T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZİGBEE TEKNOLOJİSİNİN ARAŞTIRILMASI VE BİYOMEDİKAL İŞARETLERİN İLETİMİNE İLİŞKİN ÖRNEK BİR UYGULAMA

Aziz ERTEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Haziran-2019

T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Aziz Erten tarafından yapılan "ZigBee teknolojisinin araştırılması ve biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulama" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir

Jüri Üyesinin

Ünvanı	Adı Soyadı
Başkan:Prof. Dr	M.Siraç ÖZERDEM
Üye : Dr. Öğr. Üyesi	M.Ali ARSERİM
Üye : Dr. Öğr. Üyesi	Kerim KARADAĞ

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 09/07/2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../2019

Prof.Dr.Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek; gerek konu seçimi gerekse çalışmaların yürütülmesi ve tezin hazırlanması aşamalarında her türlü ilgi ve desteğini esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Siraç ÖZERDEM'e, teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR ..... **I**

İÇİNDEKİLER- ..... **II**

ÖZET ..... **V**

ABSTRACT ..... **VI**

ÇİZELGE LİSTESİ ..... **VII**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **VIII**

KISALTMALAR VE SİMGELER ..... **XI**

1. GİRİŞ **1**

1.1 Genel Bilgi 1

1.1 Haberleşme ve ZigBee Ağları Konusunda Genel Bilgi 1

1.2 Tezin Amacı 2

1.3 Tezin Yapısı 3

2. KAYNAK ÖZETLERİ **5**

2.1 ZigBee Tabanlı Kitaplar 5

2.2 ZigBee Tabanlı Doktora Tezleri 6

2.3 ZigBee Tabanlı Yüksek Lisans Tezleri 8

3. METERYAL VE METOT **17**

3.1 ZigBee Teknolojisi 17

3.1.1 Cihaz Tipleri ve Rolleri 22

3.1.2 ZigBee Ağ Topolojileri 23

3.2 ZigBee ve IEEE 802.15.4 İletişim Temelleri 25

3.2.1 Çarpışma Önleme ile Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (CSMA-CA) 25

3.2.2 İşaretçi (Beacon)-Etkin Ağlara Karşı İşaretçi Pasif Olan Ağlar 26

3.2.3 Veri Aktarım ve Doğrulama Metodları 26

3.2.4 Adresleme 28

3.3 ZigBee ve IEEE 802.15.4 Ağ Katman Fonksiyonları 29

3.3.1 Fiziksel Katmanı (PHY) 29

3.3.2 MAC Katmanı 30

3.3.3 ZigBee Protokolünün Ağ Katmanı (NWK) 33

3.3.4 Uygulama Katmanı (APL) 33

3.3.5 Güvenlik 33

3.3.6 ZigBee Ağ Geçidi 34

3.4 ZigBee / IEEE 802.15.4 Ağına İlişkin Uygulama Alanları 34

3.4.1 Ev Otomasyonu 35
3.4.2 Güvenlik Sistemleri 35
3.4.3 Sayaç Okuma Sistemleri 35
3.4.4 Sulama Sistemleri 35
3.4.5 Aydınlatma Kontrol Sistemleri 36
3.4.6 İklimlendirme Sistemleri 37
3.4.7 Uzaktan Kontrol 37
3.4.8 Personel/Nesne Takibi 38
3.4.9 Sürü Takip 39
3.4.10 Sağlık 41
3.4.11 Otellerde Oda Giriş Sistemi 40
3.4.12 Yangın Söndürme Sistemi 40
3.5 Batarya Boşalma Karakteristiği 40
3.5.1 Basit Bir Batarya Ömrü Hesaplama Yöntemi 42
3.5.2 Batarya Kapasitesini İzleme 44
3.5.3 Güç Tüketimini Azaltma Yöntemleri 44
3.5.4 Donanım Düzeyinde Dikkat Edilmesi Gerekenler 44
3.5.5 Ağ Operasyon Verimliliği 47
3.5.6 Enerji Odaklı Yönlendirme 49
3.5.6.1 Batarya Duyarlı Yönlendirme 50
3.5.6.2 KonumDuyarlı Yönlendirme 52
3.5.6.3 Yönlü Bir Anten Kullanarak Yönlendirme Verimini Artırma 53
3.5.7 Buck Dönüştürücüler (DC-DC Gerilim Azaltan Dönüştürücüler) 54
3.6 Yer Tahmini Yöntemleri 55
3.6.1 Alınan Sinyal Gücüne Dayalı Konumlandırma Algoritmaları 59
3.6.2 Trilatrasyon Kullanarak RSSI Tabanlı Konum Tahmini 60
3.6.3 RSSI ile Konum Tahmininde Hata Kaynakları 63
3.6.4 Konum Parmak İzine Dayalı Konum Tahmini 64
3.6.5 İşbirlikçi Yer Tahmini 70
3.6.6 Varış Açısı Bazlı Algoritmalar 71
3.6.7 Zamana Dayalı Algoritmalar (ToA ve TdoA) 72
3.6.8 Hesaplamalı Karmaşıklık 74
3.7 ZigBee ile Birlikteliği Olan Diğer Ağlar 74
3.7.1 ZigBee Performansında İşbirlikçi Olmayan Yaklaşım 77
3.7.2 CSMA /CA Kanal Erişimi 77

