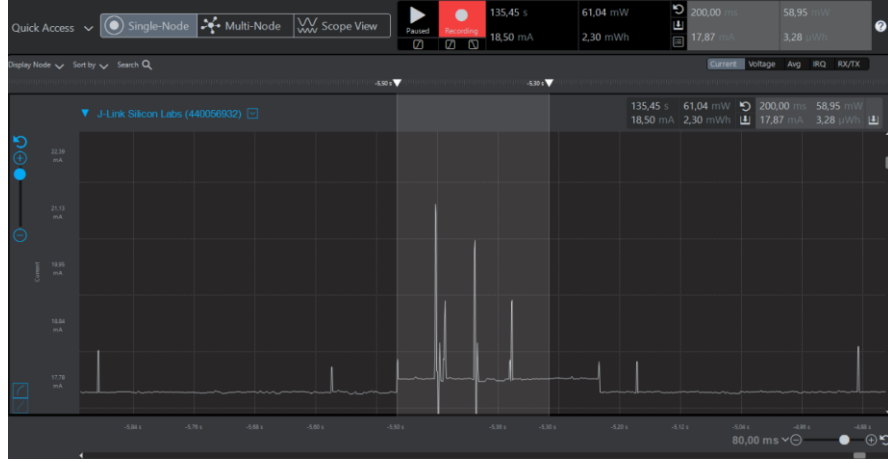
Mesaj Alırken;



Şekil 4.11. Thread, kapalı alan mesaj alma güç ölçümü

- Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj alma anına aittir. Buna göre;
- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 17,56mA
- Maksimum çekilen akım: 19,71mA'dır.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,22µWh'dir.

Mesaj Yollarken;



Şekil 4.12. Thread, kapalı alan mesaj yollama güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj yollama anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 17,87mA
- Maksimum çekilen akım: 21,13mA'dır.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,28μWh dir.

Thread güç açık alan tüketim testi;

Düğümler arası mesafe 10m, 25m ve 40m olmak üzere üç farklı uzaklıkta mesaj alma ve mesaj yollama sırasında ki akım tüketimleri ölçülmüştür. Buna göre;

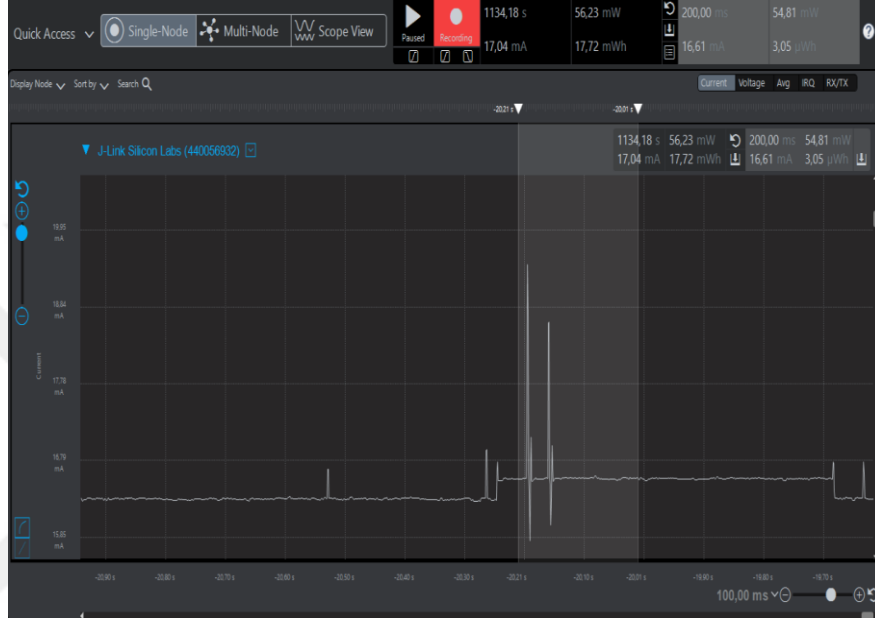
10m mesaj alma, mesaj yollama Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'da gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Thread, açık alan(10m) mesaj alma güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj alma anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 17,54mA
- Maksimum çekilen akım: 20,28mA'dir.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,21 μ Wh'dir.



Şekil 4.14. Thread, açık alan(10m) mesaj yollama güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj yollama anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 16.34mA
- Maksimum çekilen akım: 19,25mA'dir.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,05 μ Wh'dir.

