

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EVDE SAĞLIK UYGULAMALARI İÇİN ENERJİ VERİMLİ NESNELERİN
İNTERNETİ PROTOKOLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Miraç BEKTAŞ

OCAK 2019
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EVDE SAĞLIK UYGULAMALARI İÇİN ENERJİ VERİMLİ NESNELERİN İNTERNETİ
PROTOKOLÜ**

Miraç BEKTAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"BİLGİSAYAR YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 01 / 2019

Tezin Savunma Tarihi : 04 / 01 / 2019

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Sedat GÖRMÜŞ

Trabzon 2019

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
Miraç BEKTAŞ Tarafından Hazırlanan

EVDE SAĞLIK UYGULAMALARI İÇİN ENERJİ VERİMLİ NESNELERİN İNTERNETİ
PROTOKOLÜ

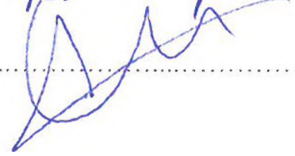
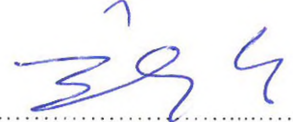
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 18 / 12 / 2018 gün ve 1783 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : PROF. DR. ERDAL KILIÇ

Üye : DR. ÖĞR. ÜYESİ SEDAT GÖRMÜŞ

Üye : DR. ÖĞR. ÜYESİ İBRAHİM SAVRAN



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Tez çalışması kapsamında Nesnelerin İnterneti Teknolojisi için enerji verimliliği konuları ele alınmıştır. Nesnelerin İnternet'i cihazlarının giderek yaygınlaştığı dünyamızda buna paralel olarak ortaya çıkan bu cihazların pil ömrü sorunu da yaygın bir problem haline gelmiştir. Çalışma içerisinde bu güç tüketimine neden olan etkenler belirlenmiştir. Güç tüketimini azaltmayı hedefleyen yeni bir algoritma geliştirilerek Evde Sağlık Uygulamaları için enerji verimli iletişim protokolü geliştirilmiştir. Geliştirilen bu protokolün prototip bir cihaz üzerinde testleri yapılmış ve sonuçları sunulmuştur.

Tez çalışmamızın ana hatlarının belirlenmesinde, yürütülmesinde ve çalışmanın ufkunun genişletilmesinde her zaman bilgi ve tecrübelerini paylaşıp çalışmamızı bilimsel anlamda zenginleştiren, değerli vaktini ayıran, fikirleriyle aydınlatan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sedat GÖRMÜŞ ve ekibine;

Bu tez süreci boyunca manevi desteğiyle yanımda olan ve çalışmamızla alakalı mesleki bilgilerini aktaran çok değerli nişanlım Dr. Burcu BAHADIR' a


Sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Miraç BEKTAŞ

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Evde Sağlık Uygulamaları İçin Enerji Verimli Nesnelerin İnterneti Protokolü” başlıklı bu çalışmayı danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sedat GÖRMÜŞ’ün sorumluluğunda tamamladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, tez sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/01/2019


Miraç BEKTAŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Nesnelerin İnterneti.....	1
1.2. İletişim ve Bağlantı Modelleri	2
1.2.1. Cihazdan Cihaza İletişim (Device-to-Device Communication).....	2
1.2.2. Cihaz Bulut İletişimi (Device to Cloud Communication).....	3
1.2.3. Cihaz Geçiş Yolu İletişimi (Device to Gateway Communicaton).....	4
1.2.4. Arka-Uç Veri Paylaşım Modeli (Back-End Data-Sharing Model).....	5
2. IEEE 802.15.4 STANDARTI.....	7
2.1. CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access, Çoklu Erişimde Hat Kontrolü).....	11
2.2. Pure Aloha	12
2.3. Slotted Aloha	13
3. 6LOWPAN	14
3.1. 6LoWPAN Adaptation Layer.....	16
3.1.1. Header Compression and Decompression (Başlık sıkıştırma ve çözme).....	17
3.1.2. Fragmentation and Reassembly (Parçalama ve Tekrar Toplama).....	19
3.1.3. Routing	19
4. TSCH.....	21
4.1. Gelişmiş İşaretçiler (Enhanced Beacons- EB).....	27
4.1.1. Uygun İşaretçi Gönderimi	28
5. 6TISCH	29
5.1. 6Top	30
6. IPV6	32

6.1.	Unicast.....	32
6.2.	Multicast.....	32
6.3.	Anycast.....	32
6.4.	Otomatik Adres Yapılandırması.....	33
6.4.1.	IPv6 Komşu Keşfi (Neighbor Discovery- ND).....	33
7.	DÜŞÜK GÜÇLÜ VE KAYIPLI AĞLAR İÇİN YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ (RPL).....	36
8.	COAP.....	40
8.1.	Cross CoAP Vekil Sunucu.....	41
9.	CONTIKİ İŞLETİM SİSTEMİ.....	42
9.1.	COOJA.....	44
9.1.1.	Contiki ile IPv6 Ağı Kurmak.....	46
10.	İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	47
11.	ÇALIŞMA.....	50
11.1.	Neden Bu Çalışma?.....	51
12.	DÜŞÜK GÜÇ TÜKETİMİ İÇİN YAKLAŞIMLAR.....	53
12.1.	Çerçeve Zamani Boyutu.....	53
12.2.	İşaretçi Gönderimi.....	54
12.3.	İletim Gücü Kontrolü.....	54
12.4.	Verileri Önceliklendirmek.....	55
13.	ALGORİTMA.....	57
13.1.	Bağlantı Bütçeleme (Link Budget) Algoritması.....	57
14.	TEST ORTAMI.....	60
15.	TESTLER.....	63
16.	SONUÇ.....	67
17.	KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Evde Sağlık Uygulamaları İçin Enerji Verimli Nesnelerin İnterneti Protokolü
Miraç BEKTAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sedat GÖRMÜŞ
2019, 85 Sayfa

Nesnelerin İnternet'iyle hayatımızın bir parçası haline gelen giyilebilir teknolojiler giderek yaygınlaşmaktadır. Nesnelerin İnternet'i ağında büyük bir yeri olan bu cihazların çoğu düşük kapasiteli pillerle uzun süre çalışmaları gerekmektedir.

Bu çalışmada evde sağlık uygulamaları için kullanılan hasta duyargalarının enerji verimli olarak İnternet'e veri aktarması hedeflenmektedir. Toplanan veriler evde bulunan İnternet'e bağlı bir kablosuz ağ geçidi yardımıyla bir bulut servisine iletilecektir.

Geliştirilen yöntemler sayesinde düşük güçlü, uzun mesafede haberleşebilen ve yüksek kararlılığa sahip bir evde sağlık uygulaması gerçekleştirmek mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Nesnelerin İnterneti, Evde Sağlık, IETF 6TiSCH, Düşük Güçlü Haberleşme

Master Thesis

SUMMARY

An Energy Efficient IoT Protocol for Healthcare at Home

Miraç BEKTAŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Computer Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Sedat GÖRMÜŞ
2019, 85 Pages

Wearable technologies, which have become a part of our Daily lives, are becoming increasingly widespread. Most of these devices, which have a large place in the Internet of Things, are required to work with low capacity batteries for a long time.

In this study, it is aimed to transfer the energy of the patient sensors used in home health applications to the servers located in the Internet efficiently. The collected data will be transmitted to a cloud service via a wireless gateway at home.

Thanks to the developed methods, it will be possible to realize a low-power, long-distance communication and high-stability home healthcare practice.

Key Words: Internet of Things, HealthCare, IETF 6TiSCH, Low Power Communication

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Nesnelerin İnternet’i ağı [6].....	2
Şekil 2. Cihazdan Cihaz İletişim Modeli	3
Şekil 3. Cihaz Bulut İletişim Modeli	4
Şekil 4. Cihaz-Ağ Geçidi İletişim Modeli.....	5
Şekil 5. Arka Uç Veri Paylaşım Modeli.....	6
Şekil 6. 802.15.4 frekans aralıkları [18].....	8
Şekil 7. Tekrarlayıcı ile İletişim	9
Şekil 8. RFD ve FFD Cihazlar.....	9
Şekil 9. Yıldız ve Uçtan Uca Ağ Topolojisi.....	10
Şekil 10. Pure Aloha Yöntemi	12
Şekil 11. Slotted Aloha Yöntemi	13
Şekil 12. 6LoWPAN Ağ Şeması	15
Şekil 13. IEEE 802.15.4 çerçevesi.....	17
Şekil 14. Adaptasyon Katmanı Yönlendirme Çeşitleri	20
Şekil 15. TSCH zaman dilimi çizelgesi	22
Şekil 16. TSCH Çerçeve Modeli	23
Şekil 17. IEEE802.15.4e TSCH ağlarında ACK ve çerçeve tabanlı senkronizasyon	24
Şekil 18. TSCH Veri İletim	26
Şekil 19. 6TiSCH Mimarisi.....	30
Şekil 20. RPL ağlarında iki düğüm arasında uçtan uca veri iletim akışı [49].....	37
Şekil 21. Dodag Ağı.....	38
Şekil 22. Dodag versiyon numarası	39
Şekil 23. Çekirdek ve yüklü programların gösterimi [51]	43
Şekil 24. Contiki OS Mimarisi [55].....	44
Şekil 25. Bilgisayar ve Duyarga Ağı Bağlantısı.....	46
Şekil 26. Arçelik markasının geliştirdiği mobil ekg cihazı [55]	47
Şekil 27. SPHERE topluluğunun kullandığı bazı duyargalar.....	49
Şekil 28. Çalışmaya ait şema.....	51

Şekil 29. Cooja ağ simülatöründe farklı mesafelerdeki düğümler ve çekim alanları	55
Şekil 30. Çalışmanın ev ortamındaki uygulanişı	56
Şekil 31. Enerji verimli iletim algoritması	59
Şekil 32. Mahmote düğümü	60
Şekil 33. LiPo Pil	61
Şekil 34. MAX30102 duyargası	61
Şekil 35. 12, 24 ve 48 saatlik test sonuçları	63
Şekil 36. Cooja ortamında istemci ve toplayıcı düğümün radyosunu kullanma oranı	66

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. 6LoWPAN Protokol Yığılı	14
Tablo 2. Adaptasyon Katmanı	16
Tablo 3. Sıkıştırılmış IPv6 başlığı	18
Tablo 4. IPv6 Alanları	18
Tablo 5. 6TiSCH Protokol Yığılı	30
Tablo 6. ICMP Mesaj Yapısı	34
Tablo 7. Farklı koşullar altında yapılan testler ve sonuçları	64
Tablo 8. CC2538 donanımına ait iletim g¼c¼ tablosu	65

SEMBOLLER DİZİNİ

6LoWPAN	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks
CoAP	Constrained Application Protocol
DODAG	Destination Oriented Directed Acyclic Graph
DTLS	Datagram Transport Layer Security
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol Version 6
IPHC	IP Header Compression
LoWPAN	Low-Power Wireless Personal Area Network
MAC	Media Access Control
PHY	Physical Layer
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
WSN	Wireless Sensor Network
ROM	Read Only Memory
RAM	Random Access Memory
IEEE	Institute of Electrical & Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
ROLL	Routing over Low-Power and Lossy Networks
RPL	IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
6TiSCH	IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e
DIO	DODAG Information Object
DAO	Destination Advertisement Object
DIS	DODAG Information Solicitation
EB	Enhanced Beacon
IE	Information Element
ASN	Absolute Slot Number
Tx	Transmit
Rx	Reception
MTU	Maximum Transmission Unit

ND	Neighbor Discovery
LiPo	Lityum Polimer
PAN	Personal Area Network
RFD	Reduced Function Device
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
FFD	Full Function Device

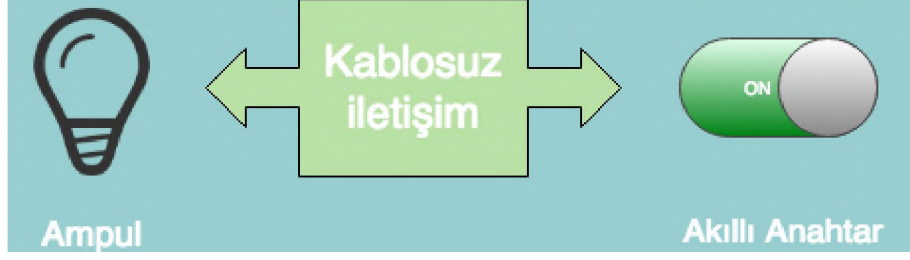
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Nesnelerin İnterneti

Son zamanlarda adını daha fazla duyar olduğumuz nesnelerin İnternet'i kavramı ilk olarak 1999 yılında Kevin Ashton tarafından hazırlanan sunumda ortaya çıkmıştır [1]. Nesnelerin İnternet'i ağındaki cihazlar insan müdahalesi olmaksızın kablosuz duyargalar aracılığıyla veriler üretebilir bu verileri birbirleriyle veya daha büyük sistemlerle paylaşabilir ve bir eylem gerçekleştirebilirler. Nesnelerin İnternet'i uygulamaları akıllı şehir ve ev sistemlerinde, sanayi otomasyonlarında, canlı cansız varlıkların takibinde ve izlenmesinde, uzaktan sağlık hizmetlerinde ve daha birçok alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Maliyetinin düşük oluşu ve ihtiyaçlara cevap verme gücünün yüksek olması bu teknolojiyi giderek yaygınlaştırmaktadır.

Her bir cihazın benzersiz şekilde adreslendiği bu ağda cihazlar çeşitli protokoller ile birbirleriyle haberleşebilmektedir. Birçok şirket ve araştırma grupları nesnelerin İnternet'i ağının önümüzdeki yıllarda hayatımıza ne kadar etki göstereceği konusunda çalışmalar yapmaktadır. Örneğin ağ teknolojilerindeki en büyük kuruluşlardan biri olarak görülen Cisco, 2019 yılında 24 milyardan fazla nesnelerin İnternet'i cihazının İnternete katılacağını öngörüyor [2]. Bir diğer ağ ve teknoloji şirketi Huawei 2025 yılında nesnelerin İnternet'i cihazlarının sayısının 100 milyarı geçeceğini belirtiyor [3]. Bazı gözlemciler ise nesnelerin İnternetini tamamen birbirine bağlı, küresel bir dünya haline gelen ve büyük ekonomilere dönüştüren bir devrim olarak görmektedir [4]. Fakat bu gelişimin bir de beraberinde getirdiği bazı problemler vardır, gizlilik ve güvenlik en temel problemler olarak görülmektedir [5]. Bu yüzden nesnelerin İnternet'i teknolojisi gelişirken güvenlik ve gizlilik konuları da ayrıca ele alınıp bu alanda da birçok araştırma ve geliştirme yapılmaktadır.

Günümüzde nesnelerin İnterneti'nin neden çok popüler hale geldiği hakkında akıllara bazı sorular gelebilir. Geliştirilen devre kartlarının ucuz, yüksek hızlı, boyut olarak daha küçük olması, bulut servislerinin hızla yaygınlaşması, geliştirilen yeni algoritmalar, artan işlem gücü ve depolama alanları, gelişen lisanslı ve lisanssız kablo iletişim servisleri ve daha birçok teknoloji nesnelerin İnternet'i teknolojisini beraberinde getirmiştir.

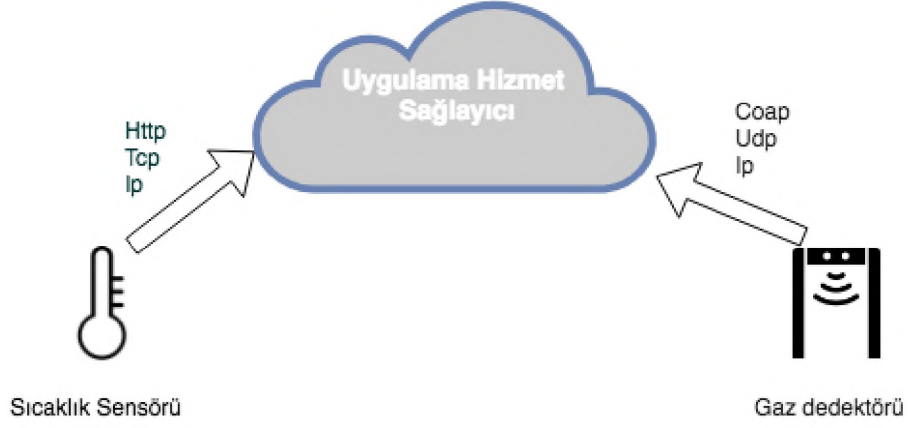


Şekil 2. Cihazdan Cihaz İletişim Modeli

Bu model genellikle ev otomasyonlarında ve aralarındaki paket alışverişinin düşük boyutlu olduğu iletişimlerde tercih edilir. Bir ev otomasyonunda ampuller, akıllı anahtarlar, akıllı kilitler, termostatlar çok küçük boyutta veri gönderen cihazlardır. Kullanıcılar cihazlarını seçerken belirli protokoller ile uyumlu cihazları seçmeleri gerekmektedir. Bu da farklı protokollerin haberleşme sorununu beraberinde getirir. Örneğin Bluetooth ile haberleşen bir ev otomasyonuna yeni eklenecek bir duvara otomasyon ile ZigBee protokolünde haberleşemez. Kullanıcı kullanmak durumunda kaldığı protokol ailesine ait cihazlar temin etmelidir.

1.2.2. Cihaz Bulut İletişimi (Device to Cloud Communication)

Bu iletişim modelinde cihazlar direkt olarak bir bulut hizmet sağlayıcısına bağlanabilirler. Bu yaklaşımda geleneksel kablolu (Ethernet) kablosuz (Wi-Fi) haberleşme teknolojilerinden yararlanılarak cihazlar İnternete bağlanır. Şekil 3’de örnek bir cihaz bulut iletişimi gösterilmiştir.

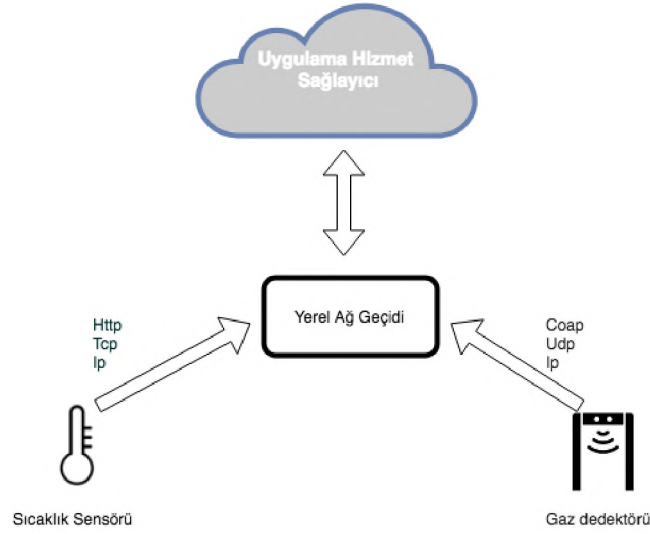


Şekil 3. Cihaz Bulut İletişim Modeli

Cihazlar bağlı oldukları bulut servisine kayıt olup, İnternet ortamından gerçek zamanlı kontrol edilebilmekte ve yönetilebilmektedirler. Bulut servisler ve cihazlar bazen aynı üreticinin üretimi olabileceği gibi cihazlar ayarlandığı takdirde, Microsoft Azure, Amazon veya kişisel bulut servislere de bağlanabilirler.

1.2.3. Cihaz Geçiş Yolu İletişimi (Device to Gateway Communicaton)

Bu iletişim modelinde cihazlar ile bulut servis arasında bir geçiş yolu (gateway) bulunur. Cihazlar ile bulut servis arasına böyle bir geçiş yolu koymak güvenliği sağlarken fonksiyonelliği artırır. Bu geçiş yolu aynı zamanda cihazlar arasındaki iletişimi, protokol dönüşümlerini de sağlar. Şekil 4’de bir cihaz geçiş yolu iletişimi örneği vardır.



Şekil 4. Cihaz-Ağ Geçidi İletişim Modeli

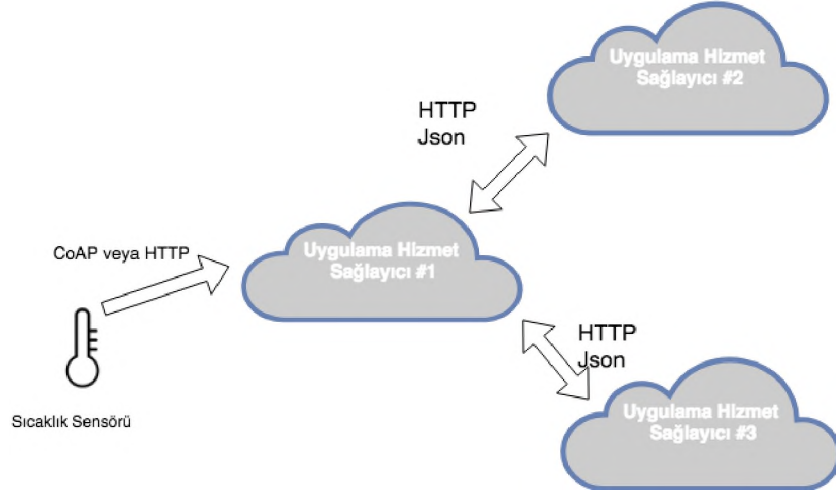
Bu modelin çoğu durumunda geçiş yolu bir akıllı cep telefonu olabilmektedir. Akıllı cep telefonu üzerinde çalışan bir uygulama cihazlar ile Bluetooth veya Wi-Fi ile haberleşip elde ettiği verileri bulut servislere yükleyebilir. Buna kişisel sağlık takip uygulamaları örnek verilebilir.

Cihazların geçiş yolu ile diğer bir bağlantı şekli ise 802.15.4 protokolüdür. Düşük güçte kablosuz haberleşmeyi sağlayan bu protokol ile kablosuz kişisel alan ağları oluşturabilir.

1.2.4. Arka-Uç Veri Paylaşım Modeli (Back-End Data-Sharing Model)

Bu iletişim modeli aslında cihazdan buluta iletişim modelinin bir uzantısıdır. Cihazlar farklı uygulama servisleriyle direkt veya dolaylı yoldan bağlantı kurabilirler. Farklı servislere veri gönderebilir, uygulama program arayüzleriyle (API) verilerini paylaşabilirler. Örneğin bir sağlık takip uygulaması düşünüldüğünde farklı servislerin farklı kaynaklardan veriler toplayarak, analiz ve birleştirme sonucu bu verilerin sunumunu yapması. Bu iletişim modeli sayesinde servisler yardımlaşarak çalışabilirler.

Şekil 5’de bir arka- uç veri paylaşım modeli örneği verilmektedir.



Şekil 5. Arka Uç Veri Paylaşım Modeli

2. IEEE 802.15.4 STANDARTI

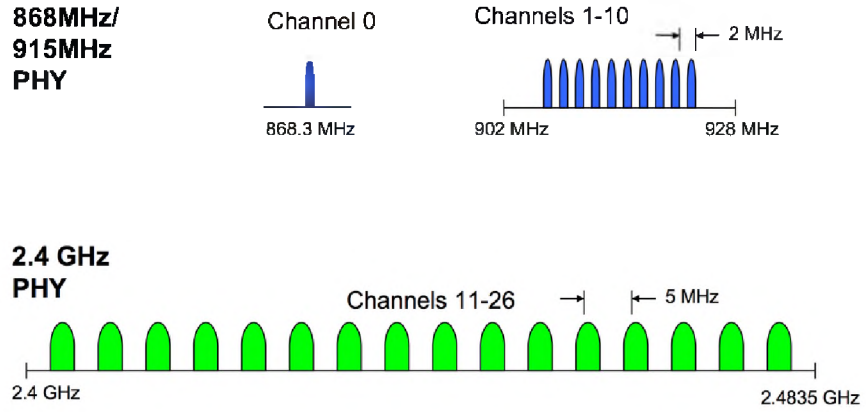
Kablosuz duyurga ağları (KDA), birçok farklı noktalardan algılama, hesaplama ve iletişim yeteneklerini sağlamak için çevre bilgilerini toplar. KDA'lar birbirine uzak ve çevresel şartların zor olduğu konumlarda veri toplama için önemli varlıklar olsalar da, bu tür ağlar yalnızca bileşenlerinin pil kapasitesi kadar ayakta kalabilmektedirler. Bu koşullarda pili şarj etmenin zorluğu nedeniyle, bir duyurganın kullanılabilirliği ilk pil kapasitesine ve enerji tüketimi verimliliğine bağlıdır. Bu nedenle, batarya ile çalışan bir ağın ömrünü uzatmak, birçok KDA' da birincil bir düşüncedir.