3.7.3 Çok Düşük Görev Döngüsü ... 77
3.7.4 Sinyal Yayılımı ... 77
3.7.5 Dinamik RF Çıkış Gücü Seçimi ... 77
3.7.6 Ağ İletişimi ve Konum Farkında Yönlendirme ... 78
3.7.7 Frekans Kanal Seçimi ... 79
3.7.8 Uyarlanabilir Paket Uzunluk Seçimi ... 79
3.7.9 IEEE 802.11b/g ile Birlikte Çalışma ... 79
3.7.10 Bluetooth ile Birlikte Çalışma ... 82
3.7.11 Mikrodalga Fırınlarla Birlikte Çalışma ... 83
3.7.12 Telsiz Telefonlarla Birlikte Çalışma ... 84
4. BULGULAR VE TARTIŞMA ... 87
4.1 XBee Modüller ... 87
4.2 Arduino ... 88
4.3 Kalp Hızı Nabız Sensörü ... 90
4.4 LM35 Sıcaklık Sensörü ... 91
4.5 Ekipmanların Fiziksel Bağlantıları ... 92
4.6 Ekipmanların Konfigürasyonu ... 95
4.6.1 Arduino Konfigürasyonu ... 96
4.6.2 XBee Konfigürasyonu ... 98
4.7 XCTU Menüleri ... 101
4.7.1 XCTU Çalışma Modları ... 102
4.7.2 XCTU Radyo Modüllerin Çalışma modları ... 103
4.7.3 XCTU Firmware Güncelleme ... 104
4.7.4 XCTU Radyo Kapsama Testi ... 105
4.7.5 XCTU Ağ Yapısını Görüntüleme ... 106
4.7.6 XCTU ile Konfigüre Edilebilen XBee Parametreleri ... 106
4.8 Tartışma ... 115
5. SONUÇ VE ÖNERİLER ... 117
6. KAYNAKLAR ... 119
ÖZGEÇMİŞ ... 121

ÖZET

ZİGBEE TEKNOLOJİSİNİN ARAŞTIRILMASI VE BİYOMEDİKAL İŞARETLERİN İLETİMİNE İLİŞKİN ÖRNEK BİR UYGULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aziz ERTEN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2019

Bu tez çalışmasında, kablosuz sensör ağlarında veri iletilimi kapsamında öncelikle tercih edilen ZigBee teknolojisi tanıtılmış ve ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. ZigBee teknolojisi konusunda Türkçe kaynak sıkıntısının olması bizi bu tez çalışmasının gerçeklenmesine motive etmiştir. Örnek uygulama olarak sıcaklık ve kalp hızı nabız sensörlerinden alınan biyomedikal işaretlerin ZigBee modüllerden oluşan bir kablosuz ağ üzerinden uzaktaki merkezi birime iletilmesi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında ZigBee teknolojisi hakkında kapsamlı bir inceleme yapılıp; ZigBee kavramının temelleri, ZigBee ağ yapısı, ZigBee protokolleri, ZigBee teknolojisinin uygulama alanları ve ZigBee tabanlı ağların mevcut diğer ağ teknolojileri ile karşılaştırılıp avantaj ve dezevantajları incelenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında örnek uygulamada kullanılan ZigBee modüller, biyomedikal sensörler ve diğer ekipmanlar tanıtılmıştır. ZigBee modül olarak Digi firması tarafından üretilen XBee 2mw Kablo Anten Seri2 (ZigBee Mash) modüller kullanıldı. Sıcaklık işareti için LM35 anolog sıcaklık sensörü, kalp hızı nabız işareti için ise Sparkfun firmasının ürettiği sensör kullanıldı. Bu iki sensörden elde edilen işaretler mikro işlemci tarafından işlenip, gönderici ZigBee modülü üzerinden ağ kordinatörü olarakta görev yapan uzaktaki alıcı ZigBee modülüne kablosuz olarak iletildi. Alıcı kordinaör ZigBee modülünden alınan işaretler konsol üzerinden ekrana yazdırıldı.