Mesaj yollama sırasında kaydedilen güç değerleri;

Tablo 4.3. Thread mesaj yollama güç değerleri

Mesafe	StandBy Akımı(mA)	Tepe Akımı(mA)	İşlem Süresi(ms)	Harcanan Enerji(μ Wh)
10m	17,54	20,25	200	3,21
25m	17,54	20,2	200	3,21
40m	17,54	20,27	200	3,22

Mesaj alma sırasında kaydedilen güç değerleri;

Tablo 4.4. Thread mesaj alma güç değerleri

Mesafe	StandBy Akımı(mA)	Tepe Akımı(mA)	İşlem Süresi(ms)	Harcanan Enerji(μ Wh)
10m	16,34	19,25	200	3,05
25m	17,54	19,25	200	3,05
40m	16,79	19,32	200	3,05

Test sonucunda, protokolün mesafe ile güç tüketiminde bir değişim gözlenmemiştir [28]. Öte yandan mesaj alınırken maksimum çekilen akım ile boş durumda ki akım farkı alındığında ve bütün mesafelerde ki akım ortalaması 2,54mA akım tükettiği çıkarılmıştır. Mesaj yollarken maksimum çekilen akım ile boş durumda ki akım farkı alınmıştır, bütün mesafelerde ki akım ortalaması 2,79mA akım tükettiği çıkarılmıştır.

4.2.3.3. Zigbee güç tüketim testi

Temsili bir Zigbee ağı kurularak, bir düğümün kapalı alan, açık alan mesaj alma ve mesaj yollama sırasındaki güç tüketimleri tespit edilmiştir.

Zigbee kapalı alan güç tüketim testi;

Basit bir ağ oluşturularak kapalı alanda çalışmasının güç tüketimine etkisi olup olmadığı gözlemlenmiştir. Buna göre protokolün mesaj yollarken ve mesaj alırken tükettikleri akım miktarı Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 de gösterilmiştir.

Mesaj alırken;



Şekil 4.15. ZigBee, kapalı alan mesaj alma güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj alma anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 17,65mA
- Maksimum çekilen akım: 20,82mA'dır.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,28 μ Wh'dir.

Mesaj Yollarken;



Şekil 4.16. ZigBee, kapalı alan mesaj yollama güç ölçümü

- Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj yollama anına aittir. Buna göre;
- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 21,69mA
- Maksimum çekilen akım: 26,41mA'dır.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,92 μ Wh'dir.

Zigbee açık alan güç tüketim testi;

Düğüm arası mesafe 10m, 25m ve 40m olmak üzere üç farklı uzaklıkta mesaj alma ve mesaj yollama sırasında ki akım tüketimleri ölçülmüştür. Buna göre, 10m mesaj alma, mesaj yollama sırasında tüketilen akım Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Mesaj Alınırken;



Şekil 4.17. ZigBee, açık alan(10m) mesaj alma güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj alma anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 17,45mA
- Maksimum çekilen akım: 21,62mA'dır.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 100ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,26 μ Wh dir.

Mesaj Yollanırken;



Şekil 4.18. ZigBee, açık alan(10m) mesaj yollama güç ölçümü

Belirtilen bölgede ki akım değişikliği mesaj yollama anına aittir. Buna göre;

- Boştaki akım(akım değişikliğinin olmadığı alan): 21,39mA
- Maksimum çekilen akım: 26,43mA'dir.
- Seçilen alanın genişliği zaman olarak: 200ms'dir.
- Seçilen alanda harcanan toplam güç: 3,92 μ Wh'dir.

Mesaj yollama sırasında kaydedilen güç değerleri;

Tablo 4.5. ZigBee mesaj yollama güç değerleri

Mesafe	StandBy Akımı(mA)	Tepe Akımı(mA)	İşlem Süresi(ms)	Harcanan Enerji(μ Wh)
10m	21,35	26,43	200	3,92
25m	22,35	25,53	200	3,78
40m	21,35	26,03	200	3,9