IEEE çalışma grupları kablolu ve kablosuz iletişim için birçok standart geliştirmektedir. 802.3 [8] kablolu iletişimi, 802.11 [9] kablosuz yerel ağları (WLAN) ve 802.15 kablosuz kişisel alan ağlarını (Wireless Personal Area Networks-WPANs) tanımlar. Kablosuz kişisel alan ağlarına 802.15.1 Bluetooth [10], 802.15.3 [10], ultra geniş bant haberleşme (UWB) gibi örnekler verilebilir. Fakat bu ailenin en yaygın olanı 802.15.4 standardıdır. 802.15.4 standardı, 802 ailesinin bir üyesi olmasına rağmen bütün özelliklerini içermez. IEEE 802.15.4 [11] düşük güçlü, genelde batarya ile çalışan cihazlar, düşük maliyetli ve düşük veri hızlı cihazlar için geliştirilmiş kablosuz ağların fiziksel ve ortam erişim katmanını tanımlar. İlk defa 2003 yılında ortaya çıkan ve geliştirilmeye devam eden 802.15.4 standardını Zigbee, WirelessHart ve 6LoWPAN gibi protokol katmanları kullanmaktadır [12].

Fiziksel katman, sinyal algılama, radyo verici ve alıcısının açılıp kapatılması, modülasyon tekniklerinin belirlenmesi, veri gönderim ve alım işlerinin yapıldığı katmandır. Bütün bu yeteneklerinden dolayı güç tüketimine direkt olarak etkisi vardır. Uygulama ihtiyaçlarına göre düzenlenerek güç tasarrufu sağlanabilecek bir katmandır. Üst katmanlar (MAC ve Network) kullanacağı kanala karar verirken fiziksel katmanın bilgisine ihtiyaç duyarlar. Çünkü çevresel gürültü ve elektromanyetik bozulmalar bağlantı kalitesini düşünür. Eğer seçilen kanal o an için uygun değilse, diğer boş kanallar fiziksel katman tarafından önerilir. Kullanılması durumunda verimli iletişim gerçekleşmeyecek olan kanallar varsa bu kanalların da tahsisini engelleyerek doğru kanal seçilmesini sağlar. IEEE 802.15.4 en büyük amaçlarından biri enerji korumak olduğu için, iletim yapılmadığı zamanlarda radyonun kapalı tutulması önem arz etmektedir. Fiziksel katman donanım seviyesinde işlemlerin yürütüldüğü radyo açılıp kapatılmasıyla da ilgilenmektedir.

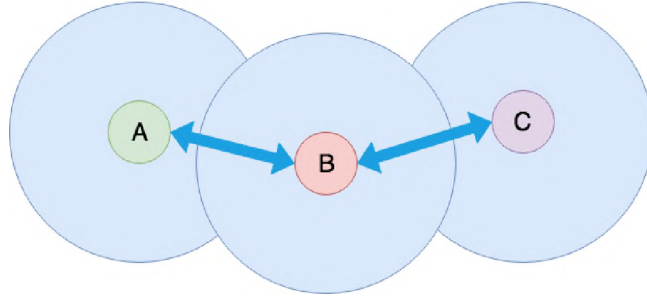
IEEE 802.15.4 ortam erişim katmanı (MAC) ise, üst katmanlar ve fiziksel katman arasındaki bağlantıyı sağlar [13]. MAC katmanı ayrıca kanal erişimi, çerçeve doğrulama işlemi, bağlantı yönetimi, güvenlik ve düğümlerin eş zamanlanmasıyla da ilgilenir.

Ağ Dünya genelinde üç farklı frekansta; 868.3 MHz 1 kanal, 20 kbps ile Avrupa’da, 902-928 MHz 10 kanal, 40 kbps ile Amerika’da, 2,4 GHz 16 kanal, 250 kbps ile bütün dünyada yayın yapılmaktadır. Şekil 6’de frekansların kanallara bölünmesi gösterilmiştir [14].



Şekil 6. 802.15.4 frekans aralıkları [15]

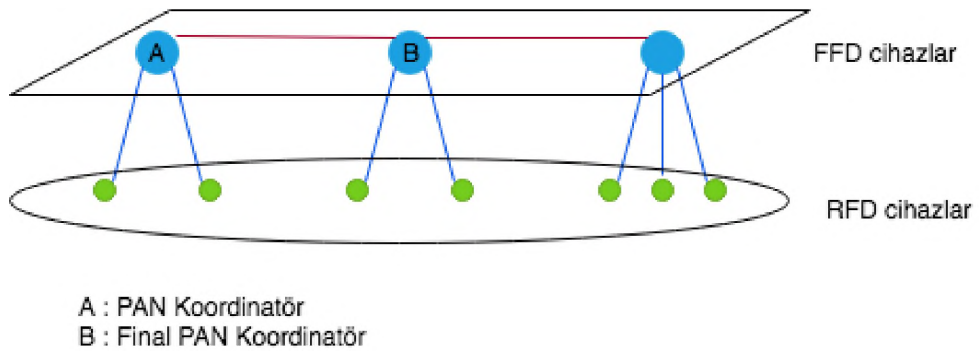
Düğümmler sınırlı çekim alanına sahiptirler. Bir veriyi uzak bir noktaya göndermek istediklerinde çekim alanını aşamazlar. Bunun yerine aralara eklenecek düğümler (tekrarlayıcı düğümler) ile beraber iletim alanı dışında kalan noktalara da veri göndermek mümkün olacaktır. Şekil 7’de A düğümü iletim alanı dışarısında kalan C düğümüne veri göndermek istediğinde bu iletimi B düğümü üzerinden yapabilmektedir. Bu ağ yapısına çok düğümlü (multi-hop) ağ denir.



Şekil 7. Tekrarlayıcı ile İletişim

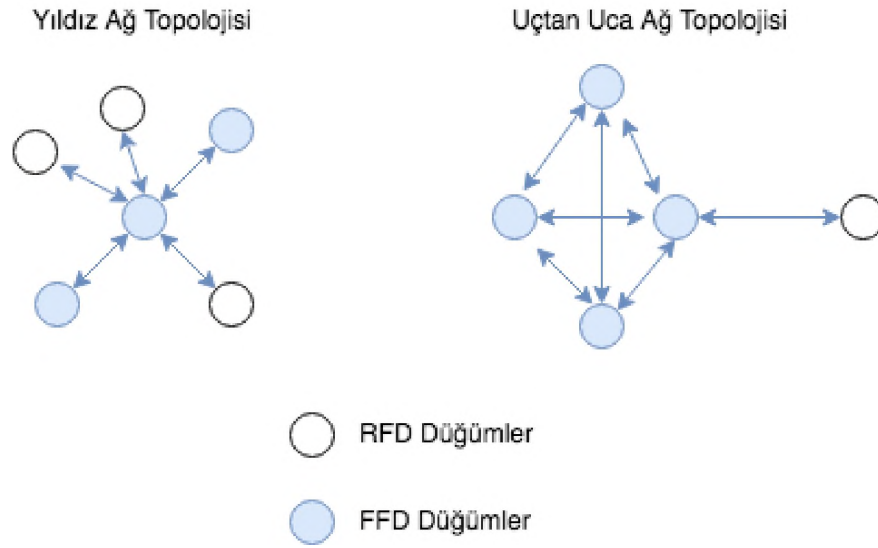
Standart olarak iki tür ağ düğümü bulunur; Tam Fonksiyonlu Cihaz (Full-Function Device-FFD) ve Azaltılmış Fonksiyonlu Cihaz (Reduced-Function Devices-RFD). Tam fonksiyonlu cihazlar ağda koordinatör olarak görev yaparlar. Bütün düğümlerin ortam düğümü olarak çalışabilirler. Cihazların birbirleriyle iletişim kurup veri alıp göndermesini sağlar ve PAN koordinatörü gibi davranır. Yüksek işlem yetenekleri sayesinde fazla güç tüketimi olduğu için genellikle güce bağlı cihazlardır.

Azaltılmış fonksiyonlu cihazlar çok düşük kapasiteli olup sınırlı kaynaklara sahiptirler. Genellikle uç düğüm olarak görev aldıkları için güce bağlı değil batarya ile uzun zaman çalışabilecek cihazlardır. İletişimini doğrudan PAN koordinatör ile kurar ve hiçbir zaman koordinatör görevi almazlar. Ağ gereksinim duyduğu zamanlarda bazılarını tekrarlayıcı düğüm olarak atayabilir. Şekil 8'de FFD ve RDF cihazlarının ağ üzerindeki yapısı verilmiştir.



Şekil 8. RFD ve FFD Cihazlar

Ağın kurulumu basit ve maliyeti ucuz olduğu için uygulamaların ihtiyacına göre binlerce düğümün katılabildiği ağ topolojileri oluşturulabilir. IEEE 802.15.4 iki farklı ağ topolojisinde oluşturulabilir; star (yıldız) ve peer-to-peer (uçtan uca). Şekil 9'da bu iki topoloji örneği verilmiştir. Ağ PAN (Personal Area Network- Kişisel Alan Ağı) koordinatörü tarafından yönetilir. Her iki ağ topolojisi de tam kapasiteli cihaza (FFD) ihtiyaç duyarlar.



Şekil 9. Yıldız ve Uçtan Uca Ağ Topolojisi

Yıldız ağ topolojisinde iletişim, cihazlar ve PAN adı verilen merkezi bir kontrol düğümüyle bağlantı kurarlar. PAN koordinatör diğer düğümlerle aynı özelliklere sahip bir başlangıç veya sonlanma noktası olabilir. Fakat PAN koordinatör düğümleri bazı farklı özelliklere sahip olabilirler. Bu özellikler ağın başlatılması, sonlandırılması veya iletişimin yönlendirilmesi olabilirler. PAN koordinatörler genelde sabit bir güce bağlıyken, diğer düğümler çoğunlukla batarya ile çalışan düğümlerdir. Yıldız topolojisiyle kişisel otomasyonlar ve basit gözlem sistemleri geliştirilebilir.

Uçtan uca ağ topolojisi (P2P) de yıldız topolojisi gibi PAN koordinatöre sahiptir. Fakat yıldız topolojisinden farklı olarak bu ağdaki düğümler de kendi aralarında iletişim kurabilmektedirler. Yine yıldız topolojisinden farklı olarak daha büyük endüstriyel gözetim sistemleri ve otomasyonlar bu yapıyla kurulabilir.

PAN koordinatörünün ağ topolojisindeki konumu ağ oluşum hızına doğrudan etkilidir. PAN koordinatörüne olan uzaklık aynı zamanda uç düğümlerin enerji tüketimini

de etkiler [16]. Dolayısıyla bir ağ oluştururken, yapılacak çalışmaya göre PAN koordinatörünün doğru konumlandırılması 802.15.4 ağlarında önem kazanmaktadır.

Kablosuz duyurga ağlarında birçok düğüm bir araya gelip büyük bir sistem kurarlar. Bu ağlarda düğümler çok hızlı bir şekilde ağa katılıp otomatik olarak eş zamanlanırlar. Bu ağlara geçici (Ad-Hoc) ağlar denir. Bu ağlardaki düğümler çevrelerinden topladıkları verileri birbirleriyle veya daha büyük sistemlerle paylaşabilirler. Ağdaki herhangi bir değişikliğe bütün düğümler anında adapte olurlar.

IEEE 802.15.4 MAC katmanı işlevlerini slotlu ve slotsuz olmak üzere iki şekilde gerçekleştirir. Slotlu iletişimde her bir düğüme kanal belirli periyotlar halinde paylaşılır. Slotsuz iletişimde ise kanalı kullanmak isteyen düğümler herhangi bir anda kanalı kullanır. Kanala erişimindeki çakışmayı engellemek için IEEE 802.15.4 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance- Çoklu Erişimde Hat Kontrolü) tekniğini kullanır.

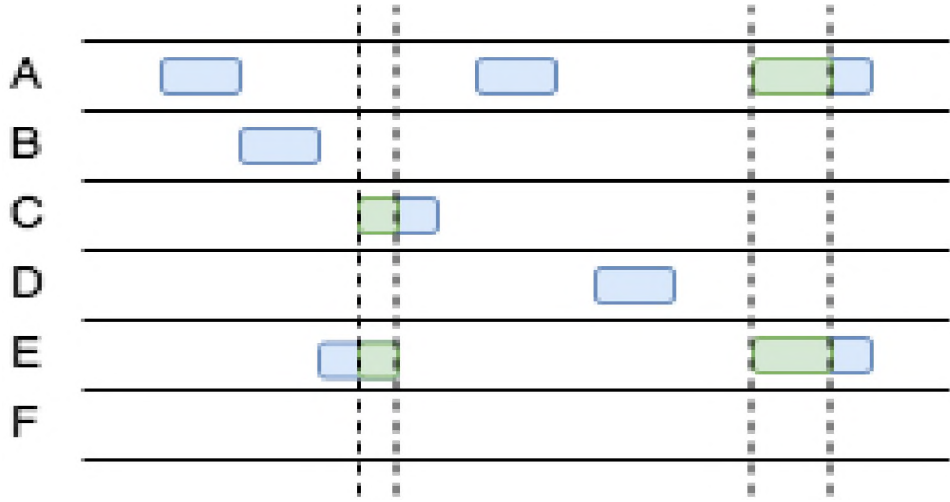
2.1. CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access, Çoklu Erişimde Hat Kontrolü)

Bir kanala aynı anda birden fazla erişim olması durumunda kullanılan, çakışmayı önleyici bir tekniktir. Kanalı kullanmak isteyen düğümler hattı belirli bir süre dinler, eğer hat boşsa kanalı kullanmaya geçer, doluyrsa rastgele bir süre bekleyerek tekrar dener. Çakışma olma olasılığı devam etmektedir. Her gönderilen pakete karşılık gönderene ACK (Acknowledge-Kabul) paketi gönderilir. Gönderen ACK paketini almazsa veri tekrar gönderilir. Gönderilen her paketin sonuna CRC byteleri eklenir. Alıcı gelen paketten CRC'yi tekrar hesaplar farklılık varsa gelen paketi reddeder.

CSMA tekniğinde hattın sürekli olarak boş veya doluluğu kontrol edildiği için düşük bant genişlikli ağlarda bu durum zorlaşmaktadır. Bunun yerine Pure Aloha tekniği kablosuz kişisel alan ağlarında daha etkili sonuçlar verir ve çakışmayı azaltır. Pure Aloha, ortam erişim katmanında uygulanan rastgele erişim protokolüdür [17]. Bir kaynağın gönderecek verisi olduğunda iletişim kanalına bu veriyi göndermesidir. Veri başarılı bir şekilde hedefe ulaşırsa, sonraki veri gönderilir [18]. Pure Aloha yönteminde iletişim kanalları cihazlar tarafından herhangi bir zaman diliminde paylaşılabilir [19]. Pure Aloha yönteminin amacı ortam erişim katmanında hangi düğümün ne zaman iletişim kanalına erişim sağlayacağına karar vermektir. İki çeşit Aloha tekniği vardır.

2.2. Pure Aloha

Yöntem, 1970'lerin başında Norman Abramson ve arkadaşları tarafından Hawaii Üniversitesi'nde tanıtıldı [20]. Pure Aloha yönteminde sürekli zaman söz konusudur, yani bu yöntem düğümün gönderecek verisi olması durumunda göndermeye çalışmasını ifade eder. Bir düğüm veri göndermek istediğinde kanal boş mu veya kullanımda mı diye kontrol etmeden gönderdiği için çerçevelerin çakışma olasılığı söz konusudur. Gönderilen veriye karşılık olarak alındığını onaylayan bir mesaj (Acknowledge) gelirse, iletim başarılı olmuş demektir. Bu onay mesajının gelmediği durumda ise iletim başarısızlıkla sonuçlanmış olur. Bu durumla karşılaşan bir düğüm rastgele bir süre bekleyerek paketi tekrar gönderir. Aynı durumun olması halinde paket başarıyla iletilene kadar iletim tekrarlanır (retransmission). Şekil 10'de görüldüğü gibi bazı paketler çakışmıştır.

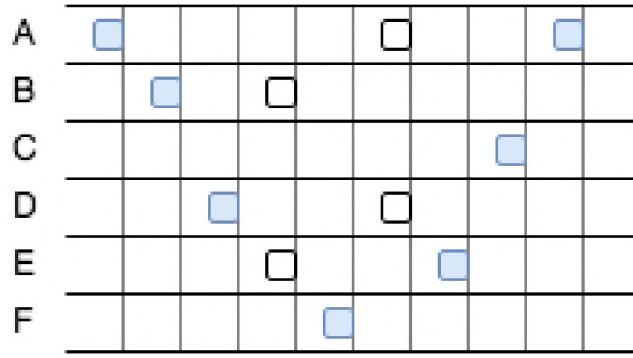


Şekil 10. Pure Aloha Yöntemi

Bu yöntemde bir düğüm gönderecek verisi olduğu anda göndermesinden dolayı veri çakışma durumu oldukça yüksektir. Şekil 10'da görüldüğü gibi, C ve E düğümleri aynı anda veri gönderdiği için paket çakışması gerçekleşmiştir. Bu çakışmalarla bozulan veriler belirli periyotlarla tekrar gönderilmeye çalışılarak bozuk ve kayıpsız veri iletimi sağlanır. Paket uzunluklarını benzer yapmak iletişim çıktısını artırır [21].

2.3. Slotted Aloha

1970'lerde ortaya çıkan Pure Aloha'nın ardından Roberts 1972 yılında Pure Aloha'nın yeteneklerini artırmak için Slotted Aloha yöntemini ortaya çıkarmıştır. Bu yöntem, zamanı alt zaman dilimlerine bölmeyi önerir. Her zaman dilimi paket uzunluğu kadardır. Bir önceki teknikte düğümün ne zaman veri göndereceği belirli değilken, bu yöntemde verinin hangi zaman diliminde gönderileceği belirlidir. Paket iletim için bir sonraki zaman diliminin başlangıcını bekler. Bu sayede çakışmanın önüne geçilmiş olur ve senkronizasyon sağlanmış olur. Şekil 11'de örnek bir Slotted Aloha iletimi vardır.



Şekil 11. Slotted Aloha Yöntemi

Sonuç olarak Slotted Aloha'nın, Pure Aloha'dan daha verimli çalıştığı ortaya çıkarılmıştır. Düğüm bir sonraki zaman dilimini beklediği için veri çakışma olasılığı, Pure Aloha'ya kıyasla Slotted Aloha'da daha az olur.

3. 6LoWPAN

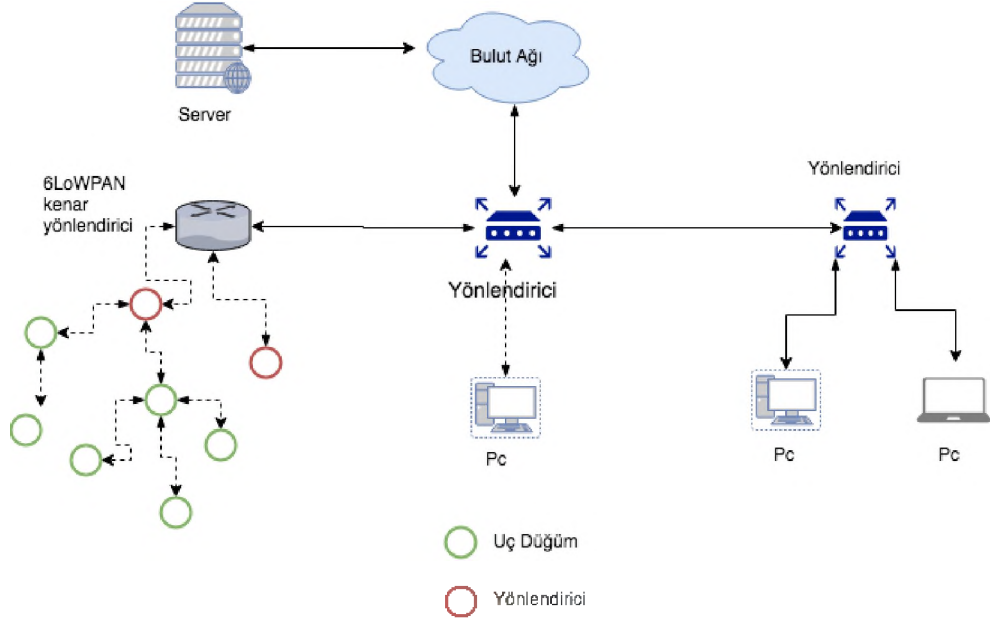
6LoWPAN IETF (Internet Engineering Task Force, İnternet Mühendisliği Görev Grubu) tarafından RFC 6282 standardı içerisinde tanımlanmıştır [22]. İsim olarak 6LoWPAN (IPv6 Over Low-Power Wireless Personal Area Networks), IPv6 paketlerinin düşük güçlü kablosuz kişisel alan ağları üzerinden taşınmasıdır. 6LoWPAN düşük güçlü IP tabanlı ve geniş ağ topolojileri kurabilmesiyle nesnelerin İnternetine çok iyi bir seçenek olmuştur. 6LoWPAN teknolojisinin en önemli yeteneği, fiziksel katman ve veri katmanında IEEE 802.15.4 protokol yığınının kullanılarak oluşturulan bilginin ağ katmanında IPv6 paketleri şeklinde taşınmasını sağlamaktır. Tablo 1’de 6LoWPAN iletişim kuralları yığını verilmiştir.

Tablo 1. 6LoWPAN Protokol Yığını

Uygulama Katmanı	CoAP
İletim Katmanı	UDP
Ağ Katmanı	IPv6/RPL
Adaptasyon Katmanı	6LoWPAN Adaptasyon
Ortam Erişim Katmanı	IEEE 802.15.4
Fiziksel Katman	IEEE 802.15.4

6LoWPAN ağlarında her düğüm kendi IPv6 adresine sahiptir. 6LoWPAN düşük güçlü kablosuz ağlarda sınırlı veri iletimini hedef alan ev, ofis veya fabrika uygulamalarında kullanılabilir. Düğümler 6LoWPAN protokol yığını kullanarak dış dünya ile konuşabilirler. Bir İnternet ağında bilgisayarlar, sunucular ve diğer cihazlar modem üzerinden İnternete çıkabilirler. 6LoWPAN ağlarında ise düğümler kenar yönlendirici (edge router) vasıtasıyla İnternete erişebilirler. Kenar yönlendiriciler düğümlerden alınan veriler ile İnternet ortamı arasındaki veri trafiğini sağlar.

Kenar yönlendiriciler ayrıca 6LoWPAN içerisindeki düğümlerin de birbiriyle haberleşmesini sağlayan bir koordinatör görevi görür. Şekil 12’de bir 6LoWPAN ağ şeması gösterilmiştir.



Şekil 12. 6LoWPAN Ağ Şeması

Sınırlı kapasitelere sahip cihazlardan oluşan bir topoloji 6LoWPAN kenar yönlendiricisi aracılığıyla, birçok cihazın da bağlandığı modem üzerinden Internet ağına erişebilmektedir. Buradaki kenar yönlendiricisinin üç ana görevi vardır; İnternet ve 6LoWPAN cihazları arasında veri alışverişini sağlamak, 6LoWPAN ağı içerisindeki cihazların kendi içindeki yerel haberleşmesini sağlamak, 6LoWPAN alt ağını üretip sürdürebilmek [23].