Çalışmanın son kısmında ZigBee modüller ile kablosuz ağ kurmanın kolaylığı ve esnekliğini göstermek üzere, modüllerin konfigre edilebilen tüm parametreleri incelenmiştir.

AnahtarKelimeler: ZigBee, Kordinatör, IEEE802.15.4, Nabız, Sıcaklık, Arduino, Kablosuz

ABSTRACT

RESEARCH ON ZIBGBEE TECHNOLOGY AND A SAMPLE APPLICATION ON TRANSMISSION OF BIOMEDICAL SIGNALS

MSc THESIS

Aziz ERTEN

DEPARTMENT OF ELEKTRICAL AND ELEKTRONIC
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2019

In this thesis, ZigBee technology which is used for data transmission in wireless sensor networks was introduced and a sample application about ZigBee based biomedical signals transmission was done. The lack of Turkish resources on ZigBee technology has motivated us to prepare this thesis. As an exemplary application, the transmission of biomedical signals from temperature and heart rate pulse sensors to a remote central unit over a ZigBee based wireless network was performed.

In the first part of the study, a comprehensive review of ZigBee technology was done. Fundamentals of ZigBee concept, ZigBee network structure, ZigBee protocols, application and ZigBee based networks were compared with other existing network technologies showing ZigBee advantages and disadvantages were examined. In the second part of the study, ZigBee modules, biomedical sensors and other equipments used in the sample application were introduced. The ZigBee modules used was XBee 2mw Cable Antenna Serial2 (ZigBee Mash) modules manufactured by Digi Company. The LM35 analogue temperature sensor was used for the temperature signal while the sensor manufactured by Sparkfun was used for the heart rate pulse signal. The signals from these two sensors were processed by the microprocessor and transmitted wirelessly to the remote receiver ZigBee module, which served as the network coordinator. Signs received from the receiver coordinator ZigBee module were printed on the screen via the console.

In the last part of the study, all configurable parameters of the modules are examined to show the ease and flexibility of wireless networking with ZigBee modules.

Key Words: ZigBee, Coordinator, IEEE 802.15.4, Heart Rate, Temperature

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1	IEEE 802.15.4 Veri Hızları ve Çalışma Ferekansları	21
Çizelge 3.2	Basitleştirilmiş Bir Kullanım Örneği Senaryosu	42
Çizelge 3.3	Basitleştirilmiş Çalışma Modları Örneği	45
Çizelge 4.1	XBee Modül PIN isim ve fonksiyonları	88
Çizelge 4.2	Arduino Uno Teknik Özellikleri	90