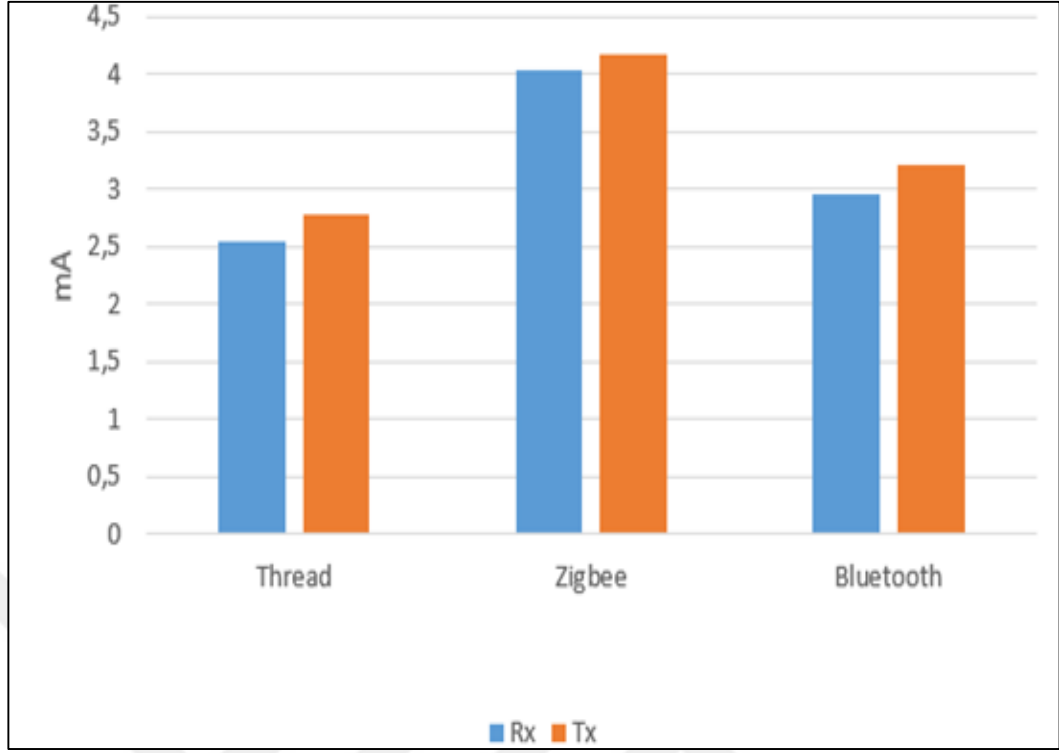
Mesaj alma sırasında kaydedilen güç değerleri;

Tablo 4.6. ZigBee mesaj alma güç değerleri

Mesafe	StandBy Akımı(mA)	Tepe Akımı(mA)	İşlem Süresi(ms)	Harcanan Enerji(μ Wh)
10m	17,45	21,62	200	3,26
25m	17,42	21,62	200	3,26
40m	17,42	22,12	200	3,28

Test sonucunda, protokolün mesafe ile güç tüketiminde bir değişim gözlenmemiştir [28]. Bunun nedeni PHY katmanında uygulanan modülasyonun sinyal gücünün sabit tutulmasıdır diğer bir deyişle alınan sinyal gücüne göre yayın gücünün düşürülmesi veya ayarlanması gibi bir adaptasyon olmamasıdır[40]. Öte yandan mesaj alınırken maksimum çekilen akım ile boş durumda ki akım farkı alındığında ve bütün mesafelerde ki akım ortalaması 4,04mA akım tükettiği çıkarılmıştır. Mesaj yollarken maksimum çekilen akım ile boş durumda ki akım farkı alınmıştır, bütün mesafelerde ki akım ortalaması 4,17mA akım tükettiği çıkarılmıştır.

Tüm protokollerin açık alandaki ve kapalı alandaki tükettikleri akım miktarları Şekil 4.19 da özetlenmiştir.



Şekil 4.19. Tüm protokollerin tükettiği akım değerleri

Diğer yandan protokollerin mesaj yollama anlarında tespit edilen enerji harcama miktarlarını referans alarak saniyede bir, dakikada bir, saatte bir veri yollama senaryolar ile 300mAh kapasiteye sahip bir pil ile ne kadar süre çalışabileceği Tablo 4.1’de verilmiştir. nRF52840 board’unun sistem erişebilir ve RAM korunurken ki tükettiği stand-by akımı 2,35 μ A ‘dir [39]. Cihaz mesajının yollayıp stand-by haline geçecektir. Pil ömrünün hesabı için Denklem 4.1 kullanılmıştır;