6LoWPAN cihazları kenar yönlendirici aracılığıyla diğer IP ağlarına ethernet, 3G/4G modem veya Wi-Fi ile bağlanabilir. Çünkü bu yönlendiriciler IPv4 ağları için RFC 6146 dağıtımında tanımlanan NAT64 dönüştürme mekanizmasına sahiptir [24]. Bu dönüşüm mekanizmasını bütün 6LoWPAN ağındaki cihazlara uygulamaya gerek yoktur. Kenar yönlendirici bu görevi üstlenir.

6LoWPAN ağlarında iki tip cihaz bulunur, bunlar root (kök) ve host (uç) adı verilen cihazlardır. Kök düğümler 6LoWPAN ağı içerisinde yönlendirici görevi görürler. Yerel ağ

içerisinde paket yönlendirmesini ve uç düğümlerin birbirleriyle haberleşmesini sağlarlar. Uç düğümler ise genelde uyku durumuna girebilen, daha sınırlı kaynaklara sahip, genelde çok düşük güç tüketimi ile çalışan bataryaya sahip cihazlardır. 6LoWPAN ağlarında IPv6 paketlerinin IEEE 802.15.4 protokolü üzerinden iletilmesi için Ip yığını ile ağ katmanı arasına 6LoWPAN Adaptasyon Katmanı (Adaptation Layer) geliştirilmiştir.

3.1. 6LoWPAN Adaptation Layer

Nesnelerin Internet'i ağına katılan cihazların giderek artmasıyla bu cihazlar arasındaki haberleşme için IPv6 bir zorunluluk haline gelmiştir. İzin verilebilir paket boyutu, kısa iletim mesafesi, sınırlı hafıza ve enerji kısıtlaması IPv6 ve LoWPAN (IEEE standard 802.15.4) ağları arasında bir sorun haline gelmiştir [25].IPv6 en küçük veri iletim birimi boyutu 1280 byte olmasına karşın, IEEE 802.15.4 ağlarında en yüksek paket boyutu 127 byte'dır. İnternet mühendisliği çalışma grubu (IETF) IPv6 paketlerinin 6LoWPAN ağları üzerinden taşınabilmesi için 802.15.4 standart protokolü içerisine veri katmanı ve ağ katmanı arasına yeni bir katman olan adaptasyon katmanını geliştirmiştir. Adaptasyon katmanı bu sorunu çözmekle kalmaz ayrıca iletim yükünü de hafifletmiş olur. Tablo 2'de örnek bir protokol yığını için adaptasyon katmanının konumu gösterilmiştir.

Tablo 2. Adaptasyon Katmanı

Uygulama Katmanı
İletim Katmanı
Ağ Katmanı
Adaptasyon Katmanı
Veri Bağlantı Katmanı
Fiziksel Katman

Bu katman üç ana görevi üstlenmiştir;

- Header Compression (Başlık Sıkıştırma)
- Fragmentation and Reassembly (Parçalama ve Toplama)
- Link Layer Forwarding (Yönlendirme)

3.1.1. Header Compression and Decompression (Başlık sıkıştırma ve çözme)

6LoWPAN en yüksek paket iletim boyutu 127 byte'tır. Şekil 13'da IEEE 802.15.4 çerçeve şekli verilmiştir. 127 byte'ın 23 byte'ı bağlantı katmanı başlığı, 21 byte'ı güvenlik başlığı, 5 byte'ı paket başlığı, 2 byte'ı sayfa bilgisidir. 76 byte veri iletim birimine ve üst katman başlıklarına ayrılmıştır.

Header	Security Header	Fragment Header	IPv6 Header	UDP Header	Payload	Footer
23 Bytes	21 Bytes	5 Bytes	40 Bytes	8 Bytes	28 Bytes	2 Bytes
76 Bytes						

Şekil 13. IEEE 802.15.4 çerçevesi

Üst katman başlıkları IPv6 için 40, TCP için 21 ve UDP için 8 byte ayrılmıştır. IPv6 paketlerinin iletimi sırasında TCP yerine UDP kullanılırsa veri iletim boyutu için 28 byte ayrılmış olur. TCP ve UDP sıkıştırma durumunda veri iletim boyutu artmaktadır. Bu başlık sıkıştırma işlemleri 6LoWPAN protokol yığınının adaptasyon katmanında gerçekleştirilmektedir. Veri iletim birimine daha iyi yer açabilmek için çeşitli sıkıştırma teknikleri kullanılmaktadır. HC1, HC1g ve IPHC bazı IPv6 başlık sıkıştırma tekniklerindedir. Sıkıştırma işleminde kısaltılan başlıklar diğer katmanlarda ana başlıktan tekrar türetilir. Sıkıştırılmış bir başlık çerçeve hedefe ulaştığı zaman adaptasyon katmanı tarafından tekrar üretilir.

HC1, 2007 yılında 6LoWPAN için önerilen ilk IPv6 başlık sıkıştırma tekniğidir [26]. 40 Byte IPv6 başlığı yerine 2 byte kullanılır. Bu 2 byte IPv6 başlığının sıkıştırıldığını ifade eder. HC1 yerel bağlantılardaki adres başlıklarını sıkıştırabiliyorken, global bağlantı adreslerini sıkıştırılamaz. HC1 in global adres sıkıştırmayı desteklemediğinden dolayı bir HC1 uzantısı olan HC1g adında global adres sıkıştırma tekniği geliştirilmiştir. HC1g, global adreslerin başlık sıkıştırılması (Header Compression of global address) olarak adlandırılır. Bu teknik, 6LoWPAN ağlarına 64 bitlik genel bir adres öneki atar. Kaynak veya hedef adres bu atanan 64 bitlik değerle eşleştiginde, ön ek sıkıştırılabilir. Genel tek noktaya yayım

(unicast) ve çoklu noktalara yayım (multicast) için daha iyi bir yaklaşım olan IPHC önerilmiştir.

IPCH (İnternet Protokolü Başlık Sıkıştırma-Internet Protocol Header Compression), yerel ve global IPv6 bağlantı adres başlıklarını sıkıştırma tekniğidir. IPCH 6LoWPAN ağlarında birçok varsayım geliştirmiştir. İlk varsayım ise adres sistemindeki ortak kullanılan alanlarla alakalıdır. Bu teknik, IPv6 başlık alanlarından; trafik sınıfının, versiyonun, akış etiketinin sabit olduğunu varsayar ve bunların iletilmesine gerek olmadığı sonucunu çıkarır.

Bu yüzden IPCH versiyon bilgisi, trafik sınıfı ve akış etiketi için 4 bit bilgiyi tamamen yok sayar. Tablo 3’de sıkıştırılmış bir IPv6 başlığı ve Tablo 4’de ilgili alanların açıklaması vardır.

Tablo 3. Sıkıştırılmış IPv6 başlığı

3 Bit	2 Bit	1 Bit	2 Bit	1 Bit	1 Bit	2 Bit	1 Bit	1 Bit	2 Bit
001	TF	N/H	HL	CID	SAC	SAM	M	DAC	DAM

Tablo 4. IPv6 Alanları

Alan	Uzunluk	Açıklama
011	3	IPHC başlığının dispatch değerini temsil eder.
TF	2	Trafik Sınıfı ve Akış Etiketi alanları için sıkıştırma seçeneklerini belirtir.
NH	1	Bir sonraki başlığın NHC kullanılarak kodlanıp kodlanmadığını belirtir.
HLIM	2	Sekme sınırının nasıl sıkıştırıldığı hakkında bilgi veren bit dizisidir.
CID	1	Eğer bu bit 1 ise, DAM (Hedef Adres Modu) alanından sonra 8 bitlik bir CIE (İçerik Tanımlayıcı Uzantısı) alanı izler.
SAC	1	Sıkıştırmayı kontrol eden bit
SAM	2	Kaynak adresi sıkıştırma türünü belirlemek için SAC ile kullanılan bittir.
M	1	Hedefin multicast adres olup olmadığını kontrol eden bit
DAC	1	Hedef sıkıştırmasını kontrol eden bit
DAM	2	Kaynak adresinin sıkıştırma türünün belirlenmesi için M ve DAC ile kullanılan bit dizisidir.

IPv6 yük taşıma kapasitesi uzunluğu parça başlığından veya bağlantı katmanı başlığından çıkarılabilir. Bir önceki kısımda bahsedildiği gibi HC1, sadece UDP, TCP ve

ICMPv6 başlıklarını sıkıştırabilir. IPCH yerel bağlantı, global bağlantı ve çoklu nokta bağlantı başlıklarını sıkıştırabilir.

3.1.2. Fragmentation and Reassembly (Parçalama ve Tekrar Toplama)

IPv6 en küçük veri iletim boyutu 1280 byte'tır fakat IEEE 802.15.4 ağları için en yüksek paket boyutu 127 byte'tır. IPv6 paketlerinin parçalanmadan 802.15.4 ağları üzerinden iletilebilmesi mümkün değildir. IPv6 paketlerinin büyüklüğünden dolayı, parçalamaya, iletmeye ve ardından tekrar geri birleştirmeye ihtiyaç duyulur [27]. IPv6 yük taşıma kapasitesi aşıldığında 6LoWPAN parçalama mekanizması devreye girer. Tekrarlı bir şekilde paketler parçalanır. Parçalanmış paketlerin her birisi için iletilmeden önce başlık bilgisi pakete eklenir.

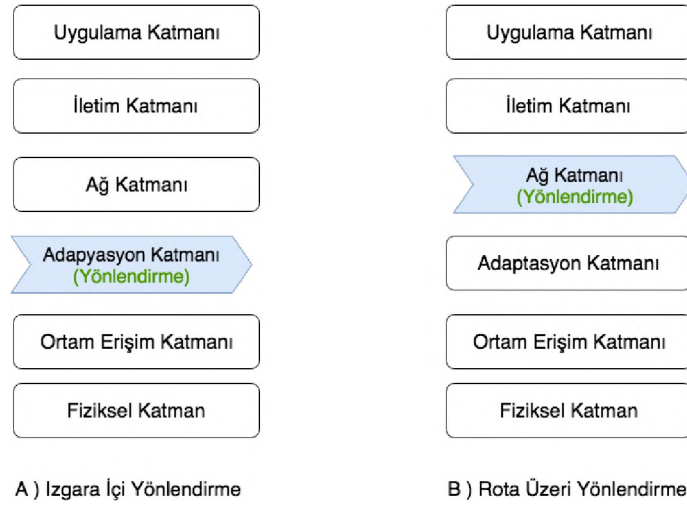
Alıcı tarafta adaptasyon katmanı devreye girerek yeniden birleştirme işlemi yapılır. Her paket, bellek sıkışması olmaması için ne kadar alana ihtiyaç duyulduğu bilgisini alıcıya iletir. Paketlerin yeniden birleştirilme süresi genellikle 60 saniyedir. Paketler hedefe ulaştıktan sonra yeniden gözden geçirilir ve hata varsa reddedilip yeniden transfer edilmesi sağlanır. Hata yoksa paketler bir üst katmana iletilir [28].

3.1.3. Routing

Routing asıl olarak ağ katmanının görevi gibi gözükse de adaptasyon katmanı da bu işle ilgilenir [25]. 6LoWPAN ağlarda hangi katmanda yönlendirme yapılacağına karar verilmesine göre iki çeşit yönlendirme bulunur; Mesh-Under (Izgara içi) ve Route Over (Rota üzeri).

Izgara içi veri iletimi için bağlantı katmanı adreslerini (802.15.4 MAC) kullanırken, rota üzeri yönlendirme ağ katmanı adreslerini (IP adresleri) kullanır. Yönlendirme çok düğümlü ağlarda paketlerin en iyi yoldan gönderilmesini hesaplar. Yönlendirici üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda, yönlendirici, bir sonraki hedef için en iyi yolların tablosunu tutar. Bir paket yönlendiriciye geldiği zaman, bağlantı katmanı sarmalamasından çıkarılır ve tabloya göre bir sonraki düğüm için en iyi yola bakılır. Daha sonra yönlendirici artık kendisini kaynak adres gösterip aynı hedefe paketi iletir. Kaynak ve hedef IP adresleri değişmeden kalmış olur.

Diğer yandan ızgara içi tekniğinde, yönlendirmeye karar vermek için bağlantı katmanı adreslerinden yararlanır. Yönlendirici üzerinden yönlendirme işlemi olduğu gibi yönlendirme için dört adres gereklidir; başlangıç adresi, hedef adres, mevcut yönlendirici adresi ve bir sonraki yönlendirici adresi. Paket çerçevesinin 802.15.4 kaynak ve hedef MAC adresleri sırasıyla geçerli yönlendiriciyi ve bir sonraki yönlendiriciyi gösterir. Şekil 14’de ızgara içi yönlendirme ve rota üzeri yönlendirme protokolleri gösterilmiştir [29].



Şekil 14. Adaptasyon Katmanı Yönlendirme Çeşitleri

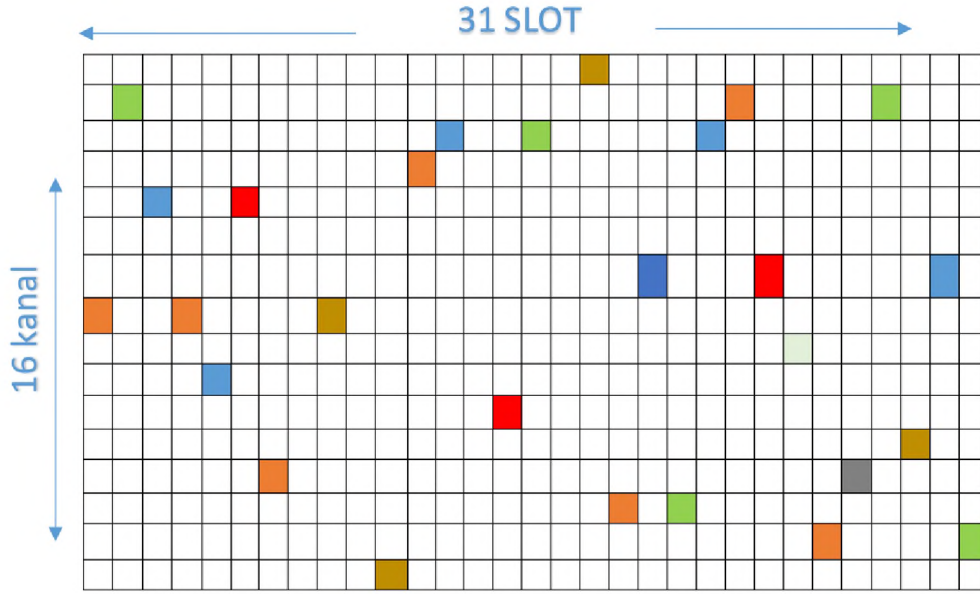
Örneğin IEEE 802.15.4 ağında birbirine uzak A ve B düğümleri olduğunu varsayalım. İlk olarak A düğümü, kendi bağlantı katmanı başlığını kaynak adres ve B düğümünün bağlantı katmanı başlığını hedef adres olacak şekilde bir mesh adres başlığı oluşturur. Yönlendirme tablosu baz alınarak A düğümü bir sonraki düğüm için C düğümünü yönlendirici olarak seçiyor. Daha sonra kendi bağlantı katmanı adresini kaynak adres, C düğümünün bağlantı katmanı adresini de hedef adres olacak şekilde IEEE 802.15.4 MAC başlığında koyar. 6LoWPAN mesh adres başlığının sonuç çerçevesi, başlangıç adresi (A), final hedef adresi (B), ve 802.15.4 Mac başlığındaki, kaynak adres (A) ve hedef adres (C) bilgilerini içerir. Daha sonra yönlendirici, yani C düğümü, çerçeveyi alır ve mesh adres başlığını kontrol eder. B düğümü final hedef olduğunda C düğümü aldığı paketi tekrar iletir.

C düğümü paketi iletmeye karar verdiğinde, kendi bağlantı katmanı adresini; kaynak adres, sonraki düğümün bağlantı katmanı adresini; hedef adres olacak şekilde paketi kapsüller. Bu süreç paket B düğümüne iletilene kadar devam eder.

4. TSCH

IEEE802.15.4e Zaman Paylaşımli Kanal Atlamalı (Time Slotted Channel Hopping, TSCH) protokolü 2012 yılında IEEE 802.15.4 standardı için bir ortam erişim kontrol (MAC) protokolü düzenlemesi olarak yayınlanmıştır [30]. Zaman paylaşımli özelliği düşük güç tüketimini ve kanal atlamalı özelliği iletişim güvenliğini sağlar. TSCH protokolü orta iletim katmanıyla (MAC) ilgilendir. Zaman paylaşımli kanal atlamalı ağlarda bütün düğümler senkronizedirler. Senkronize olmak için düğümler ağ üzerindeki bazı zamansal bilgilere ihtiyaç duymaktadırlar. Bu zamanlama bilgileri ağ koordinatörü tarafından yayınlanan ve gelişmiş işaretçiler (Enhanced Beacons, EB) olarak adlandırılan paketler aracılığıyla ağa yayılır [31]. Ağ periyodik olarak EB paketleri gönderir. EB'ler zaman dilimi boyutu, mevcut mutlak dilim sayısı (Absolute Slot Number, ASN), çerçeve zamanı (slotframe), 1 byte'lık katılım önceliği bilgisi gibi parametreler içerirler. Ağ katılmak isteyen bir düğüm EB'leri dinler. IEEE 802.15.4 EB'nin ne sıklıkla gönderileceğine dair bir tanımlama yapmamıştır. Düğümler her EB periyodunda EB gönderebilirler. EB periyodu kısalsaydı düğümler ağa daha hızlı katılır fakat bu durum güç tüketimini artırır [32].

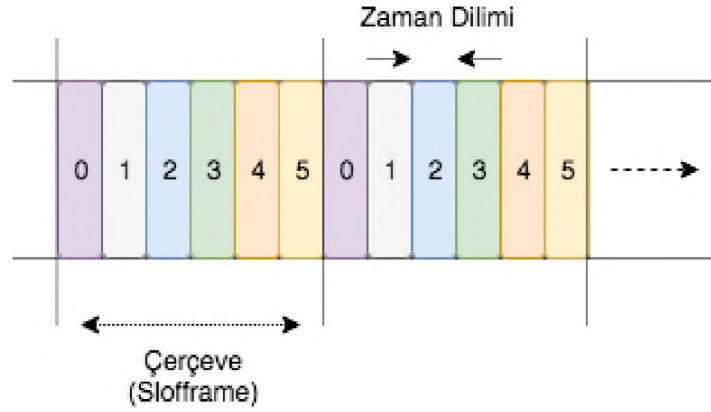
TSCH zaman dilimlerini alt zaman dilimlerine böler. Bu zaman aralıkları için bir standart olmasa da genellikle 10 milisaniye (ms) olarak tercih edilir. En yüksek çerçeve boyutu 127 byte'tır. Veri paketinin iletimi sırasında zaman dilimi alt parçalara bölünür, örneğin veri iletimi için ortalama 4 milisaniye ayrılırken, alındı bilgisine ayrılan zaman 1 milisaniye olarak belirlenmiştir. Geri kalan süre paket işlemleri, güvenlik işlemleri ve uykuda bekleyerek harcanır. Zaman çerçevesi birden fazla zaman diliminin bir araya gelmesiyle oluşur. Zaman dilimleri sürekli tekrar ederler. Zaman çerçevesi boyutu için TSCH 10 ile 100 arasında bir aralık belirlemiştir. Zaman çerçeve aralığı küçük olan ağlardan zaman dilimleri çok sık tekrar gerektireceği için güç tüketimini olumsuz etkileyecektir. Zaman dilimi aralığının çok büyük olması durumunda da düğümlerin ağa katılma sürelerinde gecikmeler olabilir. Bu yüzden uygulamaların ihtiyacına göre en uygun zaman dilimi aralığı seçilmelidir. Şekil 15'de örnek bir zaman dilimi çizelgesi verilmiştir.



Şekil 15. TSCH zaman dilimi çizelgesi

TSCH iletişim için 16 kanal sağlamaktadır. Fakat bu 16 kanalın her zaman kullanılması zorunlu değildir. Bazı durumlarda iletişim kalitesini etkileyen nedenlerden dolayı bu kanalların biri veya birkaçı iletişim için engellenebilir. TSCH'de düğümler, zaman içinde tekrarlanan zaman aralıklarından oluşan periyodik bir hücre çerçevesinde senkronize olur. Her zaman aralığı, bir düğümün bir maksimum büyüklükte veri paketi göndermesine ve ilgili onayı almasına izin verir.

Önceden tanımlanmış bir zaman aşımı içinde onay alınmazsa, veri paketinin yeniden iletimi, aynı (gönderici-hedef) çift düğümlerine atanan bir sonraki zaman dilimine ertelenir. Şekil 16'da bir TSCH hücre çerçevesi örneği verilmiştir.



Şekil 16. TSCH Çerçeve Modeli

TSCH zaman dilimi sayıcı olarak bir Absolute Slot Number-ASN tanımlar. Ağın başlamasından bu yana geçen toplam zaman sayısının toplam sayısı olarak tanımlanan mutlak dilim sayısıdır. ASN, ağ oluşturulduğunda 0 olarak başlatılır ve her zaman diliminde ağda global olarak artmaktadır ve ağdaki bütün düğümler için eşsizdir. Bu nedenle, düğümler tarafından bir zaman aralığı sayacı olarak kullanılmaktadır. Bir düğüm ağa katıldığı herhangi bir anda ASN değerine erişebilir. Ağ senkronize olduğu için bütün düğümler ASN değerini bilirler. ASN 5-byte'lık bir numaradan oluştuğundan dolayı sayacı sıfırlamadan yıllarca yetebilecektir.

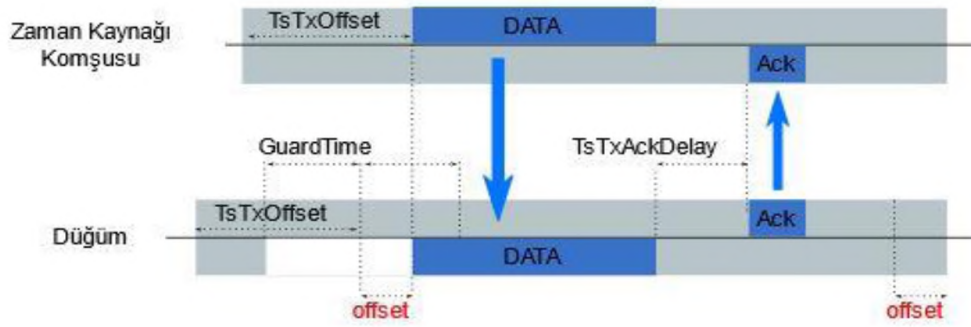
Çok kanallı kabiliyet sayesinde, farklı kanal ofsetlerinin kullanılması şartıyla, aynı zaman diliminde birkaç eşzamanlı iletişim gerçekleştirilebilir. Ayrıca, ardışık zaman dilimlerindeki frekansı değiştirerek, kanal atlatma mekanizması dış müdahalenin olumsuz etkisini azaltmaya izin verir. Bu sayede iletişimin güvenilirliği, kalitesi artar ve gürültüden etkilenme olasılığı oldukça azalır.

TSCH düğümler arasında veri alışverişi sırasında gönderilen paketlere, komşu düğümlerin senkronize olabilmesi için zaman bilgisini de ekler. IEEE 802.15.4e TSCH protokolünde senkronizasyon işaretçi gönderim tabanlı yapılabileceği gibi veri transferi sırasında gönderilen ACK mesajı ile de yapılabilir. Her iki yöntemde de verinin iletim zamanı ile geçen süre arasındaki fark hesaplanarak işlem yapılır.