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 3.1.	ZigBee Standardının Bluetooth ve IEEE 802.11 İle Karşilaştırılması	18
Şekil 3.2.	Kısa mesafe kablosuz ağ sınıfları	19
Şekil 3.3.	ZigBee Kablosuz Ağın Protokol Katmanları	20
Şekil 3.4.	IEEE 802.15.4 ve ZigBee Standartlarında cihaz rolleri	22
Şekil 3.5.	Yıldız Ağ Topolojisi	23
Şekil 3.6.	Örgü Ağ Topolojisi	23
Şekil 3.7.	ZigBee Ağaç Topolojisi	24
Şekil 3.8.	IEEE 802.15.4 de Kordinatöre Veri Aktarımı : (a) İşaretçi Etkin (b) İşaretçi Pasif	27
Şekil 3.9.	Kordinatörden Cihaza Veri Aktarımı (a) İşaretçi Etkin ve (b) İşaretçi Pasif	27
Şekil 3.10.	ZigBee Paket Yapısı	30
Şekil 3.11.	MAC İşaretçi Çerçeve Yapısı	31
Şekil 3.12.	MAC Veri Çerçeve Yapısı	32
Şekil 3.13.	MAC Onay Çerçeve Yapısı	32
Şekil 3.14.	MAC Komut Çerçeve Yapısı	33
Şekil 3.15.	ZigBee Etkin Cihazların Kullanıldığı Alanlar	34
Şekil 3.16.	ZigBee Kablosuz Ağları ile Bina Aydınlatma Kontrolü	36
Şekil 3.17.	ZigBee Kontrollü Hava Perdeleri ile Çok Bölgeli İklimlendirme	37
Şekil 3.18.	ZigBee Ağlarında Ofis İçi Personel Takip	38
Şekil 3.19.	ZigBee Ağ ile Ev İçi Hasta Takip Sistemi	39
Şekil 3.20.	ZigBee Ağın Kullanılan Bir Cihazın Akım Profil Örneği	41
Şekil 3.21.	(a) Çizelge 6.1'de gösterilen Senaryo için Pil Ömrü. Pil 1000 mAH Nominal Kapasiteye, % 50 Batarya Verimliliğine ve Ayda% 1 Akü deşarjına sahiptir. (b) Farklı Faaliyetler İçin Bir Ay İçinde Kullanılan Toplam Kapasite	43
Şekil 3.22	Bir Düğüm, İşaretçi Beklenen Varış Zamanında Önce Etkin Bir Şekilde Uyanmalı	46
Şekil 3.23.	Artık Enerji Duyarlı Yönlendirme	50
Şekil 3.24.	(a) Batarya Arızası Nedeniyle Bölünmüş Bir Ağ ve (b) Bir Örnek Göreceli Olarak Tekdüzen Enerji Tüketiminin bir Ağ	51
Şekil 3.25.	Hedefe Doğru İlerleme	52
Şekil 3.26.	Yönlü Bir Anten- Ağın Bazı Bölgelerinde Gereksiz Girişimi Azaltabilir	54

Şekil 3.27. (a) Örnekte açıklanan Buck Dönüştürücü İşleminin Temel Kavramı Anahtarlama Yoluyla 3V Beslemenin 2V Değerine Dönüştürüldüğü Örnek ve Ortalamasının. (b) Pilden Alınan Anlık ve Ortalama Akım 55
Şekil 3.28. (a) Merkezi (b) Bölünmüş ve (c) Dağıtılmış Konum Tahmini İşleme 58
Şekil 3.29. Trilatrasyon Kullanarak Konum Tahmini (a) İdeal Durum ve (b) Aralık Tahmin Hatası ile 61
Şekil 3.30. Parmak İzine Dayalı Konum Tahmini. Sabit Düğümler Çevrimdışı Eğitim Sırasında Vericiler 65
Şekil 3.31. k-En Yakın Komşu (KNN) Metodunda K Artışının Etkisi 67
Şekil 3.32. Parmak İzine Dayalı Konum Tahmininde Alternatif Bir Yaklaşım.Çevrimdışı Eğitim Sırasında Sabit Düğümler Alıcı Olarak Çalışıyor 69
Şekil 3.33. (a) Temel Trilatrasyon Yöntemi ve (b) Kooperatif Yer Tahmini 70
Şekil 3.34. Varış Açısı (AoA) ile Konum Tahmini 72
Şekil 3.35. (a) ToA Kullanarak Mesafeyi Tahmin Etme ve (b) TDoA'ya Göre d Belirleme 73
Şekil 3.36. **(**a) IEEE 802.15.4 Kanallar, (b) IEEE802.11b / g Örtüşmeyen Kanallar Kuzey Amerika'da ve (c) Avrupa'da IEEE802.11b / g Örtüşmeyen Kanallar 81
Şekil 3.37. İşbirlikçi TDMA Yöntemi Geliştirmek İçin Kullanılabilir ZigBee ve WLAN Birlikteliği 82
Şekil 3.38. (a) IEEE 802.15.4 Kanallar ve (b) Bluetooth Kanalları 83
Şekil 4.1. Delikli (TH) ve Yüzeye Montaj (SMT) XBee modülü 87
Şekil 4.2. XBee Modül Pin Yapısı 88
Şekil 4.3. Arduino Uno 90
Şekil 4.4. Kalp Hız Nabız Sensörü 91
Şekil 4.5. LM35 Sıcaklık Sensörü 92
Şekil 4.6. LM35 Sıcaklık Sensörü Arduino Bağlantısı Diagramı 92
Şekil 4.7. Nabız Sensörü Arduino Bağlantı Diagramı 93
Şekil 4.8. Nabız Sensörünün Ölçüm İçin Parmağa Takılması 93
Şekil 4.9. Arduino XBee Bağlantısı 94
Şekil 4.10. İletim Tarafının Devre Elemanlarının Bağlatısı 95
Şekil 4.11. Xbee Modülün Xbee Explorer ile bilgisayara bağlanması 95
Şekil 4.12. Arduino IDE 96
Şekil 4.13. XBee Modüllerin XCTU Programına Eklenmesi 98
Şekil 4.14. XBee Modülün Çalışma Mod ve Rollerinin Yüklenmesi 99
Şekil 4.15. PANID ve JV Channnel Verification Parametrelerinin Ayarlanması 100