$$\text{Pil Ömrü} = \text{Pil Kapasitesi(mAh)} / \text{mA} * 0,70$$

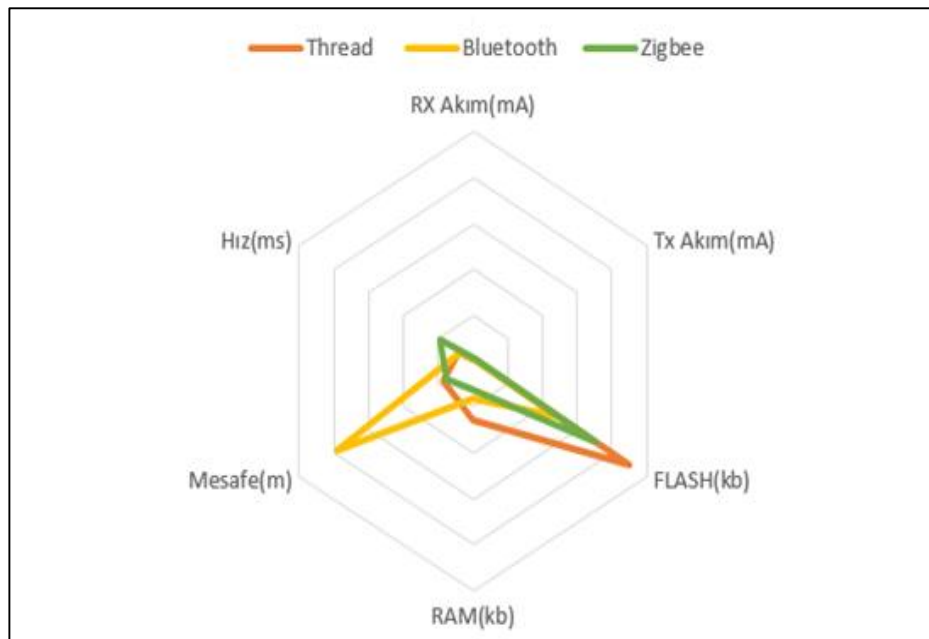
Formülü kullanılmıştır. Saniyede bir, dakikada bir ve saatte bir olacak şekilde mesaj yollandığında 300mAh kapasiteye sahip bir pilin ömrü, Tablo 4.7’deki gibi olacağı hesaplanmıştır.

Tablo 4.7. Protokollerin periyodik veri yollama tüketeceği enerji

Protokol	Tx Akımı(mA)	Saniyede Bir	Dakikada Bir	Saatte Bir
Bluetooth	19,65	30h	909h(38d)	38124(4.3y)
Thread	15,51	38h	1150h (48d)	44736h (5.1y)
ZigBee	24,47	24h	731h (30d)	32525h (3.7y)

Tüm bu testlerden sonra bütün yapılan testler Şekil 4.20’deki radar grafikte verilmiştir;

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere her protokol diğerlerinden farklı kaynak tüketimi, enerji tüketimi, çalışma özellikleri göstermektedir. Bu parametreleri tek tek açıklayacak olursak, mesafe bakımından karşılaştırıldıklarında Bluetooth 5.0 açık ara önde görünmektedir. Bunun sebebi Bluetooth protokolünün kullandığı PHY katmanın Thread ve ZigBee protokollerinden farklı olmasıdır, Thread ve Zigbee IEEE 802.15.04 kullanırken, Bluetooth LE 1M PHY modunu kullanmaktadır, bu da protokole daha uzun mesafelerde haberleşme imkanı vermektedir [35]. Kaynak tüketimine incelendiğinde (RAM ve FLASH) Thread protokolünün daha fazla kaynak tükettiği gözlenmektedir. Protokollerinin yazılım kütüphaneleri ya bazı komiteler tarafından ya da üretici firmalar tarafından sağlanmaktadır. Thread protokolü OpenThread komitesi tarafından geliştirilmekte ve yayınlanmaktadır ancak üretici firmalar bu kütüphaneleri alıp kendi cihazlarına port etmektedir. Bu nedenle kaynak tüketimi cihazdan cihaza farklılık gösterebilir. Enerji tüketimi bakımından karşılaştırma yaptığımızda Thread protokolünün mesaj yollama ve mesaj alma sırasında yapılan testlerde diğer protokollere nazaran daha az enerji tükettiği gözlemlenmiştir. Bunun en büyük sebebi ise Thread protokolün IEEE 802.15.04 ve 6LowPAN teknolojisini beraber kullanıyor olmasıdır[34]. Hız testlerin de ise Bluetooth 5.0’ın rakiplerine üstün geldiği gözlenmiştir. Mesafe testlerinde olduğu gibi bununda en büyük sebebi PHY katmanının diğer protokollerden farklı olmasıdır ayrıca literatürde ki diğer çalışmalarda da Bluetooth’un hız konusunda ki üstünlüğü göze çarpmaktadır [33].