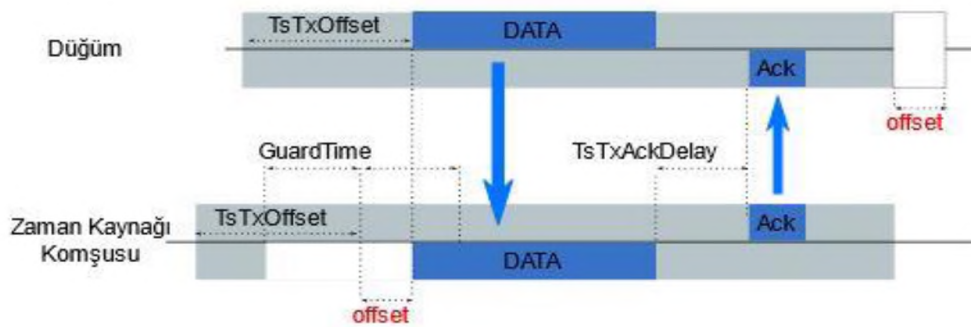
- Düğümler, komşusundan aldığı veri paketini, paketin alınmaya başladığı anı referans olarak işaretlemektedir. Ardından senkronizasyonu sağlamaya yardımcı olan komşu düğümlerle zamansal olarak eşleşmek için zaman aralığının sınırları kaydırılır. Bu adım

ağa dahil olan bir cihazın gelişmiş işaretçiyi (EB) duyduktan sonra başlangıçta komşuya senkron olması için kullandığı prosedür gibidir. Buna "çerçeve tabanlı senkronizasyon" da denmektedir.

- ACK tabanlı senkronizasyonda, onay mesajını (ACK) ileten cihaz kendi zamanlama bilgileriyle onay iletisini alacak cihazın zamanlama bilgisini karşılaştırır. Paketin düğüm tarafından alınma zamanıyla, düğümde alınması gereken zaman arasındaki fark bulunarak karşılaştırma işlemi gerçekleştirilir. Aradaki zamanlama farkı, paketi gönderen düğüme ACK paketine konulacak bir zaman damgası yardımıyla bildirilir. Düğümlerden hangisinin zamanlama için kullanılacağına düğümün ağ şemasındaki pozisyonuna göre karar verilir. Bu karar verme yöntemi sayesinde belirlenen düğüme iletişim daha kolay sağlanabilmektedir ve düğümler daha hızlı senkron olabilmektedir.



(a) Çerçeve Tabanlı Senkronizasyon



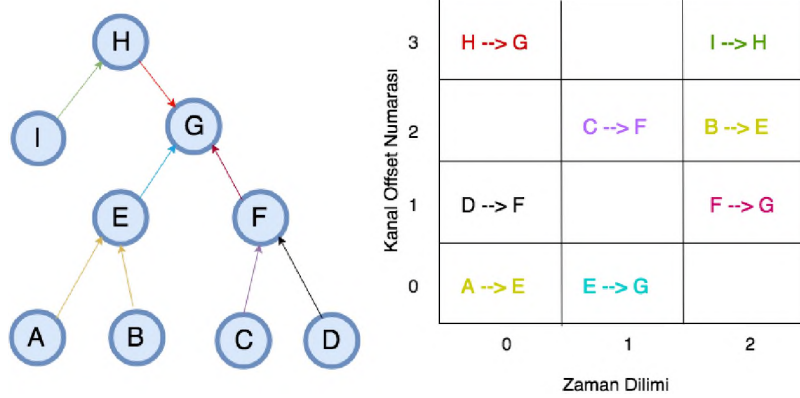
(b) Ack Tabanlı Senkronizasyon

Şekil 17. IEEE802.15.4e TSCH ağlarında ACK ve çerçeve tabanlı senkronizasyon

Şekil 17’de IEEE802.15.4e TSCH protokolünde senkronizasyonu sağlayan iki farklı yöntem gösterilmektedir. Her yeni senkronizasyon (çerçeve tabanlı veya ACK tabanlı) durumunda alıcı, offset olarak adlandırılan göreceli senkronizasyon süresini ölçmektedir. offset değeri gelen verinin başlangıç zamanı ile $TsTxOffset$ arasındaki fark olarak hesaplanmaktadır. Çerçeve tabanlı senkronizasyonda, offset alıcının zaman çizelgesine uygulanırken ACK tabanlı senkronizasyonda gönderenin zaman çizelgesine uygulanır. TSCH ağındaki her bir cihaz, zaman dilimlerinde nasıl davranacağını belirleyen bir süreci izler. Ayrıca, her aktif zaman dilimi (slot) için süreç, iletişim kuran komşu düğümleri ve kanal offset değerini de göstermektedir. Belirlenen zaman aralığı tahsisi, öngörülebilir iletişim modelini sağlayarak düğümler arasında belli sürelerde haberleşmeyi gerçekleştirmektedir. Bu sayede, cihazların birbirlerini gereksiz dinlemesini önleyerek radyosunu kapalı tutar ve pil ömrünü uzatır.

Bir TSCH ağında iki veya daha fazla düğümün iletişim kurması için, bunların bir bağlantı, yani, iletişim için zaman dilimi çerçevesinde bir zaman dilimi ve bir kanal ofseti ayırması gereklidir. Bu nedenle, bir bağlantı, çizelge şemasında zaman dilimini ve bu zaman dilimi içindeki aygıtlar tarafından kullanılan kanal ofsetini belirten bir çift (zaman aralığı, channeloffset) ile temsil edilebilir. Bahsedildiği gibi, kanal atlatma mekanizması, farklı bağlantı çerçevelerinde aynı bağlantı için farklı bir frekans döndürür. Bu nedenle, mümkün olan tüm mevcut frekanslar zamanla kullanılır.

TSCH atanmış (dedicated) veya paylaşımlı (shared) olmak üzere iki bağlantı çeşidi sağlar. Bağlı bağlantılarda TSCH tek bir veri alımı veya iletimine tahsis edilirken, paylaşımlı bağlantılarda aynı anda birden fazla veri alımı veya iletimi gerçekleşebilir. Şekil 18, bir ağaç topolojisine sahip basit bir algılayıcı ağında veri toplama için olası bir bağlantı çizelgesini, hücre çerçevesi için 3 zaman dilimi ve 4 kullanılabilir kanal ofseti ile göstermektedir. TSCH'nin çok kanallı yetenekleri sayesinde, 8 adet iletim sadece 3 zaman diliminde tamamlanabiliyor.



Şekil 18. TSCH Veri İletim

Şekil 18’de sıfırıncı zaman diliminde A, D ve H düğümlerinden veri iletimi gerçekleştirilmiştir. TSCH ağlarında düğümler aynı kanalı farklı zaman dilimlerinde ortak olarak kullanabilir. TSCH’in bu özellikleri sayesinde, veri iletimi oldukça hızlı, verimli ve güvenilir gerçekleşmektedir.

TSCH düğümlerin bir zaman dilimi içerisinde veri göndermesini, almasını ve uyumasını sağlar. Çerçeve zamanı içerisinde ortak tarifelenmiş bir ya da daha fazla hücre bulunabilir. Bu tarifelenen hücreler zaman dilimi içerisinde herhangi bir slotoffset ve channeloffset noktasında bulunabilirler. Tarifelenen hücre(leri)nin yeri EB içerisinde ağa duyurulur. Bütün düğümler bu hücre tipinde ortama erişir ve çakışmalar erteleme (backoff) yöntemiyle çözülür. Bu ortak hücreler dışında gönderim (transmit) ve alım (receive) hücreler de çizelgelenebilir. Her bir iletim (transmit) hücrelerinde öncelikle düğüm giden veri tamponu (outgoing buffer) içerisinde gönderilecek bir veri var mı diye kontrol eder. Eğer yoksa zaman dilimi süresi boyunca radyosunu kapalı tutar. Aynı şekilde bir alım (receive) hücre için, düğüm radyosunu belli bir süre açık tutarak kanalı dinler. Bir süre dinledikten sonra eğer gelen paket yoksa radyosunu kapalı duruma getirir. Eğer bir paket kanaldan alınırsa, düğüm adresini içeren paket ortam erişim katmanına iletilir.

4.1. Gelişmiş İşaretçiler (Enhanced Beacons- EB)

Zaman dilimli erişim, erişilebilen düğümler arasındaki çarpışmayı ortadan kaldırarak elde edilebilecek potansiyel verimi artırır ve uygulamalara daha kabul edilebilir gecikme sağlar. Birden fazla kanalın kullanılması, ağ kapasitelerinin artırılmasına izin verir, çünkü daha fazla düğüm, farklı kanal ofsetleri kullanarak paketlerini aynı zamanda (yani aynı zaman diliminde) değiştirebilir [33]. Ayrıca, kanal atlama özelliği, kanalın sinyal üzerindeki yıkıcı etkilerini azaltır [34], böylece iletişim güvenilirliğini ve kalitesini artırır.

Koordinatör, Geliştirilmiş İşaretler (EB'ler) ileterek ağ varlığını duyurduğu zaman, TSCH'deki ağ oluşturma süreci başlamış olur. EB'ler, bir düğümün ağa katılması ve diğer düğümlerle iletişim kurmaya başlaması için gerekli tüm bilgileri içeren özel TSCH paketleridir.

Gelişmiş işaretçilerin TSCH ağlarında birçok görevi vardır. Bunlar;

- Senkronizasyon Bilgisi. Ağa katılan yeni düğümlerin ağ ile eş zamanlı çalışabilmesini sağlar.
- Kanal Atlama Bilgisi. Ağa katılan düğümlerin kanal atlama bilgisi (Channel Hopping Sequence)
- Zaman Dilimi Bilgisi. Düğümlerin hangi zaman dilimlerinde işlem yapacağı bilgisi

Bunlara ek olarak bağlantı bilgileri ve çerçeve zamanı bilgisi içerir.

Bu gelişmiş işaretçiler ağ içerisinde bir düğüm tarafından varlığını sürdürdüğünü duyurabilmesi için kullanılır. Gelişmiş işaretçi alan bir düğüm, ağa katılmak için birçok bilgiyi elde eder. Sadece ağa katılan yeni düğümler değil, ağın parçası olan düğümler de gelişmiş işaretçileri kullanır [35].

Her yönlendirici için sınırlı sayıda yayım hücreleri vardır. Bu hücreler 10 ile 100 arasında değişebilir ve her bir işaretçi için sadece 1 hücre tahsis edilir.

Ağa katılan bir düğüm belirli frekansla ağdaki işaretçileri (EB's) dinler. Bir işaretçi alındığında;

-Ortam erişim katmanı (MAC) bir üst katmana (6TiSCH protokolü için bu katman 6top'dur.) bildirim gönderir.

-Üst katman alınan işaretçiye göre çerçeve dilimini ve bağlantıyı oluşturur.

-Düğüm TSCH operasyonuna hazır hale gelir.

-Daha sonra cihaz iletişim kaynaklarını tahsis eder.

-Duyuruya başlar ve çalışır.

TSCH gelişmiş işaretçilerin ne sıklıkla gönderileceğini ve hangi düğümün gelişmiş işaretçi göndereceğini uygulama geliştiricilere bırakır. En genel yaklaşım olarak, ağa katılan bütün cihazların ağ hakkında bilgileri toplayabilmesi için bütün düğümlerin gelişmiş işaretçiler yayması düşünülebilir. Ağa katılım süresini kısaltmak için düğüm radyosunu ağa katılım süresi boyunca açık tutmalıdır ve işaretçilerin gönderim sıklığı fazla olmalıdır. Bu şekilde düzenlenen bir işaretçi yayım algoritması ağ oluşumunu hızlandırabilir. Fakat sık frekansta işaretçi gönderimi iletişim kaynaklarını harcayacağı gibi güç tüketimini de artırmaktadır. Bu nedenle, düğümlerin ağa katılma süresini en aza indiren uygun bir EB iletim sıklığı gerekli olacaktır.

4.1.1. Uygun İşaretçi Gönderimi

Uygulama gereksinimlerine ve düğümlerin enerji kısıtlamalarına göre zaman dilimi başına EB'lerin sayısı (BS [36]) sabitlenebilir ve PAN (Personel Area Network- Kişisel Alan Ağı) yöneticisi tarafından ayarlanabilir. BS sabitlendiğinde, hangi zaman aralıklarında EB'lerin iletilmesi gerektiği belirtilmelidir.

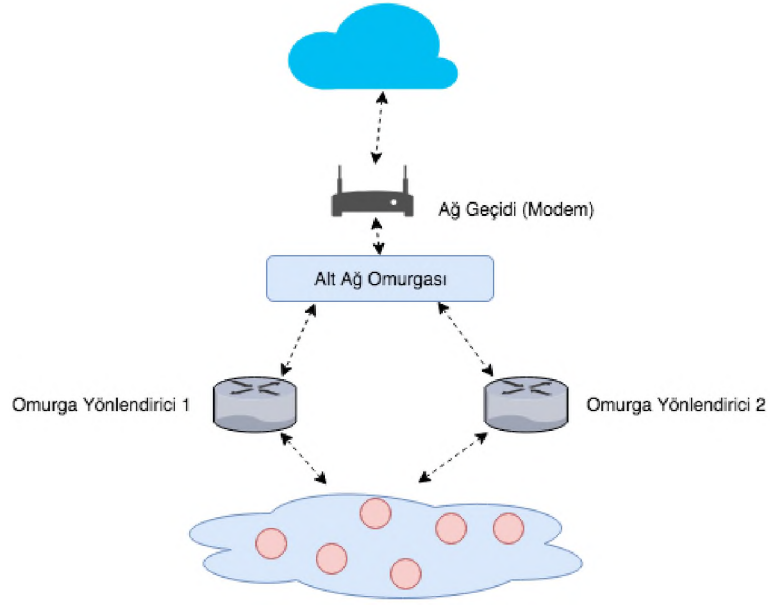
Başka bir senaryo için ise gerçek bir ağda, EB'lerin iletilmesinden hangi düğümlerin sorumlu olacağı belirlenir. Bütün düğümlerin gelişmiş işaretçileri yayması gereksiz bir kaynak kullanımı ve sıkışıklığa neden olabilir. Bunun için ağdaki düğümlerin konumları baz alınarak bazı düğümlere işaretçi gönderim görevi atanabilir. Ağ büyüklüğüne göre bir veya daha fazla işaretçi gönderme görevi tahsis edilen düğümler ağdaki bütün düğümlere ağ hakkında bilgi yayabilir. Ayrıca hareketli ağlarda, işaretçi gönderim görevi atanmış düğümler dinamik olarak da değiştirilebilirler

5. 6TiSCH

Kısıtlı kaynaklara sahip algılayıcılardan oluşan ağlardaki güvenlik, enerji verimliliği ve kapasite problemlerine IEEE 802.15.4 protokolü yeterli gelmediğinden dolayı Internet mühendisliği çalışma grubu (IETF) yeni bir düzenleme ile 802.15.4e protokolünü geliştirmiştir [37]. Bu protokol sayesinde endüstriyel uygulamalara daha geniş yetenekler kazandırılmıştır. Fakat enerji verimliliği ve güvenliği artırmak amacıyla, 802.15.4e protokolüne zaman paylaşım kanalı (TSCH) özelliği eklenmiştir. TSCH ağlarının da endüstriyel alanlardaki eksikliklerini gidermek için IETF çalışma grubu 6TiSCH geliştirmesini yapmıştır [37]. 6TiSCH (IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e) IPv6 paketlerinin IEEE 802.15.4e TSCH ağları üzerinden taşınmasını amaçlar. İnternet mühendisliği çalışma grubu olan IETF, 6LoWPAN ve 802.15.4e yeteneklerini birleştiren bir bu yapıyı geliştirmiştir. 6TiSCH düşük güçlü, yüksek iletim kapasiteli ve düşük gecikmeli endüstriyel kablosuz algılayıcı ağlar için (WirelessHART, ISA100.11a gibi) ve endüstriyel gözlem uygulamaları için bir standart haline gelmektedir.

TSCH ağlarda komşu düğümlere birden çok zaman aralığı atar ve düğümlerin birbirleriyle değiştireceği paket sayısını yani iletişim çıktısını (throughput) artırır ve ağdaki gecikmeyi azaltır. İletişim yoğunluğunun artması düğümlerin radyolarını daha sık kullanmasını, dolayısıyla enerjiyi daha çok harcamasını ve pilin daha hızlı tükenmesini beraberinde getirir [37]. Bunun yerine düğümlerin birbirleriyle haberleşmesini tarifeleyen bir çizelge çerçevesi (slotframe) oluşturulur. Çizelgede düğümler birbirleriyle farklı zaman dilimlerinde farklı kanallardan haberleştiği için yüksek güvenlik sağlar ve çakışmayı önler.

6TiSCH IETF katmanlarından 6LoWPAN, RPL ve CoAP'ı kullanır. CoAP düğümlerin Internet ortamına ulaşmasını sağlar. RPL iletişim yönlendirmesiyle ilgilenir. 6LoWPAN ise ağ üzerinden iletilecek paket boyutunu azaltma görevini üstlenir. Şekil 19 Şekil 19'da 6TiSCH mimarisi verilmiştir.



Şekil 19. 6TiSCH Mimarisi

5.1. 6Top

Önceki bölümde anlatılan protokollerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için 6TiSCH, 6Top ara katmanını tanımlamıştır. Tablo 5’de 6TiSCH protokol yığını verilmiştir. 6Top IP katmanı ve TSCH ortam erişim katmanı arasında bulunan mantıksal bir katmandır [38].

6TiSCH ağlarında 6Top zamanlamayı sağlarken, düğüm bağlantılarının ağa eklenip çıkarılmasıyla ilgilenir. 6Top ağdaki bağlantı bilgilerini toplayarak bu bağlantı bilgilerini alt ve üst katmanlar ile paylaşır. Ağdaki hücrelerin davranışlarını ve işlevlerini izleyerek bunları yumuşak (soft) ve sabit (hard) hücre olarak adlandırır [39].

Tablo 5 : 6TiSCH Protokol Yığını

IETF CoAP
UDP
IPv6 / IETF RPL
IETF 6LoWPAN
IETF 6Top
IEEE 802.15.4e Ortam Erişim Katmanı
IEEE 802.15.4e Fiziksel Katmanı

Yumuşak (soft) hücreler 6Top üzerinde koşan algoritmalar tarafından belirlenir. Verimsiz ve kötü performansa sahip yumuşak (soft) hücreler 6Top tarafından yeniden düzenlenirken sabit (hard) hücreler yeniden tahsis edilemez. Bu sabit hücreler merkezi çizelge ögesi tarafından ağ oluşumunda yüklenir ve daha sonra kaldırılır. Merkezi çizelge ögesi bir komşuya kaç adet yumuşak hücrenin tahsis edilmesi gerektiğini de belirtir.

TSCH hücre tarifeleme çizelgesinde her bir hücrenin belirli bir noktaya atanması da 6Top tarafından yönetilir. Her bir hücre belirli bir slot ofset ve kanal ofset noktasına tarifelenir. 6TiSCH ağları farklı trafik akışlarını destekleyebildiğinden 6Top farklı trafik akışları tanımlayabilir. Farklı etiketler içeren hücreler belirleyerek trafiği izole bir hale getirir.

6Top zamanlama çizelgesinde hangi hücrenin hangi slot ve kanal offset noktasına çizelgeleneceğine karar verme görevi de üstlenir. 6Top ayrıca düğümler arasındaki tutarlılığı da sağlamakla sorumludur. Yani bir düğüm başka bir düğümden iletim için talepte bulunduğu slot ve kanal offset noktasının, ilgili düğümden de alım için tarifelenebilir olması gerekir. Aksi durumda tutarsızlık olur ve iletim başarısızlıkla sonuçlanır. Bu tutarlılığı sağlamak için 6Top farklı senaryolar gerçekleştirir. İlk olarak A ve B düğümlerinin 6TiSCH ağındaki iki düğüm olduğunu düşünülürse transfer isteğinde bulunan A düğümü öncelikle B düğüme istediği hücre sayısını ve aday hücreleri slot offset numarasıyla beraber gönderir. Hemen ardından cevap için bir sayaç başlatır. A düğümünün isteğini alan B düğümü kendi hücrelerinin durumuna göre uygun olan hücreleri A düğüme bildirir.

Bir başka senaryoda ise A düğümü B düğüme sadece ihtiyaç duyduğu hücre sayısını söyler. B düğümü A'nın aday hücre isteği olmadığı için ona aday hücreler önerir. A düğümü bu aday hücrelerden seçim yaparak transferi gerçekleştirir.

Bazı durumlarda ise A düğümünün B'den istediği aday hücreler B düğümü için uygun olmayabilir. Bu durumda B düğümü uygun olan diğer hücreleri A'ya bildirir ve bir seçim yapmasını bekler. İletişimdeki tutarlılık bu şekilde sağlanmış olur.

6. IPv6

Nesnelerin Internet'i ağındaki cihazların hızlı bir şekilde artması adresleme sisteminin yetersizliğini ortaya çıkarmıştır ve yeni adreslere ihtiyaç duyulmuştur. Mevcut IPv4 mekanizması bu ihtiyaca karşılık veremeyeceğinden dolayı IPv6 adresleme mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu adresleme mekanizmasında bütün IPv6 adresleri bir düğüme değil bir arabirim bağdaştırıcısına atanır. Her bir tek noktaya yayım (unicast) adresi karşılığında tek bir arabirim bağdaştırıcısını temsil eder [40]. Bu düğümün arabirimlerinin tek noktaya yayım adreslerinden herhangi biri düğümü temsil eder.

Bütün arabirimler en azından bir adet tek noktaya yayım adresine sahip olmalıdırlar. Bir arabirim birden fazla IPv6 adresleme mekanizmasına sahip olabilir; tek noktaya yayım (unicast), çoklu noktaya yayım (multicast), ve herhangi bir noktaya yayım (anycast).

6.1. Unicast

Tek bir arabirimi tanımlar. Tek noktaya yayım adresine gönderilen bir paket, bu adres tarafından tanımlanan bir arabirime teslim edilir.

6.2. Multicast

Ağ üzerinde birçok hedefe bir veriyi aynı anda iletim işlemine denir. Veri paketleri tek bir gönderme işlemiyle iletilir. Çoklu noktaya yayım adresine gönderilen bir paket, bu adres kümesinde tanımlanan bütün arabirimlere teslim edilir [41].

6.3. Anycast

Arabirimler kümesini ifade eder. Bu adrese gönderilen bir paket, adres kümesi içerisindeki bir düğüme gönderilir. Bu düğüm genelde yönlendirme protokolüne göre uzaklığı en az olan, en yakın düğüme gönderilebilir.

6.4. Otomatik Adres Yapılandırması

IPv4 ile 4,3 milyar benzersiz adres üretilebiliyorken IPv6 adresleme mekanizması sayesinde sınırsız sayıda benzersiz adres üretilebilir. IPv6'nın en belirgin özelliklerinden birisi de otomatik adres üretme özelliğidir. IPv6 adresi bir ön ek (Prefix) ve cihaza ait benzersiz fiziksel adresten otomatik şekilde üretilebildiğinden her cihaz için benzersiz bir adres üretilmiş olur. IPv6 adresine sahip cihazlar birbirleriyle aralarında herhangi bir çeviriciye ihtiyaç duymadan haberleşebilirler.

IPv6 sisteminde broadcast adresleri yoktur. Onun görevini multicast üstlenmiştir. IPv6 adresleri üç şekilde yazılabilir,

İlk tercih edilen şekil x:x:x:x:x:x:x, şeklinde olup 'x' 16 tabanındaki sayıları (hexadecimal) ifade eder. Örnek olarak şu iki adres verilebilir;

FEBC:BA88:7364:3440:FEAC:BA76:7653:3520

1070:0:0:0:6:400:200A:317C

Burada sıfır değerlerinin tamamını yazmaya gerek yoktur (:000: gibi). Fakat en azından tek bir sayı bulunmak zorundadır.