Şekil 4.20. Tüm protokollerin karşılaştırılması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucunda Bluetooth 5.0, Thread ve ZigBee protokolleri bir haberleşme protokollünün başarılı olarak değerlendirilmesinde önemli kategoriler olan, güç tüketimi, haberleşme mesafeleri, seyahat hızı ve kaynak kullanımı başlıkları altında karşılaştırılmıştır. Buna göre protokollerin bazı alanlarda birbirlerine üstünlük sağlarken, bazılarında ise rakiplerinin gerisinde kalmıştır. Bunun asıl nedeni bu protokollerin hepsinin belirli amaçlar doğrultusunda tasarlanmasıdır.

Bu kapsamda akıllı ev ve sensör haberleşmesi konsepti göz önüne alınarak geliştirilen Thread ve ZigBee protokolleri birbirlerinin doğrudan rakipleri olup Bluetooth ise daha genel amaçlı olduğu için kendisine daha geniş yelpazede çalışma alanı bulabilmektedir. Enerji tüketimleri göz önüne alındığında Şekil 4.20’ da gözlemlenebileceği gibi en fazla enerji tüketen protokolün ZigBee protokolü olduğu, onu Bluetooth ve en az güç tüketen enerji tüketen protokolün Thread olduğu tespit edilmiştir. Bluetooth testleri yapılırken kullanılan PHY modu LE 1M’dir. Diğer PHY modu olan LE Coded için test herhangi bir test yapılmamıştır ancak literatürde yapılan çalışmalar bize LE Coded modunda daha fazla enerji tüketebileceğini göstermektedir [32]. Öte yandan Bluetooth 5.0’ın düğümler arası haberleşme mesafesi ve seyahat hızı bakımından rakiplerinden oldukça üstün olduğu tespit edilmiştir.

Daha önce de bahsedildiği üzere Thread ve ZigBee yakın amaçlarla çalışmak üzere tasarlanan protokollerdir. İki protokolü doğrudan karşılaştırsak, iki protokolde aynı fiziksel katmanı kullanmasına rağmen Thread protokolün doğrudan 6LowPAN teknolojisi ile tasarlanması Zigbee’ye nazaran daha az güç tüketmesini sağlamaktadır[36]. Ayrıca Thread protokolün 6LowPAN sayesinde düğümler arası seyahat hızında ZigBee’den önde olduğu gözlemlenmiştir [37]. Eğer kullanılacak uygulamada güç tüketimi ile alakalı bir kısıt yoksa ise Bluetooth 5.0 ile az enerji, yüksek bant genişliği ve geniş mesafelerde çalışan bir ağ kurulması mümkündür. Ancak kısıtlı bir güç kaynağı kullanıyor ise Thread protokolünü kullanmanın ZigBee’ye nazaran daha avantajlı olacağı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Yoo Christopher S., Moore's Law, Metcalfe's Law, and the Theory of Optimal Interoperability, 2015, *Colorado Technology Law Journal*, **16**(7), 87-105.
- [2] Ashton K., That "Internet of Things" Thing: In the Real World Things Matter More than Ideas., *RFID Journal*, <http://www.rfidjournal.com/article/print/4986> (Ziyaret Tarihi: 1 Mayıs 2019).
- [3] Gubbi J., Rajkumar B., Slaven M., Marimuthu P., Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions, *Future Generation Computer Systems*, DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010
- [4] URL-1: <https://airqualityegg.com/home>, (Ziyaret tarihi: 4 Mayıs 2019).
- [5] URL-2: <http://bigbelly.com/>, (Ziyaret tarihi: 4 Mayıs 2019).
- [6] URL-3: <https://evreka.co/>, (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2019).
- [7] URL-4: <http://agritech-network.com/>, (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2019).
- [8] URL-5: <http://www.libelium.com/>, (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2019).
- [9] URL-6: <https://nest.com/>, (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2019).
- [10] URL-7: <https://www.smartthings.com/>, (Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2019).
- [11] Barry M. Leiner, Vinton G. Cerf, David D. Clark, Robert E. Kahn, Leonard Kleinrock, Daniel C. Lynch, Jon Postel, Larry G. Roberts, Stephen Wolff , A Brief History of the Internet, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, DOI: 10.1145/1629607.1629613
- [12] RFC1122 - Requirements for Internet Hosts - Communication Layers, Internet Engineering Task Force, 1989
- [13] RFC791 – Internet Protocol, Internet Engineering Task Force, 1981
- [14] RFC3443 – Time To Live (TTL) Processing in Multi-Protocol Label Switching (MPLS) Networks, Internet Engineering Task Force, 2003
- [15] RFC2460 – Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification, Internet Engineering Task Force, 1998
- [16] RFC5694 – Peer-to-Peer (P2P) Architecture: Definition, Taxonomies, Examples, and Applicability, Internet Engineering Task Force, 2009