İkinci tercih edilen şekil ise adres içerisindeki sıfırların tekrarını engelleyip adresi daha kısa göstermek için tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemde bir veya daha fazla grubun sıfır olduğunu gösteren ': :' ifadesi kullanılır. Örnek olarak şu adresler incelenebilir;

1070:0:0:0:6:400:200A:317C 1070::6:400:200A:317C

F001:0:0:0:0:0:0:102 F001::102

0:0:0:0:0:0:0:1 ::1

Üçüncü alternatif şekil ise kompleks adresleme sisteminin kullanıldığı tekniklerdir. Bu adresleme sisteminde IPv6 adresleri ve IPv4 adresleri iç içe gösterilir. x:x:x:x:x:d.d.d.d şeklinde gösterilir. 'x' 16 tabanındaki sayıları, d ise 10 tabanındaki sayıları temsil eder. Örnek olarak şu adres verilebilir ;

0:0:0:0:0:FFFF:149.134.51.28

Adresin sıkıştırılmış hali ise ; ::FFFF:149.134.51.28

6.4.1. IPv6 Komşu Keşfi (Neighbor Discovery- ND)

Komşu Keşfi (Neighbor Discovery) IPv6 ile kullanılan Internet iletişim kuralları içerisinde bir protokoldür [42]. Bağlantı katmanında (Link Layer) çalışır ve bağlantıdaki

diğer düğümleri bulmak, diğer düğümlerin ağ katmanı adreslerine karar vermek, uygun yönlendiriciler bulmak ve diğer aktif komşu düğümlere yollar hakkında erişilebilirlik bilgisi sağlamakla ilgilendir.

Komşu Keşfi şu işlevsellikleri sağlamak için gerekli olan mekanizmayı tanımlar:

Yönlendirici Keşfi. Düğümler bitişik bağlantılardaki yönlendiricilerin yerini belirleyebilir.

Önek Keşfi. Düğümler bitişik bağlantılar için bağlı olan adres örneklerini bulabilir.

Parametre Keşfi. Düğümler Internet parametrelerini bulabilir (MTU gibi).

Otomatik Adres Yapılandırması. Bir arayüz için adreslerin durumsuz (stateless) yapılandırması.

Adres Çözümlemesi. IP adreslerinin bağlantı-katmanı (link-layer) adresine eşlenmesi.

Sonraki-Durak (next-hop) Kararı. Düğümler bir hedef için sonraki-durak yönlendiricileri bulabilirler.

Komşu Erişilemezlik Tespiti (Neighbor Unreachability Detection (NUD)). Bağlantıdaki bir komşunun artık erişilemez olduğuna karar verir.

Çoklu Adres Tespiti (Duplicate Address Detection (DAD)). Düğümler bir adresin kullanımda olup olmadığını kontrol edebilir.

Yeniden Yönlendirme. Yönlendirici düğümü daha iyi ilk-durak (first-hop) hakkında bilgilendirebilir

Bütün ND mesajları ICMPv6 (Internet Control Message Protocol) mesajlarını içerir. Bu mesajlar IPv6, TCP/UDP başlıklarını ve genel bir formatı kapsar ve ICMPv6 mesajları ağdaki iletişimde meydana gelen sorunları ağ içerisindeki diğer elemanlara iletmek amacıyla kullanılır. Paket iletimi esnasında hata oluşması durumunda, yönlendiriciye gelen bir isteği yönlendiricinin yönetebilecek kapasitesinin kalmamasında veya bir paket için daha iyi bir rota tespit edilmesi durumunda ICMP mesajları bu sorunları ağ elemanlarıyla paylaşır. [43]. Bu yapı Tablo 6'de gösterilmiştir.

Tablo 6. ICMP Mesaj Yapısı

Tip (type) : 8 Bit	Kod (Code): 8 Bit	Toplamsal Hata (Checksum): 16 Bit
Mesaj Gövdesi		

Tip (type). Mesaj tipini ifade eder. Yüksek sıralı bit 0 ise (0-127 bitler arası) bu bir hata mesajıdır. Eğer 1 ise (128-255 arası bitler arası) bu bir bilgi mesajıdır.

Kod (Code). Bu alan içeriği mesaj tipine bağlıdır ve ortalama mesaj boyu ekleme seviyesinin oluşturulmasını sağlar.

Toplamsal Hata (Checksum). IPv6 mesaj kısmında ve ICMP'de hata mesajlarını bulmada kullanılır. Karar düğümü IPv6 başlığında kaynak ve hedef adreslerinin checksum (toplamsal hata)'ı hesaplanmadan önce belirlenmesi için mesaj yollar. Eğer karar düğümü birden fazla unicast (Bir istasyondan belirli bir istasyona gönderilen çerçeve. Bir unicast çerçevesi belirli kaynak ve hedef cihazların MAC adreslerini içerir.) adresi içeriyorsa mesajın kaynak adresini aşağıdakiler gibi seçmelidir:

Eğer mesaj, gönderilen bir unicast adresinin mesajına cevap ise cevabın kaynak adresi aynı olmalıdır.

Eğer mesaj, gönderilen bir adresin mesajıysa (multicast grup adres, karar düğümü ile gerçekleştirilen herhangi bir cast adresi veya karar düğümüne ait olmayan bir unicast adres gibi.) ICMPv6 paketinin kaynak adresi karar düğümüne ait olan bir unicast adres olmalıdır.

Haberleşme için IEEE 802.15.4 fiziksel katmanını kullanan kablosuz duyarga ağları için bazı protokol düzenlemeleri gerekmektedir. IEEE 802.15.4 fiziksel katmanında taşınabilecek en büyük paket boyutu 127 bayttır. IPv6 en küçük veri taşıma ünitesi olarak 1280 byte paket büyüklüğü tanımlar. IPv6 paketlerinin 802.15.4 protokolü üzerinden taşınabilmesi için 6LoWPAN adında bir düzenleme protokolü geliştirilmiştir [44].

7. DÜŞÜK GÜÇLÜ VE KAYIPLI AĞLAR İÇİN YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ (RPL)

Düşük güçlü ve kayıplı ağlar, yönlendiriciler ve bu yönlendiricilerle ilişkili olan kısıtlı kaynaklara sahip cihazlardan oluşan ağlardır [45]. Bu ağlardaki trafik genellikle noktadan noktaya şeklinde değil, bir noktadan çok noktaya veya çok noktadan bir noktaya olacak şekildedir. Bu tarz ağlar içerisinde binlerce düğüm bulunabilir. Binlerce düğüm arasındaki yönlendirme işlemlerini gerçekleştirmek amacıyla, IETF, ROLL (Routing over Low Power and Lossy Links / Düşük Güç ve Kayıplı Ağlar Üzerinde Yönlendirme) adını verdiği çalışma grubu nesnelerin Internet'i için bir yönlendirme protokolü olan RPL'i geliştirmiştir. Düşük güçlü ve kayıplı ağlar (Lossy Networks) için tasarlanmıştır. Bu ağlardaki düğümler genellikle pille çalıştığı için veya enerji verimli olduğu ağda düşük bant genişliği ve düşük veri aktarımı yapılıdır. RPL kablosuz sensörlerin bulut ağıyla iletişimini sağlar.

Yönlendirme katmanı birbiri ile direk haberleşecek mesafede olmayan düğümlerin haberleşmesi, aradaki diğer düğümlerin paketleri tekrar etmesiyle sağlanır. RPL ağları DIO (Destination oriented directed acyclic graph information object) ve DAO (Destination advertisement object) mesajları kullanılarak oluşturulurlar. 6LoWPAN ağ oluşumu kök düğümün DIO mesajı yayınlamasıyla başlar. Kök düğüm DIO mesajı yayınlayarak kendisinin kök düğüm olduğunu söyler. Bu şekilde bu mesaj bütün ağa yayılır. DIO mesajları ızgara (mesh) ağ yapısı hakkında önemli bilgiler içerir (yönlendiricinin kimliği, ağ versiyon numarası, ağ metrik bilgisi vs.).

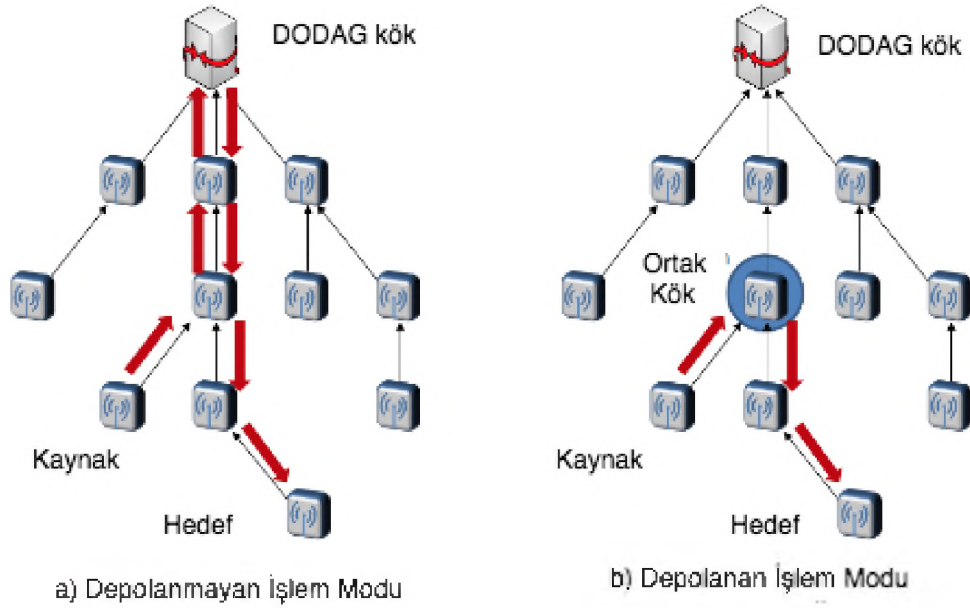
Bir düğüm RPL ağına katıldığı zaman ilk olarak DODAG bilgi mesajlarını (DIO) dinlemeye başlar. Komşu düğümler aldığı bu bilgi mesajlarını diğer komşularıyla paylaşırlar. DIO mesajını aldığı düğüme göre onu üst düğüm olarak belirler.

Bir düğüm üst düğümünü seçtiği zaman seçtiği bu düğüme DAO mesajını gönderir. Bu üst düğüm aldığı mesajı kök düğüme kendi üst düğümleri aracılığıyla iletir.

İki çeşit işlem türü vardır, depolanan ve depolananmayan. Storing mode (Depolanan Durum) ara düğümlerin yönlendirme tablolarını tuttuğu duruma karşılık gelirken non-storing mode (Depolananmayan durum) sadece kök düğümün yönlendirici tablolarını tuttuğu duruma karşılık gelir. Storing modda ağaç üzerinde geçen mesaj kaynak ve hedef düğümün ortak atasına geldiğinde yönlendirme tablosu yardımıyla hedefe gönderilir.

Non-storing modda ise hiçbir ara düğüm yönlendirme tablosu tutmadığı için mesaj kök düğümüne gönderilir.

Her iki durumun da kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Her düğüm kök düğümünü seçtiğinde ağ kurulum işlemi tamamlanır. Oluşan bu ağ haritasına Destination Oriented Directed Acyclic Graph, DODAG denir [46]. Şekil 20'da her iki işlem durumundaki veri iletimi verilmiştir.



Şekil 20. RPL ağlarında iki düğüm arasında uçtan uca veri iletim akışı [46]

RPL ağları her bir ağ topolojisi için dört değer tanımlar [47];

RPLInstanceID. Bir RPLInstanceID bir veya daha fazla DODAG kümesini tanımlar. Bir ağda birden fazla RPLInstanceID bulunabilir ve her birisi birbirinden farklı, bağımsız DODAG ağlarını tanımlar.

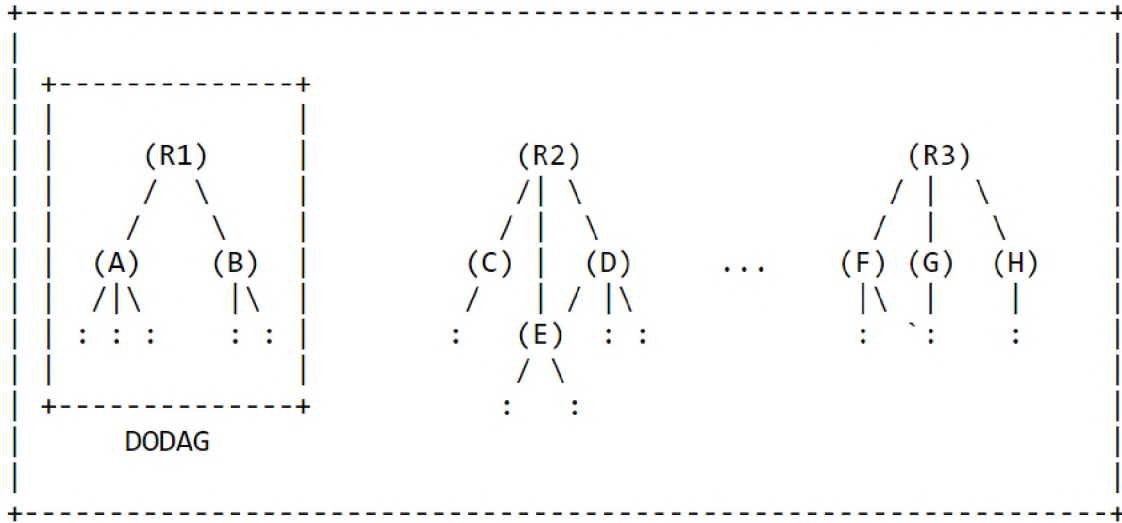
DODAGID. RPL ağlarındaki bir DODAG ağını benzersiz şekilde ifade etmek için kullanılır. Bir RPL ağında birden fazla DODAG bulunabilir ve her bir DODAG için benzersiz bir DODAGID tanımlanır.

DODAGVersionNumber. DODAG ağlarının versiyon numarasını belirtir. Bu ağların bağlantı sorunlarından veya başka nedenlerden dolayı yeniden oluşturulması gerekebilir. Bu durumda yeni oluşan ağı belirten ve otomatik artan bir numarayla ağ durumu

numaralandırılır. Bu numara RPLInstanceID, DODAGID ve DODAGVersionNumber üçlü kombinasyonundan oluşur.

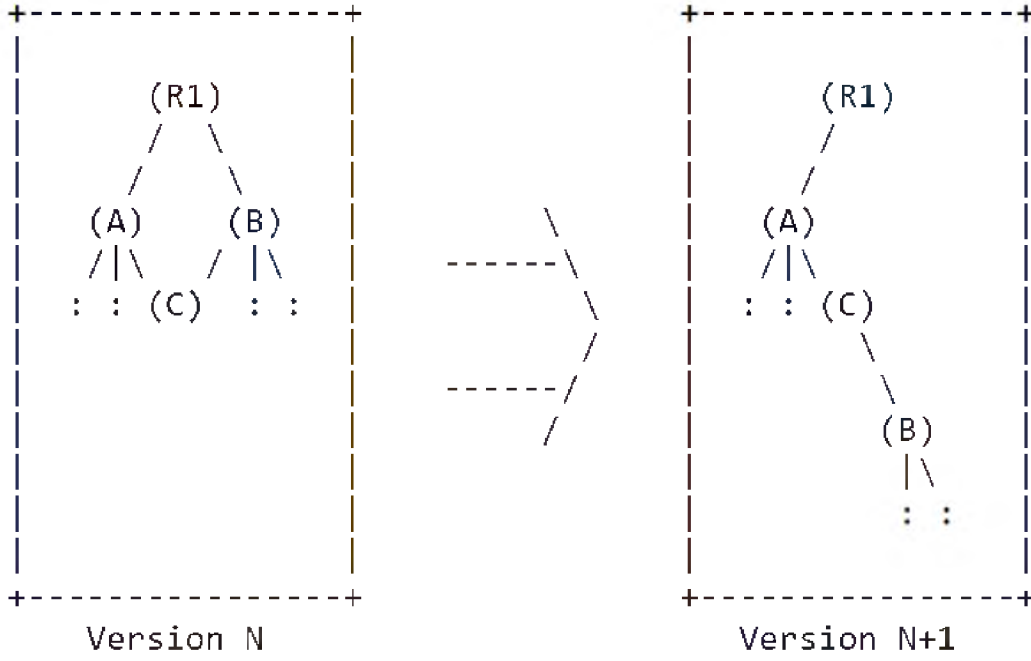
Rank. Bir düğümün kök düğüm ile olan pozisyonunu tanımlamak için kullanılır. Kök düğüme yaklaştıkça Rank azalırken, uzaklaştıkça artar.

Şekil 21’de üç farklı DODAG içeren bir RPL örneğini gösterilmiştir. Her bir DODAG için kökler, R1, R2 ve R3’tür.



Şekil 21. Dodag Ağı

Şekil 21’de gösterilen DODAG ağlarındaki kök düğümler (R1, R2, R3)’in her birisi aynı RPLInstanceId’yi ifade eder. Çizgiler kök düğüm ile çocuk düğüm arasındaki ifadeyi gösterir. Ağ yeni DODAG ağları veya çocuk düğümler eklenerek büyütülebilir. Şekil 22’de ise DODAG versiyon numarasının nasıl arttığı verilmiştir.



Şekil 22. Dodag versiyon numarası

Burada ağda meydana gelen bazı olaylardan dolayı ağ topolojisi değişmiştir. B düğümü kök düğüm ile doğrudan ilişkisini kaybedip C düğümünün çocuk düğümü olarak ağa katılmıştır. Ağdaki bu tarz değişimlerle beraber versiyon numarası artmaktadır. Fakat versiyon numarasının artması için her zaman bağlantı şeklini etkileyen bir olay olması gerekmez. Bazen aynı ağ topolojisi içerisindeki bir kopma ya da işleyiş hatası da ağın yeniden oluşmasını gerektirir. Bu durumda da versiyon numarası artacaktır.

8. CoAP

CoAP (Constrained Application Protocol) genellikle 8-bit mikro denetleyici ve küçük boyutlu ROM (Salt Okunabilir Bellek) ile RAM (Rastgele Erişimli Bellek)'dan oluşan kısıtlı kapasiteye sahip cihazların kısıtlı ağlar (6LoWPAN vb.) üzerinden iletişimde kullanılan özelleştirilmiş bir web iletim protokolüdür. Genellikle otomasyonlar, enerji verimli sistemler ve makine–makine iletişimi için geliştirilen bir web protokolüdür [48].

Günümüzde web uygulama program ara yüzleri (Web Application Program Interface) temsili durum transferi servislerine (REST) bağlı kalarak hemen hemen bütün uygulamalar içerisinde yer almaktadır. CoAP kısıtlı imkanlara sahip bu cihazların da REST servisleriyle veri alıp göndermesini amaçlamıştır.

CoAP etkileşim modeli HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) istemci/sunucu modeliyle benzerdir. Fakat CoAP makine–makine iletişimi sağladığı için istemci ve sunucu modelinin her iki tarafını da kendisi üstlenir. HTTP den farklı olarak UDP (User Datagram Protocol-Kullanıcı Veri Bloğu İletişim Kuralları) üzerinden iletişim gerçekleştirilir. Veri iletiminde HTTP ile karşılaştırıldığında enerji tüketimi bakımından dört kat daha az enerji tüketmektedir [28]. CoAP, kısıtlı kapasiteli cihazlardan elde ettiği UDP mesajları HTTP ye dönüştürerek cihazların Internet ortamına erişimine katkıda bulunur. CoAP dört temel mesaj tipini içerir: Confirmable, Non-Confirmable, Acknowledgment ve Reset.

- Confirmable. Bir doğrulama mesajıdır. Karşılığında “Acknowledgment” (Başarılı) mesajı beklenir.
- Non-Confirmable. Herhangi bir doğrulamaya ihtiyaç duyulmayan mesaj tipidir.
- Acknowledgment. Doğrulama mesajlarına gönderilecek onay mesajıdır.
- Reset. Bir isteğin başarısızlığa uğraması durumunda gönderilen mesajdır. Bir cihaz kendisinden istenilen isteği yerine getiremeyeceği durumda Acknowledgment mesajı yerine reset mesajını gönderebilir. Ayrıca boş bir reset mesajı ile cihazın kullanılabilirlik durumu test edilebilir.

CoAP mesajları iletilirken HTTP temel komutlarına benzer olan GET, POST, PUT, DELETE komutlarını kullanır.

GET. Daha çok veri okumak için kullanılan komuttur.

POST. Yeni bir veri oluşturmak için kullanılır.

PUT. Var olan bir veriyi güncellemek için kullanılacağı gibi post metodu gibi de kullanılabilir.

DELETE. Veri silme işlemi için kullanılır.

CoAP istemciler iletişim için UDP'yi kullanır. UDP iletişimi paket iletimini garanti etmekle ilgilenmediği için veri gönderimi oldukça hızlıdır. Ayrıca TCP'nin aksine bağlantısız iletişim gerçekleştirmesi de hıza etki eden önemli faktördür. UDP başlık bilgisi sadece 4 alan içerir [49]. Bunların 2 tanesinin kullanımı zorunlu değildir. Bunlar:

- Kaynak Portu. Başlığın kaynak portunu ifade eder ve sadece hedef tarafından bir geri dönüş bekleniyorsa eklenmelidir. Yoksa değeri sıfır olmalıdır.
- Hedef Portu. Hedef uygulamanın kullandığı portu eklenir. Gerekli bir alandır.
- Uzunluk. Bütün veri bloğunun uzunluk bilgisi yazılır. Minimum uzunluğu başlık uzunluğu olan 8 byte'tır. Maksimum teorik limiti 65527 byte olmakla beraber IPv4 protokolü tarafından sağlanan pratik limit 65507 byte'tır.
- Checksum. Başlık ve verinin hata kontrolünü yapmak amacıyla kullanılır.

CoAP istemciler UDP iletişim gerçekleştirdiği için HTTP istemcileriyle ya da sunucularıyla direkt olarak iletişim kuramazlar. Bu yüzden bir vekil sunucu (Proxy) ihtiyacı doğar. Vekil sunucular bu dönüşümü iki yönlü yapabilirler;

CoAP HTTP Vekil Sunucu. CoAP istemcilerin HTTP sunucularına erişimini sağlar.

HTTP CoAP Vekil Sunucu. HTTP istemcilerinin CoAP sunucularına erişimi sağlar.

Enerji verimli evde sağlık uygulamasında hasta üzerinden duygular yardımıyla bazı değerler toplanmaktadır. Bu değerler Internet ortamına aktarılmaktadır. CoAP HTTP vekil sunucusu bu işlemleri yapabilmektedir. Çalışmada Cross CoAP Vekil Sunucu kullanılmıştır.

8.1. Cross CoAP Vekil Sunucu

CoAP mesajlarını HTTP mesajlarına dönüştürüp istemcilerin bulut üzerindeki bir sunucuya veri göndermesi sağlanabilmektedir. GET, PUT, POST, DELETE gibi temel HTTP komutlarını HTTP'deki yapıya benzer şekilde kullanır. Ayrıca unicast iletişimin yanı sıra multicast iletişime de olanak tanır. Vekil sunucu UDP portuna yapılan istekleri dinleyerek bunları HTTP'ye dönüştürür.

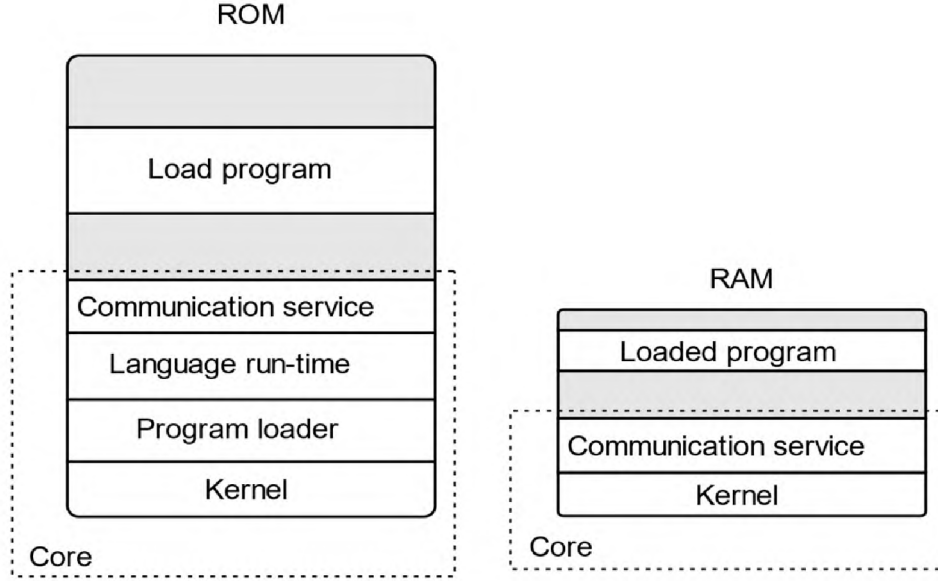
9. CONTIKİ İŞLETİM SİSTEMİ

Contiki, nesnelerin Internet'i ağında bulunan sınırlı kaynaklara sahip, düşük güçle çalışan kablosuz cihazlar için geliştirilmiş bir işletim sistemidir [50]. C programlama tabanında geliştirilen Contiki ilk olarak 2002 yılında Adam Dunkels ve ekibi tarafından ortaya atılmıştır. Geliştirilmiş bu işletim sistemi birçok donanıma kolayca adapte olmaktadır. Çok düşük RAM ve ROM barındıran cihazlarda bile haberleşmenin yapılması mümkündür. Contiki ayrıca IPv4 ve IPv6 üzerinden haberleşmeyi sağlayabilmektedir. Kurumsal Internet ara yüzünden indirildiğinde içerisinde aşağıdaki dizinler yer almaktadır.

- Doküman (Doc). Geliştiriciler için hazırlanmış bazı doküman verilerinin bulunduğu klasördür.
- Uygulamalar (Apps). İçerisinde bazı uygulama kütüphaneleri vardır. Bu uygulama kütüphaneleri genellikle örnekler dizininde yer alan uygulamalar tarafından kullanılmaktadır. Direkt olarak çalıştırılabilecek Contiki uygulamalarını da barındırmaktadır.
- Örnekler (Examples). Contiki içerisinde yer alan kütüphanelerle geliştirilmiş bazı hazır örnek uygulamaların bulunduğu dizindir.
- Çekirdek (Core). Contiki işletim sistemi çekirdek kodlarını içermektedir. Sistemin farklı katmanlarına ait alt dizinler bulundurulur.
- İşlemci (Cpu). Contiki sisteminin üzerinde çalıştığı donanıma ait mikro denetleyici dosyalarını içerir.
- Platform: Contiki işletim sisteminin çalıştırılacağı donanım ve platformlara özel dosyaların tanımlandığı dizindir.
- Araçlar (Tools). Geliştirilen uygulamalara özgü araçların bulunduğu dizindir. Önceki bölümlerde anlatılan Contiki ağ simülatörü olan Cooja da bu dizinde yer alır.

Bir işletim sisteminde süreçler genellikle iş parçacığı şeklinde çalıştırılır. Her bir iş parçacığı bellekte bir alanı kullanır. Oluşturulan iş parçacıklarının sayısı arttıkça bellekteki kullanılabilir alan azalır ve zamanla yeni iş parçacıklarına alan kalmaz. Ayrıca bir iş parçacığının bellekte ne kadar alana ihtiyaç duyacağı önceden bilinemez. Bu tarz bir yapı nesnelerin Internet'i ağındaki kısıtlı kaynaklara sahip cihazlar için pek de kullanışlı değildir. İşte bu yüzden Contiki işletim sistemi süreçleri çekirdek içerisinde iş parçacık modeliyle

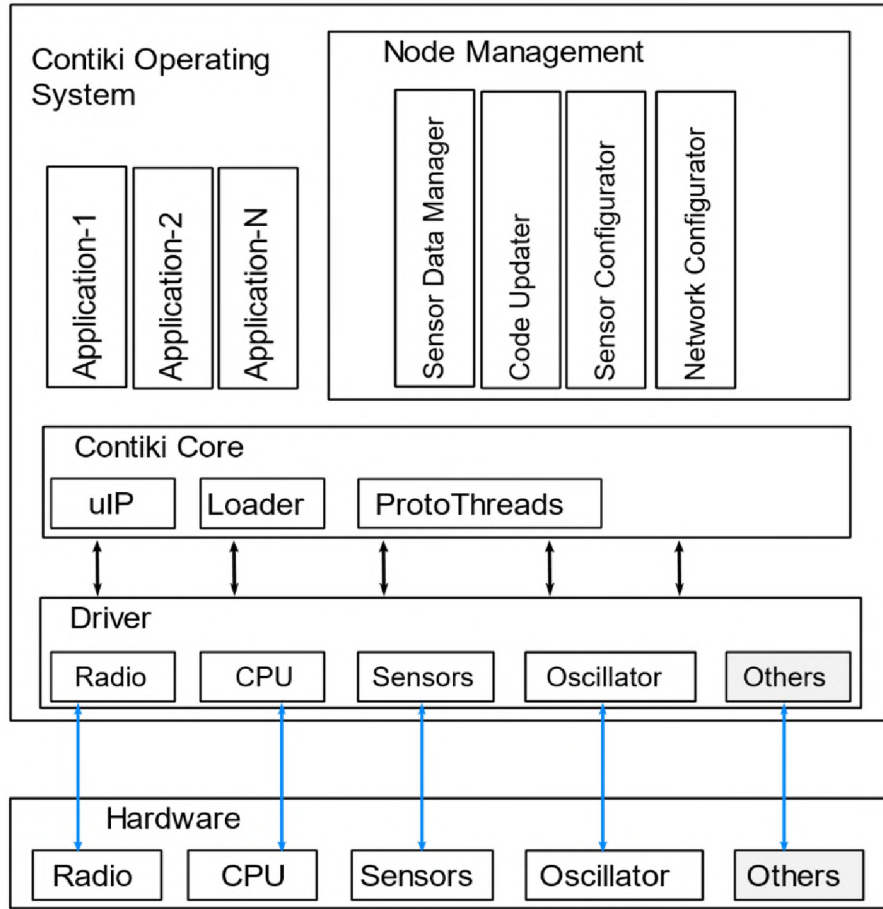
değil olay tabanlı bir model takip ederek koşar. Çekirdek kısmında olay tabanlı model koşarken, sistem çoklu iş parçacıklarını da destekler. Contiki işletim sistemi çalışma esnasında çekirdek, program yükleyici, kaynak kütüphaneler ve süreçler olarak dört ana bölüme ayrılır. İşletim sistemi derleme sürecinde Şekil 23’de gösterildiği üzere yüklü programlar ve çekirdek olarak iki bölüme ayrılmıştır.



Şekil 23. Çekirdek ve yüklü programların gösterimi [51]

Çekirdek ikili olarak derlenir ve cihaz belleğine yüklenir. Programlar, iletişim yığını veya doğrudan depolama birimini kullanan program yükleyicisi tarafından yüklenir. Contiki çekirdeği, olayları çalışan süreçlere ve süreçlerin yoklama işleyicilerine göre çağıran sade bir olay zamanlayıcısıdır. Süreçlerin ilerlemesi gönderilen olaylar veya yoklama mekanizması tarafından başlatılabilir. Çekirdek, bir olay işleyicisini başlattıktan sonra bu olay için işlem önceliğine karışmaz. Bundan dolayı olay işleyicileri işlem üstünlüğü alabilecek şekilde tasarlanmalıdırlar.

Contiki çekirdeği tarafından desteklenen iki tür olay vardır: senkron olaylar ve asenkron olaylar. Asenkron olaylar daha sonra hedef süreçlere aktarılmak üzere kuyruğa gönderilir. Senkron olaylar asenkron aksine bekletilmeden hedef süreçlere aktarılır. Contiki çekirdeğindeki yoklama mekanizması, her bir asenkron olay arasında tarifelenen yüksek öncelikli olaylardan oluşmaktadır. Şekil 24 Contiki OS mimarisinin blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 24. Contiki OS Mimarisi [52]

Contiki işletim sistemi üzerindeki batarya ile çok uzun zaman boyunca çalışması beklenen düşük güç tüketimli sistemlere uygun olarak tasarlanmıştır [50]. Düğümler işlem yürütmediği zamanlarda uyku durumuna geçebilme yeteneğiyle veya geliştirilen güç tüketimi minimize etme algoritmalarıyla batarya kullanım sürelerini uzatmaktadır. Contiki işletim sistemi güç tüketiminin hangi aşamalarda ne kadar harcadığı bilgisini verebilecek bilgi mekanizmalarına da sahiptir.

9.1. COOJA

Cooja, Contiki işletim sisteminin simüle edilebildiği java tabanlı bir simülör uygulamasıdır [53]. Contiki işletim sistemi içerisinde bir araç olarak gelen Cooja java programlama dilinde geliştirilmiştir. Kullanıcılar kendi çalışmalarına göre ek modüller

ekleyerek uygulamayı zenginleştirebilirler. Uygulama içerisinde birçok donanım desteği mevcut olup yeni donanımlar da uygulamaya eklenebilir.

Cooja oldukça esnek yapısı sayesinde radyo ortamını, düğüm donanımlarını ve giriş çıkış elemanlarını değiştirerek farklı şekillerde çalıştırılabilir. Cooja uygulamasında simüle edilmiş bir düğümün üç özelliği vardır. Bunlar; veri belleği, düğüm tipi ve donanım çevre birimleridir. Bir düğüm tipi birden çok düğüm arasında paylaşılabilir ve bütün düğümler bu düğüm tipinin ortak özelliklerine sahip olabilirler. Yani aynı türdeki düğümler aynı tür program kodunu aynı simülasyon içerisinde çalıştırabilirler. Fakat çalışma esnasında düğümlerin hafızaları farklı giriş çıkış işlemlerinden dolayı farklılaşırlar.

Contiki dilinde geliştirilen programların derlenmiş halini Cooja doğrudan CPU üzerinde çalıştırabileceği gibi, farklı emülatörler üzerinde de çalıştırabilir (Örneğin MSP430 emülatörü). Cooja üzerinde Contiki işletim sistemi olmayan başka işletim sistemine sahip düğümleri de simüle edebilmektedir.

Coojada arabirimler ve düğümlerle etkileşimler eklentiler sayesinde gerçekleştirilir. Kullanıcı uygulama üzerinden bir simülasyonu başlatması veya durdurması da bir eklenti örneğidir. Örneğin kullanıcı simülasyona eklediği düğümlerin ortamda hareket etmesini sağlamak için bir java uygulaması yazarak uygulamaya eklenti olarak ekleyebilir ve düğümlerin simülasyon esnasında önceden belirlenen kurallara göre hareket ettirilmesi sağlayabilir.

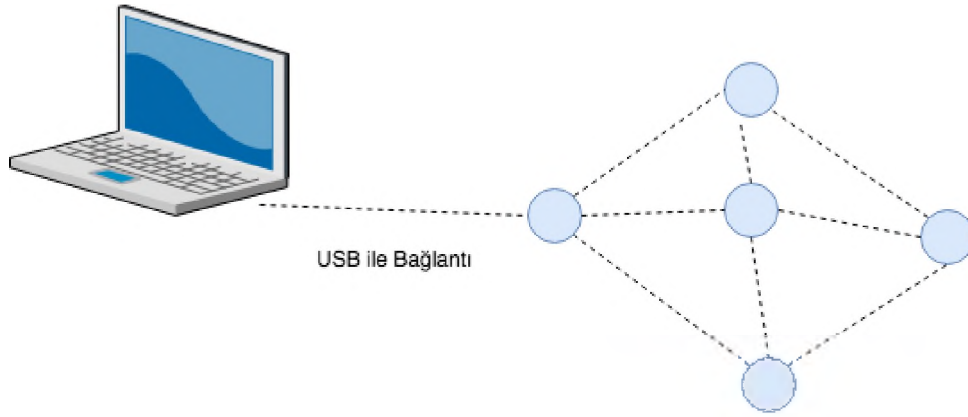
Cooja uygulamasında başlatılan bir simülasyonda düğümler arasındaki haberleşmeyi görebilmek için Cooja radyo dalgasını anımsatan bir model kullanır. Fakat kullanıcılar bu modeli kendi isteğine göre değiştirebilir. Kullanıcılar geliştirmekte olduğu uygulamayı çevresel faktörleri taklit ederek sonuçlarını görüntüleyebilirler. Simülasyon ortamının bu esnekliği ile gerçekçi ortama uygun senaryolar gerçekleştirilebilir.

Contiki olay tabanlı bir işletim sistemi olduğu için başlanan bütün olaylar tamamlanır. Cooja, yüklenen Contiki dosyalarını çağırarak bu özellikten yararlanır; simüle edilen her düğüm yalnızca bir olayı gerçekleştirmektedir. Contiki işletim sisteminde geliştirilen her yazılım yalnızca tek bir donanım tipine özel derlenmektedir. İlgili platforma ait sürücüler işletim sistemine tanıtılarak, geliştirilen uygulamanın gerçek donanımda nasıl davranacağı tanımlanmış olur. Örnek olarak MSP430 emülatöründe geliştirilen bir uygulama, Contiki işletim sistemi MSP430 işlemci mimarisine özel olarak derlenmektedir ve bu derlenmiş dosya yalnızca o emülatörde çalışabilmektedir. Taklit edilmesi beklenen platform Contiki işletim sisteminde standart sunulan platformlar içinde yer almıyorsa, bu durumda öncelikle

ilgili platform Contiki işletim sisteminde tanımlanacak ve derlenme zamanı için ilgili sürücüler yüklenmiş olacak. Aksi halde derlenme yapılamaz.

9.1.1. Contiki ile IPv6 Ağı Kurmak

Contiki, uç düğümler (end devices) ve sınır yönlendirici (edge router) ile kurulan bir ağdan IP paketlerini göndermeyi sağlayan hazır bazı uygulamalar bulundurmaktadır. Bu uygulamaları Cooja ağ simülatöründe aktif hale getirdiğimizde Şekil 25’de yer alan bir ağ şeması ortaya çıkmış olur.



Şekil 25. Bilgisayar ve Duyarga Ağı Bağlantısı

Bilgisayar, IPv6 adresleme sistemi ile adreslenmiş uç düğümlere erişebilmek için sınır yönlendiricisini kullanır. Bilgisayar IP paketlerini seri giriş çıkış kanalından bağlı olan kenar yönlendiricisine gönderir ve aynı şekilde uç düğümlerden gelen verileri de bu kanal üzerinden alır. Dolayısıyla uç düğümler ile bilgisayar arasında yine kısıtlı kaynaklara sahip bir çeşit yönlendirici cihaz bulundurmak gerekir. Bu cihaz hem IP ağına hem de 802.15.4 ağına katılabilen bir cihaz olmalıdır.

SLIP (Serial Line IP) [54] adı verilen bir protokol ile beraber kenar yönlendiricisi ile bilgisayar arasındaki veri akışı gerçekleşmektedir. Bu akış içerisindeki veri formatı SLIP protokolü tarafından belirlenir. SLIP protokolü burada sadece ilgili kanalı dinleyerek elde ettiği verileri sunabilir. Buradan elde edilen veriler anlamlandırılabilir.

10. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Günümüzde teknolojik olanakların artmasıyla özellikle yaşlı hastaların hastaneye gitmeden kişisel yaşam alanı içerisinde gözetim altında tutulması sağlanabilmektedir. Devlet kurumları evde sağlık hizmetlerini giderek yaygın hale getirmektedir. Ülkemizde halk sağlığı kurumları yaşlı hastaların periyodik olarak kontrolünü doktor ve hemşireleri hastaların evine göndererek yapmaktadır. Görevliler hastalar üzerinde yaptığı tahlil ve muayeneleri kayıt altına alıp bir sonraki kontrol zamanını belirlemektedir. Fakat bu aralık içerisinde hastaların bazı yaşamsal bulguları merkezi kontrol sistemleri tarafından anlık olarak izlenememektedir.

Ülkemizde bu alanda yapılan bazı çalışmalar mevcuttur. Arçelik firmasının geliştirmiş olduğu BeyondCare ürünü hastanın kalp seviyelerine yakın noktalara yapıştırılarak ekg (Elektrokardiyogram-Kalp Akım Grafiği) sinyalleri merkezi sistemlere aktarılabilir. Bu cihaz Internet bağlantısı olmadığı durumlarda da verileri yedi gün boyunca hafızasında depolayabilmektedir. Şekil 26’de BeyondCare ürününe ait bir görsel gösterilmiştir.



Şekil 26. Arçelik markasının geliştirdiği mobil ekg cihazı [55]

Ekg verilerinin anlamlandırılması yalnızca uzman kişiler tarafından yapılabildiği için bu ürün ilk etapta profesyonel kullanıcılar için geliştirilmiştir. Uzmanlar takibini yaptığı hastaların geçmişe dönük analiz verilerini görüntüleyebilir veya anlık olarak ekg sinyallerin

izleyebilir. Fakat yedi günden daha uzun süren analizlerde pil tekrar şarj edilmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanıcının göğsünde taşıyacağı bu aparat kullanıcı konforu açısından rahatsız edici olabilmektedir.

Yapılan çalışmalardan biri de Tübitak ve Türk Telekom'un ortak geliştirmiş olduğu "Mobil EKG" cihazı. Kibrit kutusu büyüklüğündeki bu mobil EKG cihazı elde ettiği verileri akıllı telefonlar aracılığıyla uzmanların kontrol ettiği sistemlere aktarabilmektedir. Uzmanlar bu verileri anlık olarak görüntüleyebilmekte ve alarm durumları oluşturabilmektedir.

Uluslararası alanda ise İngiltere'de SPHERE adında bir topluluk oluşturulmuştur. SPHERE adını, "Sensor Platform for Healthcare in a Residential Environment Sensor" kısaltmasından almaktadır. Obezite, depresyon, diyabet, inme, düşmeler, solunum yolları, kardiyovasküler ve kas-iskelet sistemi hastalıkları en büyük sağlık sorunlarından bazılarıdır ve sağlık giderlerinin en hızlı yükselen kategorileridir. Ve bu sağlık problemleri insanlığın giderek daha çok kısmının hissettiği, önlem alınması gereken sorunlardır. SPHERE, gelişen teknolojinin bu sorunların bazılarını ne ölçüde cevap verebileceğini araştırma ve geliştirmek için tasarlanmış yaklaşık yüz araştırmacıdan oluşan bir topluluktur [56].

Topluluk insanların evde yaşadığı ve karşılaştığı problemleri göz önüne alarak bazı giyilebilir duyargalar geliştirdi. Bu duyargalar yardımıyla birtakım soruların cevabı bulunabilir. Bunlar;

- Diyet ve uyku gibi faktörler arasındaki korelasyonları bulmak
- Birçok koşula bağlantılı hareketsiz davranışları karakterize etmek
- Aylar boyunca hareket, duruş ve hareket düzenindeki değişimleri ölçmek
- İnsanların reçete edilen ilaç alıp almadıkları da dahil olmak üzere yeme içme davranışını analiz etmek
- Depresyon veya anksiyete dönemlerini tespit etmek ve bilgisayar tabanlı tedavi kullanarak müdahale etmek
- Yaşlı hastaların düşme problemini analiz etmek

İnsanların yüz ifadesinde, duruşunda ya da ne sıklıkla yediğinde meydana gelecek hafif değişiklikler bile kişinin bir hastalık belirtisi olduğuna dair bilgi verebilir. Bu ve buna benzer bazı sorunlar geliştirilen duyargalar yardımıyla incelenebilir ve tedavisine başlanılabilir. Topluluk bütün bu araştırmaların başarılı olması için uzman klinikler, mühendisler, tasarımcılar ve sosyal hizmetler uzmanlarıyla ortaklaşa çalışırlar.

Araştırmalar için İngiltere’de bir ev yaklaşık 60 duyarga, kamera ve giyilebilir teknolojilerle donatılmış. Örneğin sıcaklık ve hava değerlerini ölçmek için tavanlara bazı duyargalar yerleştirilmiş, kişilerin odada hangi konumda olduklarını ve hareketlerini algılamak için kızılötesi duyargalar yerleştirilmiş, evin ana yaşam alanlarına da kameralar yerleştirilmiş. Bunun gibi birçok teknolojik eleman ile donatılan ev kişilerin davranışları ve sağlığı hakkında birçok veri üretebilmektedir. Üretilen bu veriler kişilerin doktorlarına sunulabiliyor. Şekil 27’de SPHERE topluluğunun geliştirdiği giyilebilir çok düşük güç tüketimi olan bir duyarga gösterilmiştir.



Şekil 27. SPHERE topluluğunun kullandığı bazı duyargalar

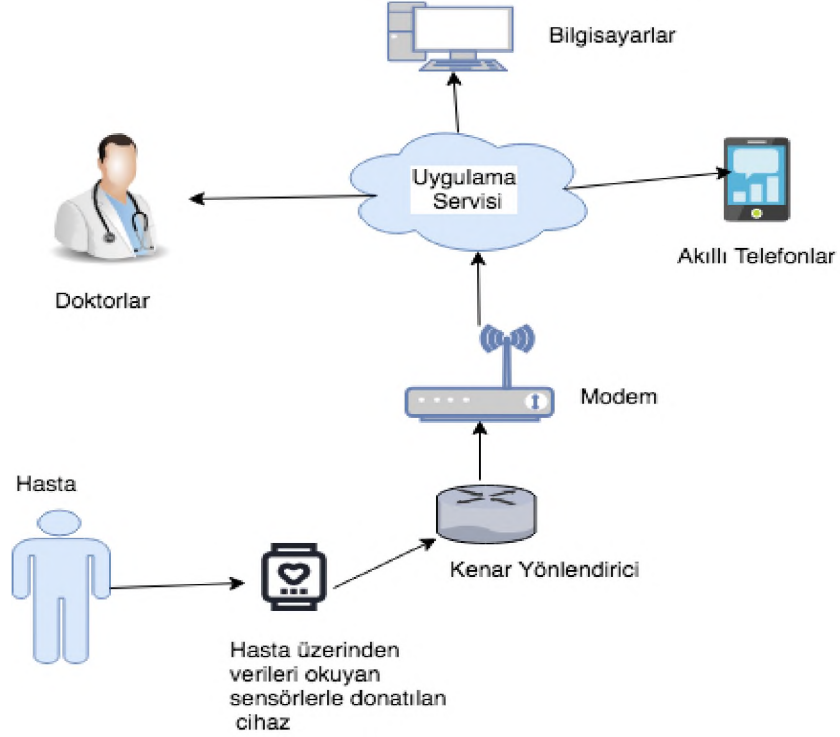
11. ÇALIŞMA

Bu çalışmada daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere hasta üzerinde taşınacak duyargalardan elde edilen veriler ev ortamında bulunan bir ağ geçidi yardımıyla merkezi bir kontrol mekanizmasına aktarılacaktır. Çalışmanın temel amaçları, hastaların taşıdığı/giydiği cihazların pil ömrünün uzun olması, geniş iletim alanına sahip olması ve kararlı bir biçimde çalışmasıdır.

Geliştirilecek yöntemler ve algoritmalar ile evde bakım ve gözetime muhtaç hastaların sağlık verileri uzak bir karar destek sistemi ile eş zamanlı olarak görüntülenebilecektir. Aynı zamanda hasta üzerinde acil müdahaleyi gerektirecek senaryolarda da ilgili sistemlere bildirim gönderilerek hızlı aksiyon alınması sağlanacaktır.

Hasta takacağı akıllı bileklik üzerinde bulunan duyargalar yardımıyla hem sağlığına ilişkin verileri hem de bu duyargalarda yer alan gyroskop yardımıyla fiziksel hareketlerde meydana gelen ani durumları (düşme gibi) merkezi sistemlere hiçbir müdahalesi olmaksızın iletebilecektir.

Çalışmanın odak noktası ise geliştirilecek olan bu akıllı bilekliğin mümkün olduğunca uzun pil ömrüne sahip olması ve geniş bir çekim alanına sahip olması olacaktır. Bu yüzden geliştirmeler enerji başlığı üzerine yoğunlaşmıştır. Aşağıda Şekil 28'de çalışmaya ait bir şema görüntülenmiştir.