- [17] Santra S., Acharjya P.P, A Study And Analysis on Computer Network Topology For Data Communication, 2013, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, **3**(1), 522-525.
- [18] 802.15.4-2014, Ultra-Low Power Physical Layer, IEEE, 2016
- [19] RFC4944 – Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, Internet Engineering Task Force, 2007
- [20] RFC4919 – IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals, Internet Engineering Task Force, 2009
- [21] Thread1.1.1 Specification, Thread Group, 2017
- [22] URL-9: https://www.threadgroup.org/Portals/0/documents/support/ThreadOverview_633_2.pdf, (Ziyaret Tarihi: 12 Mayıs 2019)
- [23] URL-10: <http://www.zigbee.org/wp-content/uploads/2014/11/docs-05-3474-20-0csg-zigbee-specification.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 12 Mayıs 2019)
- [24] 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).
- [25] URL-8: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PDK_User_Guide_v1.0.pdf, (Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2019).
- [26] URL-9: <https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug27brd4104a-user-guide.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2019).
- [27] Lyatuu C. A., An Analysis Of Bluetooth 5 Protocol In Comparison To The Preceding Bluetooth Versions, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018, 540338.
- [28] Marina P., Janne R., Saverio L., Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, DOI : 10.1109/WCNC.2006.1683512.
- [29] URL-10:<https://www.learnhimself.com/networking/topology-what-is-topology-online-study-computer-education-types-of-topology-learn-him-self> (Ziyaret Tarihi : 5 Mayıs 2019)
- [30] URL-11:<https://codelabs.developers.google.com/codelabs/openthread-simulation/#2>, (Ziyaret Tarihi : 6 Mayıs 2019)
- [31] URL-12:<https://cybermashup.files.wordpress.com/2017/11/zigbee-5.png>, (Ziyaret Tarihi : 6 Mayıs 2019)

- [32] Pau G., Collotta, M., Maniscalco V., Bluetooth 5 Energy Management through a Fuzzy-PSO Solution for Mobile Devices of Internet of Things., *Energies*, DOI: 10.3390/en10070992
- [33] Muhyi Bin Yaakop, Izwan Arief Abd Malik, Zubir bin Suboh , Aizat Faiz Ramli, Mohd Azlan Abu, Bluetooth 5.0 Throughput Comparison For Internet Of Thing Usability A Survey, *IEEE*, DOI: 10.1109/ICE2T.2017.8215995
- [34] S. Sujin Issac Samuel, A Review Of Connectivity Challenges in Iot-Smart Home, *ICBDSC*, DOI: 10.1109/ICBDSC.2016.7460395
- [35] Pratim Ray P., Agarwal S., Bluetooth 5 and Internet of Things: Potential and architecture, *SCOPES*, DOI:10.1109/SCOPES.2016.7955682
- [36] Mahmoud, Mahmoud S., Mohamad, Auday A. H, A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications, *Advances in Internet of Things*, DOI: 10.4236/ait.2016.62002
- [37] D. Lan, Experimental Study of Thread Mesh Network for Wireless Building Automation Systems, MS Dissertation, KTH Royal Institute Of Technology, Kth School Of Electrical And System Technology, Stockholm, 2016, 194440
- [38] Molisch A.F., Balakrishnan K., Cassioli D., Chong C., Emami S., Fort A., Karedal j., Kunisch J., Schantz h., Schuster U., Siwiak K. IEEE 802.15.4a channel model - final report, *IEEE*, IEEE P802 15.04, 15-18, 2004
- [39] URL-13: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.0.pdf (Ziyaret Tarihi: 7 Mayıs 2019)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yaşar Y., Urhan O., - Nesnelerin İnterneti Temelli Uygulamalarda Kullanılabilecek Düşük Güçlü Kablosuz Haberleşme Protokollerinin Karşılaştırılması, Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Kasım 2018



ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Iğdır/Tuzluca'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'un Pendik ilçesinde tamamladı. 2010 yılında girdiği Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünden 2014 yılında mezun oldu. 2015 Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dal'ında başladığı yüksek lisans eğitimini 2019 yılı itibari ile tamamlamak üzeredir. 2018 Yılından beri Siemens firmasında Yazılım Mühendisi olarak çalışmaktadır.