Şekil 28. Çalışmaya ait şema

11.1. Neden Bu Çalışma?

Günümüzde giderek yaygınlaşan akıllı bileklikler artık genç yaşlı herkesin kullandığı akıllı aksesuarlar haline dönüşmüş durumda. Akıllı bileklikler üzerindeki duyargalar sayesinde kişi üzerinden bir takım sağlık verilerini kullanıcıya sunabilmektedir. Bunlar yürüyüş mesafesi, nabız sayısı gibi değerler olabilir. Üzerinde barındırdığı işletim sistemleri daha birçok özelliği de kullanıcıya sunmaktadır. Fakat bu cihazlar yine kullanıcının yanında taşıdığı akıllı telefona bağlı çalışan cihazlardır. Üzerinde birçok özelliği barındıran bu kompleks bilekliklerin en büyük eksikliği ise batarya ömürlerinin kısa olmasıdır.

Günümüzde birçok marka akıllı bileklik geliştirmektedir. Bu bilekliklerin ortak noktası, bir akıllı telefon üzerinden Internet ortamıyla etkileşimde bulunmasıdır. Aynı zamanda geliştirilen bu akıllı bileklikler çok uzun pil ömrüne sahip değildir. Bu çalışmadaki kullanıcı grubu genellikle yaşlı hastaları kapsamaktadır. Bu kişiler akıllı telefon kullanımına çok fazla hâkim değildir. Bu durumdaki hastalar için akıllı telefon gereksiniminden kurtaracak, pili birkaç gün değil çok daha uzun süre yeterli olabilecek özelleştirilmiş bir cihaz daha kullanışlı olacaktır.

Geliştirilecek bileklik ile hasta, ev içerisine yerleştirilecek veri toplayıcı düğüm sayesinde bileğindeki bileklik üzerinden okunan verileri hiçbir müdahaleye gerek kalmadan hem diğer ebeveynlere hem de sağlık birimlerine iletebilecektir. Üstelik pil ömrü geleneksel bilekliklere göre çok daha uzun süre yeterli olacaktır.

Çalışmanın diğer boyutu da hastalar üzerinden birçok veriyi analizde kullanılmak üzere toplamak olacaktır. Gerçek dünyadan toplanacak bu veriler üzerinden daha sonra farklı çalışmalar yapılabilir. Hastaların bazı basit ölçümler için hastaneye gitmesi engellenebilir, tedavi ve kontrol süreci daha sağlıklı yapılabilir.

12. DÜŞÜK GÜÇ TÜKETİMİ İÇİN YAKLAŞIMLAR

Nesnelerin Internet'i ağlarında enerji tüketimi çok ciddi bir problemdir. Enerji tüketimi genellikle dört farklı nedenle artar. Bunlar; İletim (Transmission), Alım (Receiving), Dinleme (Listening) ve Paket Kaybından oluşur [4]. Bunlar arasında en önemli güç tüketimini ise dinleme süreci yapmaktadır. Diğer işlemler yürütülürken cihazların radyosu çok kısa süreliğine açılıp kapanmaktadır. Fakat dinleme işleminde cihazlar alım işlemine hazır beklemesi gerektirdiği için radyosunu uzun süre açık tutmak zorundadırlar. Bu da çok fazla güç tüketimine neden olmaktadır. Bu yüzden dinleme süresinin kısaltılması güç tasarrufu sağlayacaktır.

Geliştirilecek bilekliğin pil ömrünü artırmak için güç tüketimini azaltmak gerekmektedir. Bilekliğin toplayıcı düğüm ile haberleşmesinde kullanılacak protokol güç tüketimine doğrudan etki edecektir. Bu yüzden nesnelerin Internet'i için geliştirilen ve güç tüketimi konusunda özelleştirilen 6LoWPAN protokolü bu çalışmanın iletişim protokol yığını olarak kullanılacaktır.

Bu protokolda sunulan standart özelliklerin bazıları çalışmaya göre yeniden düzenlenerek mevcut protokol yığını çalışmaya özel olarak tasarlanacaktır. Bunun için yapılan çalışmalar sonucunda dört ana başlık güç tüketimini azaltan düzenlemeler olarak belirlenmiştir. Bunlar;

- Çerçeve zamanının boyutunun uygulamaya göre ayarlanması
- İşaretçi gönderimini düzenlemek
- İletişim gücü kontrolü
- Verileri Önceliklendirmek

Bu yöntemler sayesinde güç tüketimi azaltılabilmektedir.

12.1. Çerçeve Zamanı Boyutu

Çerçeve zamanı boyutu azaldıkça zaman içindeki gecikme azalacaktır. Bu anlamda ortak hücreler daha sık tekrarlanacağı için güç tüketimi artacaktır. Bu çalışmada batarya ile çalışan cihaz üzerinden gönderilen veriler çok sık gönderilmediği için belli gecikmeye dayanımlı olacak şekilde çerçeve zamanı ayarlanabilir. Çalışmada çerçevede bulunan hücre

sayısı 101 olarak belirlenmiştir. Bu da her bir çerçeve zamanı için $101 \cdot 10 = 1010$ mili saniye (yaklaşık 1 saniye) zaman ayrılması anlamına gelecektir.

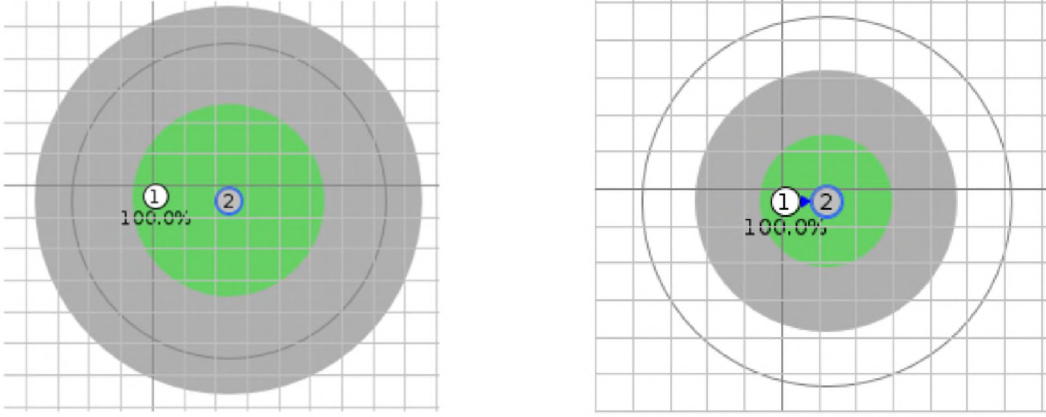
12.2. İşaretçi Gönderimi

Ağ koordinatörü ağ hakkında bilgi yayarken gelişmiş işaretçiler olarak bilinen EB'leri kullanır. İşaretçi gönderim sıklığına IETF 6TiSCH bir sınır koymamıştır. İşaretçi gönderimindeki sıklık arttığı zaman düğümlerin ağa katılması hızlanacağı gibi güç tüketimi de artacaktır. Ağ koordinatörü genellikle ağa bağlı cihazlar olduğu için güç sorunu yoktur ve işaretçi gönderim sıklığı oldukça fazladır. Geliştirilecek bileklik toplayıcı düğüm haricinde başka bir düğümle haberleşmeyeceği için işaretçi yayması engellenerek güç tüketimi artırılabilir. Çünkü işaretçi göndermek isteyen bir düğüm kısa süre de olsa radyosunu açık tutmak zorunda kalır. Bu radyo iletişimini engellediğimizde batarya ömrünün de arttığı gözlemlenmiştir.

12.3. İletim Gücü Kontrolü

Düğümler veri gönderirken paket iletiminin sağlıklı olabilmesi için radyo gücünü maksimum seviyede kullanabilirler. Günümüzde yaygın kullanılan giyilebilir cihazlar genellikle bir cep telefonu üzerinden Internet'e bağlanırlar. Giyilebilir cihaz cep telefonu ile yeterli yakınlıkta değilse veri kayıpları ve bağlantı kopmaları yaşanır. Fakat evde sağlık uygulamaları, cihazı giyen kişinin bulunduğu ortamın tamamını kapsayan bir cihaza ihtiyaç duyar. Bu durumda eğer yüksek gönderim gücüyle radyo ayarlanırsa, radyo çoğu durumda gereğinden fazla güç harcayacaktır. Diğer yandan eğer radyo toplayıcı düğüme olan yakınlığıyla orantılı olarak ayarlanabilirse, güç tasarrufu sağlanabilir. Yani iletim gücü dinamik olarak değiştirilebilmeli.

Aşağıdaki Şekil 29'da Cooja ağ simülatöründe gerçekleştirilen örnek senaryo gösterilmektedir. Soldaki şekilde düğümler arasındaki mesafe 10m ve sağdaki şekilde düğümler arasındaki mesafe 20m'dir. 1 numaralı cihaz toplayıcı düğümü, 2 numaralı cihaz giyilebilir düğümü ifade etmektedir. Görüldüğü üzere kök düğüme yaklaştıkça hasta üzerindeki cihaz, iletim gücünü azaltarak enerji tasarrufuna gitmektedir.

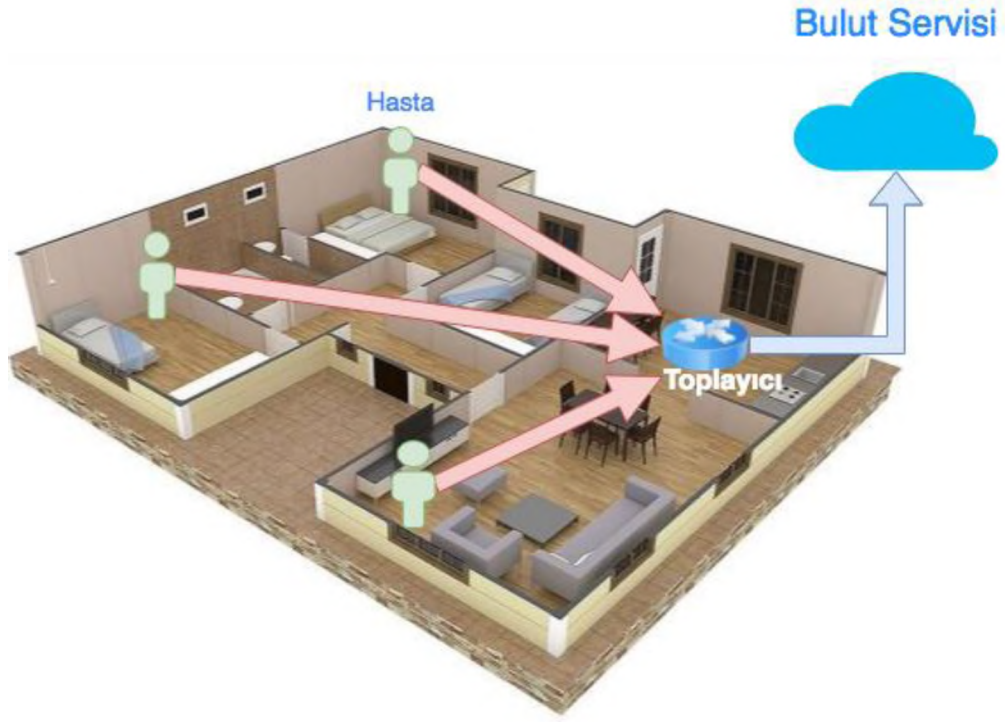


Şekil 29. Cooja ağ simülöründe farklı mesafelerdeki düğümler ve çekim alanları

12.4. Verileri Önceliklendirmek

Hasta üzerindeki bileklikten elde edilen duyarga verileri yaşamsal bulgular içermektedir. Fakat bu veriler her zaman kritik değerlerde olmayabilir. Bu yüzden veriler kritik veya kritik olmayan veriler olarak kümelendirilebilir. Kritik veriler ise öncelikli bir şekilde merkezi sistemlerle paylaşılabilir. Kritik olmayan veriler ise analiz verisi olarak kullanılabilir. Kritik bir veri ile karşılaşıldığında cihaz en kararlı şekilde Internette bulunan bir sisteme bu veriyi iletmelidir. Kritik olmayan veriler ise ortalama ve standart sapma değerlerini hesaplayıp uygun gönderim şartları oluştuğunda merkezi sisteme gönderilmelidir. Veriler tampon bir bellekte tutulup, tampon dolması durumunda merkezi sisteme iletilip tampon temizlenebilir. Ya da toplayıcı düğüme oldukça yakın olunan bir anda düşük güç ile iletim yapılabilir.

Çalışma TI (Texas Instruments) cc2538 tabanlı, Mavi Alp Bilişimin geliştirdiği mahmote düğümü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 30'de gerçekleştirilen sisteme ait modeli içerir.



Şekil 30. Çalışmanın ev ortamındaki uygulaması

13. ALGORİTMA

Güç tüketimini minimize etmeye yönelik bir önceki bölümde bahsedilen öneriler üzerine bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaya göre programlanan bileklik hasta üzerindeki duyargalar aracılığıyla verileri alıp merkezi sistemlere enerji verimli şekilde aktaracaktır.

Algoritma temel olarak uygulama katmanına, ortam erişim katmanına ve fiziksel katmana müdahale etmektedir. 6LoWPAN iletişim kuralları yığını üzerindeki bu katmanlarda yapılacak düzenlemeler ile beraber güç tüketimi azaltılacaktır.

Uygulama katmanında yapılacak düzenlemelerin başında duyargalardan üretilen verilerin anlamlandırılarak gruplandırılması olacaktır. Veriler kritik ve kritik olmayan veriler olarak gruplandırılacaktır. Gruplandırma işlemi yapılırken kritik olmayan veriler de kendi içinde dinamik olarak ortalaması alınıp ortalama ve standart sapma ile bellekte saklanacaktır.

Ortam erişim katmanında ise çerçeve boyutu zamanı düzenlenecek, istemci tarafındaki gelişmiş işaretçi gönderimi engellenecektir. Çerçeve boyutu zamanı artırılarak çerçevelerin zaman içindeki gönderilme sıklığı azaltılacak. Bu sayede daha az radyo kullanan cihaz güç tüketimini azaltacaktır.

Algoritma fiziksel katmanda toplayıcı düğüme olan uzaklığa göre radyo iletim gücünü dinamik olarak değiştirerek güç tasarrufunun büyük bir kısmını burada sağlamaktadır. İstemci cihaz toplayıcı düğümden aldığı gelişmiş işaretçilerden alınan sinyal gücü seviyesine (RSSI) bakarak toplayıcı düğüme olan uzaklığına karar verir. Ardından bir bağlantı bütçeleme (Link Budget) algoritması koşarak iletilecek verinin hangi akım ile gönderileceğini belirler.

13.1. Bağlantı Bütçeleme (Link Budget) Algoritması

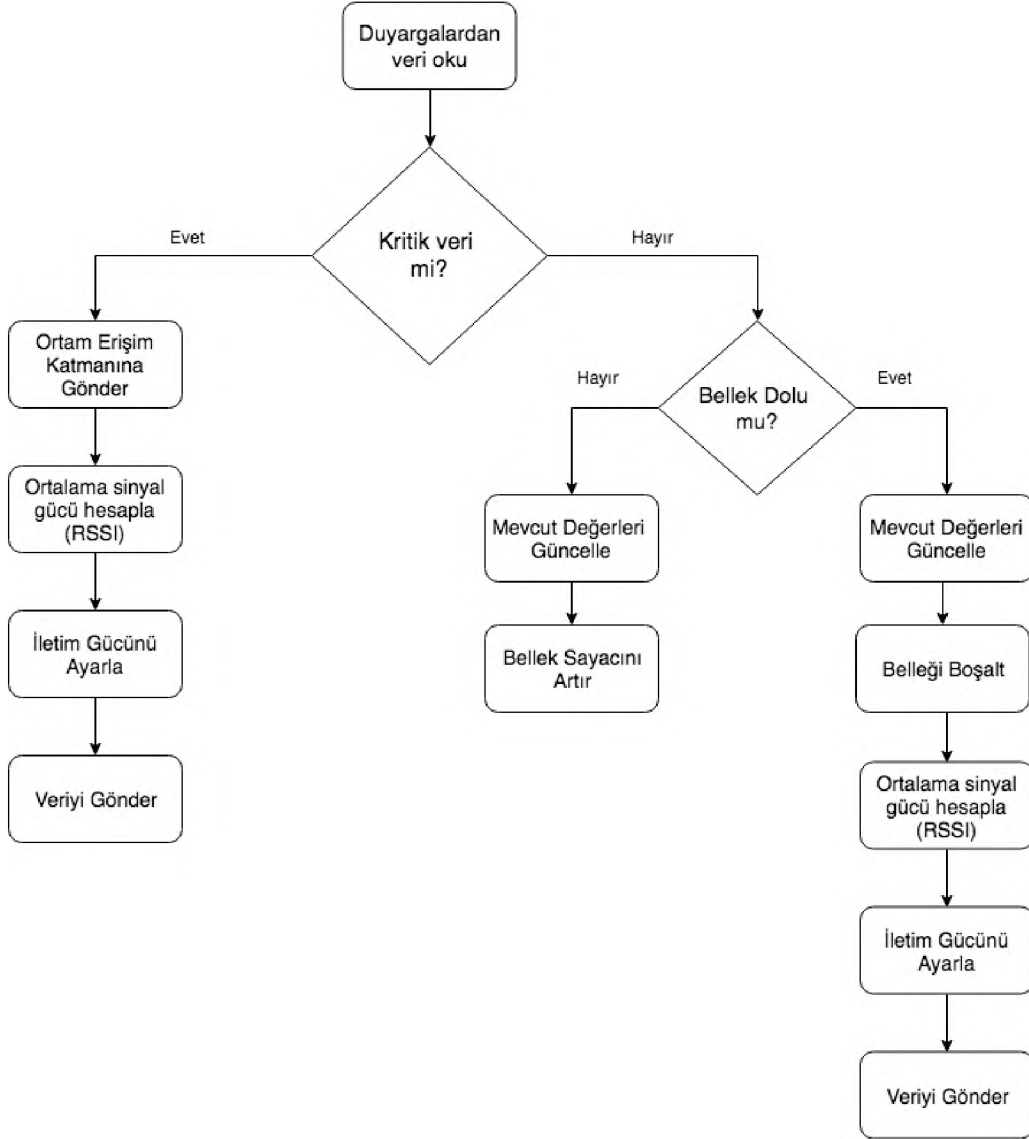
Bağlantı bütçeleme algoritması haberleşme sistemlerinde farklı noktalar arasında iletişimin sağlıklı bir şekilde kurulabilmesi için gerekli ekipman ve diğer değişkenlerin hesaplanması için kullanılır. Göndericiden alıcıya kadar olan kazançlar ve kayıplar hesaplanarak ortaya çıkarılır. Farklı noktalar arasında kablosuz haberleşme yapılırken bu haberleşmeyi etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar kimi zaman atmosferik etkenler

olabileceği gibi kimi zaman da iletim gücü, kullanılan materyaller ve alıcı verici cihazlarının doğru konumlandırılması olabilir. Tüm bu olasılıklar hesaba katılarak yapılan işlemler sonucunda haberleşmenin sağlıklı yapılması amaçlanmıştır. Denklem 1’de Sinyal Gürültü Oranı (SNR) hesaplaması verilmiştir.

$$\text{SNR} = \text{RSSI} - \text{ReceiverSensitivity} (-90 - (-102)) \text{ 12DB} \quad (1)$$

Çalışmada istemci cihaz kişilerin üzerinde taşıyabileceği bir donanım olacağından kullanım kolaylığı nedeniyle oldukça küçük boyutlarda tasarlanmalıdır. Dolayısıyla kablosuz iletişim bağlantı kalitesini artırmak için kullanılacak radyolar güce bağlı olan toplayıcı üzerinde geliştirilmelidir.

Algoritma fiziksel katmanda iletim gücüne karar verirken toplayıcı düğümden aldığı son sinyallerden ağırlıklı olarak son aldığı sinyali baz alarak yeni bir ortalama sinyal gücü hesaplar. Hespladığı bu sinyal seviyesine göre önceden sabit olarak belirlenen tablodan uygun olan iletim gücünü seçer ve buna göre veriyi iletir. Bu sayede hasta toplayıcı düğüme yakın olduğu mesafelerde tam kapasite iletim gücüyle veri iletimi yapmak yerine, sadece veriyi iletebilecek seviyede akım ile veriyi göndererek büyük bir güç tasarrufu sağlanabilir. Şekil 31’da enerji verimli iletim algoritması gösterilmiştir.



Şekil 31. Enerji verimli iletim algoritması

14. TEST ORTAMI

Çalışma gerçek ev ortamında ve gerçek donanımlar üzerinde test edilmiştir. İstemci ve toplayıcı düğüm olarak Mavi Alp Bilişim Teknolojilerinin geliştirmiş olduğu Mahmote düğümü, istemci üzerindeki güç sağlayıcı olarak 3.7 Voltluk LiPo (Lityum-İyon Polimer) pil, istemci üzerindeki yaşamsal bulguları okuyabilmesi için MAX30102 duyargası ve bir Linux dağıtımı olan Ubuntu geliştirme ortamı kullanılmıştır. Şekil 32’de Mahmote düğümünün görüntüsü verilmiştir.



Şekil 32. Mahmote düğümü

Üzerinde Texas Instruments cc2538 işlemcisi bulunan mahmote düğümü gelişmiş giriş/çıkış pinleri sayesinde farklı türdeki duyargalardan verileri okuyup ağ üzerinden iletilme yeteneğine sahiptir. Geliştirme sürecinde programlanabilmesi için

Şekil 32’deki temel (base) kart ile beraber kullanılmaktadır. Ürün ortamına geçildiğinde boyutu oldukça küçültülebilmektedir. Çeşitli yapı ve büyüklükteki bataryaları destekleyen mahmote düğümü bu çalışmada 3.7 voltluk pil ile kullanılmıştır Şekil 33’de üzerindeki 3.7 voltluk LiPo pil verilmiştir.



Şekil 33. LiPo Pil

Günümüzde birçok bataryalı cihaz içerisinde kullanılan pil türüdür. Kullanılmadığı zamanlardaki güç kayıplarının az olması ve kullanılırken yüksek güç sağlamasından dolayı birçok avantaj sağlamaktadır. LiPo piller hücrelerden oluşur ve her bir hücrenin boş hali 3V, dolu hali 4.2V olmalıdır. Çalışmada 250 mili amperlik LiPo pil kullanılmış ve tam dolu kapasitesi 4.13 volt olarak ölçülmüştür.



Şekil 34. MAX30102 duyargası

Şekil 34’de yer alan MAX30102 duyargası istemci düğüm üzerinde yer alıp kişinin bazı yaşamsal bulgularını ölçebilmektedir. Bu duyarga, üzerinde bulunan elektronik elemanlar yardımıyla kişinin vücut sıcaklığı, kalp atış hızı gibi bazı değerleri okuyabilir. Gücünü doğrudan istemci üzerindeki güç pinlerinden alan bu duyarga çeşitli çalışma şekillerine sahiptir. Bu çalışma şekilleri yazmaç (register) adreslerine yazılacak bitler yardımıyla aktif hale getirilebilir. Okuduğu veriyi kendi içerisinde bulunan bir yazmaç üzerine yazar ve Mahmote düğümü giriş çıkış pinleri üzerinden bağlantı sağlanan bu

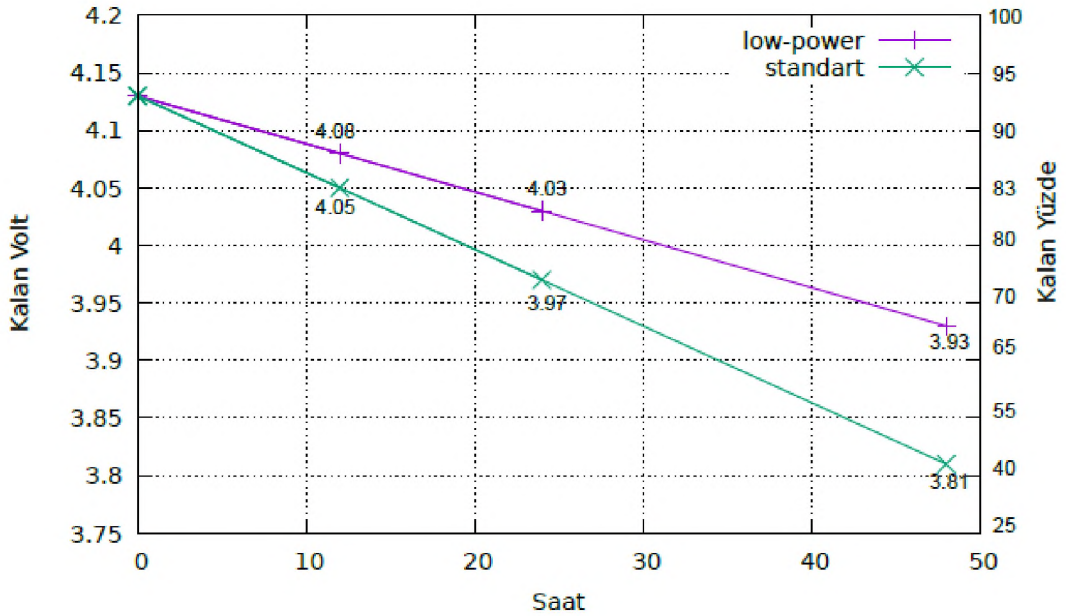
duyarganın ilgili yazmacını okuyarak veriye ulaşabilir. Okuduğu veriler doğrudan kullanılabilir veriler değil ölçeklendirilecek verilerdir.

15. TESTLER

Çalışma boyunca testler 12, 24 ve 48 saatlik periyotlar halinde gerçekleştirilmiştir. Çerçeve zamanı boyutu 31 ve 101 olacak şekilde ortam erişim katmanı düzenlenmiştir. Standart iletişim kuralları ve geliştirilmiş iletişim kuralları için testler yapılmıştır. Testlerin tamamı gerçek ev ortamında ve toplayıcı düğüme 25 metre ile 1 metre uzaklıkta olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

48 saatlik test sonucunda standart iletişim protokolüyle haberleşen cihaz batarya voltajı %40 seviyelerine inerken, geliştirilen algoritmayla çalışan cihaz 48 saat sonunda %67 seviyelerine inmiştir. Çalışma sonunda yapılan testlere göre elde edilen sonuçlarda geliştirilen algoritmayı kullanan IETF 6TiSCH yığını, standart ortam erişim protokolü kullanan IETF 6TiSCH yığına göre güç tasarrufu sağlamıştır.

Uygun şekilde ayarlanan IETF 6TiSCH protokolüne eklenen algoritmalar sayesinde, bir buçuk kat kadar uzun pil ömrü sağlanmıştır. Şekil 35’de 12, 24 ve 48 saatlik test sonuçları verilmiştir.



Şekil 35. 12, 24 ve 48 saatlik test sonuçları

Bu protokol yığınlarını kullanan cihazlar güç tüketimini azaltmak konusunda oldukça başarılı oldukları için pilin tamamının tükenmesini beklemek çok uzun zaman alacağından dolayı testler 12, 24 ve 48 saatlik periyotlar baz alınarak yapılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere zaman ilerledikçe standart protokol yığını kullanan cihazın pilinin daha hızlı tükendiği gözlemlenmiştir.

Uygulama her saniye veri üretecek şekilde geliştirilmiştir. Üretilen veriler sınıflandırılarak gönderilmiştir. Örneğin insan vücut sıcaklığı için 37 dereceden yüksek sıcaklık ölçümleri toplayıcı düğümüne olan mesafe gözetmeksizin direkt olarak uzak sistemlere bir bildirim olarak iletilmiştir. Bu iletim esnasında da radyosunu gereksiz enerji tüketiminden kaçınmak için en uygun akımı seçip bu akım ile veriyi göndermektedir. 37 derecenin altındaki sıcaklıklar ise sürekli güncellenip ortalaması ve standart sapması hesaplanarak bellekteki bir alanda daha sonra gönderilmek üzere saklanmıştır. Bu saklanma işlemi tampon bölge dolana kadar devam etmektedir. Tampon bölge dolduğunda veriler merkezi sistemlere iletilmekte ve bu tamponun doluluğunu kontrol eden sayacı sıfırlanmaktadır. Bazı durumlarda ise tampon bölgenin dolması beklenmeden veriler düşük bir akımla iletelebilmektedir. Örneğin kişi evde hareket halindeyse ve toplayıcı düğümüne çok yakın bir noktadan geçiyorsa, o esnada veriler çok düşük bir akım ile iletebilir. Bu sayede enerji sarfiyatında tasarruf sağlanmış olur. Tablo 7’de farklı mesafelerde 48 saatlik ölçümlerle yapılan testlerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 7. Farklı koşullar altında yapılan testler ve sonuçları

	RSSI(dBi)	Çerçeve Boyutu	Kalan Voltaj
Enerji Verimli İletim	-80	101	3.93
Enerji Verimli İletim	-80	31	3.91
Enerji Verimli İletim	-10	101	3.97
Enerji Verimli İletim	-10	31	3.93
Standart İletim	-80	101	3.81
Standart İletim	-80	31	3.77

Geliştirilen enerji verimli algoritmayı kullanan protokol yığını ve IEEE 802.15.4 standart iletim algoritmasının protokol yığını kullanan iki senaryo test edilmiştir. Test sonuçlarındaki en başarılı sonuç toplayıcı düğümüne yakın noktada (-10 RSSI) olup, çerçeve

boyutu 101 olan sonuçtur. 4.13'lük tam dolu pil 2 gün süren bu test sonucunda sadece 0.2 Volt azalarak 3.97 Volt seviyesine gelmiştir.

Hasta üzerindeki cihazın toplayıcı düğüme olan uzaklığı ve çerçeve boyutu güç tüketimini doğrudan etkilemiştir Tablo 7'ye bakıldığında toplayıcı düğüme aynı mesafelerde yapılan testlerde bile çerçeve boyutu farkı, güç tüketimini değiştirmiştir. Çerçeve boyutu uygulamadan uygulamaya ihtiyaçlara göre değişebilmektedir. Bir çerçeve diliminin 10 ms saniye olduğunu düşünürsek 101 olan çerçeve boyutu $101 \times 10 = 1010$ ms yani 1 sn olarak hesaplanır. Bu da her bir saniyede bir çerçevenin tekrar edeceği anlamına gelir. Çerçeve boyutu 31 olduğunda ise ortalama 0,3 saniyede bir çerçeve tekrar edeceği için daha fazla güç tüketimi olacaktır.

Tablo 8'de bu çalışmada kullanılan Texas Instruments'e ait cc2538 işlemcisin radyo iletim gücü konfigürasyonu verilmiştir. 0'a karşılık gelen -85 değeri toplayıcı düğüme uzak bir noktayı ifade etmektedir. Ve dolayısıyla radyo iletim gücünün tam kapasite kullanılması gerektiğini ifade eder. Toplayıcı düğüme olan uzaklık azaldıkça radyo iletim gücü de azalacaktır. Bu hesaplamaların tamamı, bağlantı bütçeleme algoritmasına göre yapılmış ve sonrasında kod içerisine bir tablo olarak gömülmüştür.

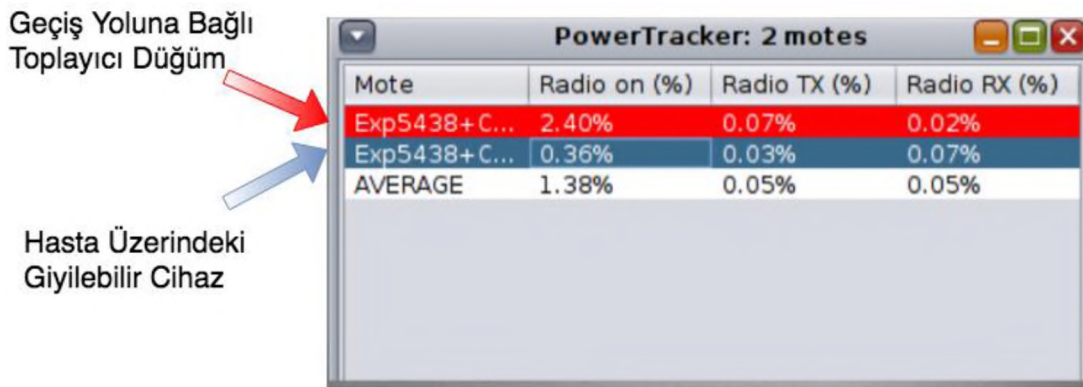
Tablo 8. CC2538 donanımına ait iletim gücü tablosu

0	-85	0XFF
-1	-75	0XFB
-3	-65	0XF7
-5	-55	0XF3
-7	-45	0XEF
-10	-35	0XEB
-15	-25	0XE7
-25	-15	0XE3

Toplayıcı düğümün yaydığı işaretçileri dinleyen istemci cihaz veri iletimini sağlıklı bir şekilde yapabilmesi için önceden hafızasına yüklenen güç iletim tablosuna bakarak doğru iletim gücünü belirler. Bu tablodaki değerler çevresel faktörleri de dikkate almaktadır. Örneğin mesafe olarak 10 metre az gibi görünse de ev ortamında 10 metre içerisinde birden

fazla duvar bulunabilir. Bu da sinyal kalitesini aşağı çekebilir. Bu durumların oluşmaması için iletim gücü tablosu çeşitli ortamlarda yapılan testler sonucunda oluşturulmuştur. Daha önceki bölümlerde istemci tarafında işaretçi gönderiminin radyosunu meşgul ettiğinden bahsedilmişti. Bu da güç tüketimini olumsuz yönde etkiliyordu.

Şekil 36'de Cooja ağ simülasyon uygulamasından bir görüntü verilmiştir. Bu görüntüde istemci ve toplayıcı düğümün zaman içerisinde radyolarını kullanma oranlarındaki fark görüntülenmektedir.



Şekil 36. Cooja ortamında istemci ve toplayıcı düğümün radyosunu kullanma oranı

Şekil 36'da görüldüğü gibi kırmızı satırdaki toplayıcı düğüm zamanın %2.40'ında radyosunu açmaktadır. Burada mavi satırda görüldüğü gibi istemci düğüm veri göndermek için radyosunu çok daha az kullanmıştır. Bunun nedeni radyosunu işaretçi gönderimi için değil veri gönderimi için kullanmasından kaynaklıdır. Bu sayede istemci düğüm üzerinde güç tasarrufu sağlanmıştır.

16. SONUÇ

Geliştirilen algoritma radyonun daha az periyotlarda kullanılmasını, verilerin sınıflandırılarak gönderilmesini ve toplayıcı düğüme olan mesafeye göre iletim gücünün değişken olarak ayarlanmasını sağlayarak güç tüketimini azaltmayı hedefler. Standart iletimde düğüm radyo gücünü tam kapasiteyle kullanmaktadır. Bu yüzden toplayıcıya yakın ve uzak olan noktalarda yapılan 48 saatlik test sonuçlarında güç tüketimleri aynı ölçülmüştür. Buna karşın geliştirilen enerji verimli algoritmaya göre yapılan 48 saatlik testlerde toplayıcıya yakın ve uzak noktalarda farklı tüketimler gözlenmiştir. Mesafe arttıkça güç tüketimi de artmıştır, mesafe azaldıkça güç tüketimi de azalmıştır. Çerçeve boyutu arttıkça güç tüketimi her iki protokol yığını için de azalmıştır. Standart iletimde duyurgadan elde edilen veriler bellekte tutulmadan gönderilmiştir. Geliştirilen algoritmada ise veriler sadece kritik eşiği aşmışsa gönderilmiş, diğerleri daha sonra ortalaması hesaplanıp gönderilmek üzere bellekte tutulmuştur. Dolayısıyla standart iletimde çok daha fazla sıklıkla radyo iletişimi gerçekleştiği için güç tüketimi geliştirilen algoritmaya göre fazla olmuştur.

Yapılan çalışmada uygulanan algoritma standart çözümlere göre %27 civarında bir güç tasarrufu sağlamıştır. Çalışmaların geri kalanında bu oranı artırmaya yönelik yöntemler geliştirilecektir. Ortama yerleştirilebilecek güce bağlı birden fazla toplayıcı sayesinde hasta üzerindeki cihaz kendisine en yakın olan toplayıcı istasyon aracılığıyla veriyi gönderebileceği bir protokol çalışması araştırması yapılacaktır. Bu çoklu toplayıcı ağ topolojisi sayesinde veriler düşük güçle merkezi sistemlere aktarılacak, veri kaybı önlenilecek ve veri tutarlılığı sağlanacaktır. Veriler hasta üzerindeki cihazdan alındığında toplayıcı düğümler kendi arasında bu verileri doğrulayıp analiz edip işleyebilecektir. Bu cihazların güce bağlı olması dolayısıyla işlevsellik ve performans anlamında da verimli çalışabileceklerdir.

Bu ve buna benzer evde sağlık hizmetlerini kapsayan çalışmalar sayesinde daha verimli bir sağlık sistemi sağlanabilecektir. Kullanıcılar hastaneye gitmeden, uzaktan bir takım sağlık ölçümlerini doktorlarına bildirebilecek ve buna bağlı olarak hızlı aksiyon alınabilecektir. Aynı şekilde doktorlar tarafından da hastalarının geçmişe yönelik sağlık raporlarını detaylıca incelemesi daha etkili karar verebilmeyi sağlayacaktır. Hastalar uzakta veya yakında bulunan bütün ebeveynleri tarafından anlık olarak gözlemlenebilecektir. Yaşlı

hastaların akıllı telefon kullanamamasından kaynaklanan sorunlar bu teknolojiler sayesinde ortadan kalkacaktır.

17. KAYNAKLAR

- Abramson, N. THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications. Proceedings of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference. Bilgiler Kitabı, 281-285.
- Ashton, K. That 'internet of things' thing. RFID journal, 22(7), 2009, 99-114.
- Bagnulo, M., Maggheys, P., ve Van Beijnum, I. 2011. RFC 6146: Stateful NAT64: Network Address and Protocol Translation from IPv6 Clients to IPv4 Servers. <https://tools.ietf.org/html/rfc6146>, 20 Kasım 2018.
- Bahtiyar, O. 2012. User Datagram Protocol (UDP). <http://nediranlat.blogspot.com/2012/09/user-datagram-protocol-udp.html>. 15 Kasım 2018
- Bektaş, M., ve Görmüş, S. An energy efficient IoT protocol for healthcare at home. 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), İzmir. 2018. s. 1-4.
- Bhagwat, P. Bluetooth: technology for short-range wireless apps. IEEE Internet Computing, 5(3), 2001, s96-103.
- Bougard, B., ve Cattoor, F. 2005. Energy efficiency of the IEEE 802.15. 4 standard in dense wireless microsensor networks: Modeling and improvement perspectives. Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe-Volume 1, 196-201.
- Brill, H., ve Scott, J. 2016. Little Things and Big Challenges: Information Privacy and the Internet of Things. Am. UL Rev, Bildiriler Kitabı, 66-118.
- Chowdhury, A., Ikram, H., Cha, M., Redwan, H., Shams, S., Kim, K., ve Yoo, S. 2009. Route-over vs Mesh-under Routing in 6LoWPAN. Proceedings of the 2009 international conference on wireless communications and mobile computing: Connecting the world wirelessly. ACM. Bildiriler Kitabı, 1208-1212
- Cipollone, E., Cuomo, F., Della Luna, S., Monaco, U., ve Vacirca, F. 2007. Topology Characterization and Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Multi-Sink Wireless Sensor Networks. Proc. of the 6th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking WorkShop, 196-200.
- Çölkeşen, R., ve Örencik, B. 2008. IPv6. Wikipedia: <https://tr.wikipedia.org/wiki/IPv6>. 12 Aralık 2018
- Dail, J. E., Li, C. C., Magill, P. D., ve Sriram, K. 1999. Method and apparatus enabling enhanced throughput efficiency by use of dynamically adjustable mini-slots in access protocols for shared transmission media. <https://patents.google.com/patent/US5953344A/en>. 12 Ekim 2018.

- De Guglielmo, D., Anastasi, G. ve Seghetti, A. 2014. From ieee 802.15. 4 to ieee 802.15. 4e: A step towards the internet of things. *Advances onto the Internet of Things Springer, Cham, 2014. 135-152.*
- De Guglielmo, D., Brienza, S. ve Anastasi, G. A Model-based Beacon Scheduling algorithm for IEEE 802.15.4e TSCH networks. *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2016 IEEE 17th International Symposium on A. IEEE, 2016. 1-9.*
- Dujovne, D., Watteyne, T., Vilajosana, X. ve Thubert, P. 2014. TiSCH: deterministic IP-enabled industrial internet (of things). *IEEE Communications Magazine, 2014, 52.12: 36-41.*
- Dunkels, A. ve Gronvall, B. Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. *Local Computer Networks 29th Annual IEEE International Conference, IEEE. 2004. p. 455-462.*
- Erdoğan, D. 2017. Eski Köye Yeni İcat. <http://www.milliyet.com.tr/eski-koye-yeni-icatt-ekonomi-2568754/>. 20 Ekim 2018.
- Farooq, M. O. ve Kunz, T. 2011. Operating systems for wireless sensor networks: A survey. *Sensors, 2011, 11.6: 5900-5930.*
- Garg, R. ve Sharma, S. A study on Need of Adaptation Layer in 6LoWPAN Protocol Stack. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies (IJWMT), 2017, 7.3: 49-57.*
- Gutierrez, A. 2017. Enabling Pervasive Wireless Sensor Networks. <https://people.eecs.berkeley.edu/~prabal/teaching/cs294-11-f05/slides/day21.pdf>. 15 Aralık 2018.
- Hermant, J. F. ve Le Lann, G. 1987. The 802.3 D protocol: A variation on the IEEE 802.3 standard for real-time LANs. *Distributed Computing Systems.18th International Conference on IEEE. s. 360-369.*
- Hinden, R. ve Deering, S. 2003. Internet protocol version 6 (IPv6) addressing architecture. <https://tools.ietf.org/html/rfc3513>. 11 Kasım 2018.
- Hui, J. ve Thubert, P. 2011. Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15. <https://tools.ietf.org/html/rfc6282>. 20 Kasım 2018.
- Hui, J. ve Vasseur, J. 2012. The Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL) Option for Carrying RPL Information in Data-Plane Datagrams,. <https://tools.ietf.org/html/rfc6553>. 12 ekim 2018

- Ishaq, I., Carels, D., Teklemariam, G. K., Hoebeke, J., Abeele, F. V., Poorter, E. D. ve Demeester, P. 2013. ETF standardization in the field of the internet of things (IoT): a survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Bildiri Kitabı, 235-287.
- Jiang, D. ve Delgrossi, L. IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. *Vehicular Technology Conference 2008. VTC Spring 2008*. IEEE, 2008. p. 2036-2040.
- Khoufi, I., Minet, P. ve Rmili, B. Beacon Advertising in an IEEE 802.15.4e TSCH Network for Space Launch Vehicles. *Acta Astronautica*, 2018
- Ko, J., Terzis, A., Dawson-Haggerty, S., Culler, D. E., Hui, J. W. ve Levis, P. Connecting low-power and lossy networks to the internet. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49.4.
- Lee, J. S., Su, Y. W. ve Shen, C. C. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*. 2007. 46-51.
- Li, X., Bleakley, C. J. ve Bober, W. 2012. Enhanced beacon-enabled mode for improved IEEE 802.15.4 low data rate performance. *Wireless Networks*, 18.1. 59-74.
- Mainetti, L., Patrono, L. ve Vilei, A. Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey. *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 19th International Conference on*. IEEE, 2011. p. 1-6.
- Mulligan, G. 2007. The 6LoWPAN architecture. In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*, s. 78-82.
- Olsson, J. 2014. 6LoWPAN demystified. Texas Instruments, 13-18. <http://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf>. 23 Kasım 2018.
- Osterlind, F., Dunkels, A., Eriksson, J., Finne, N. ve Voigt, T. 2006. Cross-level sensor network simulation with cooja. *Local computer networks, proceedings 2006 31st IEEE conference on*. IEEE, 2006. p. 641-648.
- Roberts, L. G. 1975. ALOHA packet system with and without slots and capture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1975, 5.2: 28-42.
- Romkey, J. L. 1988. Nonstandard for transmission of IP datagrams over serial lines: SLIP. <https://tools.ietf.org/html/rfc1055>. 13 Kasım 2018.
- Rouse, M. 2005. Aloha. <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Aloha>. 9 Kasım 2018.

- Jhonny, S. 2017. The definition of Internet of Things: A simple explanation. <https://www.expressvpn.com/blog/what-is-the-internet-of-things-iot/>. 4 Kasım 2018.
- Shelby, Z. ve Bormann, C. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet. Bölüm 43. WILEY. 2011. 82-84
- Shelby, Z., Hartke, K. ve Bormann, C. 2014. The constrained application protocol (CoAP). <https://tools.ietf.org/html/rfc7252>. 13 Aralık 2018.
- Thierer, A. ve Castillo, A. 2015. Projecting the Growth and Economic Impact of the Internet of Things. George Mason University, Mercatus Center, Haziran, 2015, 15.
- Thubert, P. ve Watteyne, T. 2018. An Architecture for IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4. <https://tools.ietf.org/id/draft-ietf-6tisch-architecture-15.html>. 27 Kasım 2018
- Tjensvold, J. M. Comparison of the IEEE 802.11, 802.15. 1, 802.15. 4 and 802.15. 6 wireless standards. <https://pdfs.semanticscholar.org/fa11/f849c7a6c55ddda31070f04740a1d1a90186.pdf>. 14 Kasım 2018.
- Tschofenig, H., Arkko, J., Thaler, D. ve McPherson, D. 2015. Architectural Considerations in Smart Object Networking. <https://tools.ietf.org/html/rfc7452>. 6 Kasım 2018.
- Vilajosana, X., Watteyne, T. ve Q, W. 2018. 6top Protocol (6P). <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6tisch-6top-protocol-12>. 24 Kasım 2018.
- Watteyne, T., Mehta, A. ve Pister, K. Reliability through frequency diversity: why channel hopping makes sense. Proceedings of the 6th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks. ACM, 2009. p. 116-123.
- Watteyne, T., Palattella, M. ve Grieco, L. 2015. Using IEEE 802.15. 4e time-slotted channel hopping (TSCH) in the internet of things (IoT): Problem statement. <https://tools.ietf.org/html/rfc7554>. 26 Ekim 2018.
- Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P. ve Alexander, R. 2012. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks. <https://tools.ietf.org/html/rfc6550>. 27 Ekim 2018.
- Woon, W. T. ve Wan, T. C. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 Ad Hoc Wireless Sensor Networks: Simulation Approach. Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC'06. IEEE International Conference on. IEEE, 2006. p. 1443-1448.

Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H. ve Tipper, D. Wireless Communication in Smart Grid Home Area Networks: A Survey. IEEE communications surveys and tutorials, 2013, 15.1: 5-20.

http://mmlab.snu.ac.kr/links/nrl/seminar/data/%B1%C7%C5%C2%B0%E6_802.15.4_overview.pdf. 802.15.4 overview and its physical layer and Zigbee. 18 Kasım 2018.

<https://tr.wikipedia.org/wiki/ICMPv6>. ICMPv6. 22 Kasım 2018.

<https://www.irc-sphere.ac.uk/about>. The Challenge. 7 Kasım 2018.

<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html>. VNI Global Fixed and Mobile Internet Traffic Forecasts. 20 Ekim 2018.

<https://www.huawei.com/minisite/gci/en/index.html>. Global Connectivity Index. 20 Kasım 2018

<https://techdifferences.com/difference-between-pure-aloha-and-slotted-aloha.html>. Difference Between Pure ALOHA and Slotted ALOHA. 12 Kasım 2018.

https://en.wikipedia.org/wiki/Neighbor_Discovery_Protocol. Neighbor Discovery Protocol. 13 Kasım 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Miraç BEKTAŞ, 1991 Tonya/Trabzon doğumludur. 2010 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden 2015 senesinde mezun olmuştur. 2015 yılında Trabzon' da yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2014 yılında başladığı iş hayatında Turkcell Superonline ve Trabzonspor şirketlerinde çalışmıştır. 2018 Nisan ayında Doğru Bilgi Teknolojileri (Ankara) şirketinde çalışmaya başlamış ve halen burada iş hayatına devam etmektedir.