Şekil 4.16. Sıcaklık ve Nabız Bilgisinin Arduino Seri Porttan Görüntülenmesi 100
Şekil 4.17. Kondinatör XBee Tarafından Alıcı Uç İşaretlerin Alınması 101
Şekil 4.18. XCTU Çalışma Modları 102
Şekil 4.19. XCTU Konfigrasyon Çalışma Modu 102
Şekil 4.20. XCTU Konsol Çalışma Modu 103
Şekil 4.21. XCTU Ağ Çalışma Modu 103
Şekil 4.22. API Çerçece yapısı 104
Şekil 4.23. XBee Modüllerin Firmware Güncellenmesi 105
Şekil 4.24 XBee Modüllerin Radyo Kapsama Testi 105
Şekil 4.25 XBee Ağ Elemanlarının Tablo Görüntüsü 106
Şekil 4.26. XBee Modüllerin Ağ ile İlgili Tanımlanabilen Parametreleri 106
Şekil 4.27. Xbee Modüllerin Adresleme ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler 108
Şekil 4.28. XBee Modüllerin RF Arayüz ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler 109
Şekil 4.29. XBee Modüllerin Güvenlik ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler 110
Şekil 4.30. XBee Modüllerin Seri Arayüz ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler 111
Şekil 4.31. XBee Modüllerin Uyku Modu ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler 112
Şekil 4.32. XBee Modüllerin Giriş/Çıkış ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler 113
Şekil 4.33. XBee Modüllerin Giriş/Çıkış Örnekleme ile İlgili Tanımlanabilen Paramatreler 114

KISALTMALAR VE SİMGELER

AIB	:Application Support Layer Information Base
AES	:Advanced Encryption Standard
AF	:Application Framework
APDU	:Application Support Sublayer Protocol Data Unit
APL	:Application Layer
APS	:Application Support Sublayer
APSDE	:Application Support Sublayer Data Entity
APSDE-SAP	:APSDE-Service Access Point
APSME	:Application Support Sublayer Management Entity
APSME-SAP	:APSME-Service Access Point
ASDU	:APS Service Data Unit
ASK	:Amplitude Shift Keying
AWGN	:Additive White Gaussian Noise
BPSK	:Binary Phase-Shift Keying
BRT	:Broadcast Retry Timer
BSN	:Beacon Sequence Number
BTR	:Broadcast Transaction Record
BTT	:Broadcast Transaction Table
CAP	:Contention Access Period
CBC-MAC	:Cipher Block Chaining Message Authentication Code
CCA	:Clear Channel Assessment
CCM	:Counter with CBC-MAC
CCM*	:CCM (extended version)
CFP	:Contention-Free Period
CRC	:Cyclic Redundancy Check
CSMA-CA	:Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DSN	:Data Sequence Number
DSSS	:Direct Sequence Spread Spectrum
ED	:Energy Detection
EIRP	:Effective Isotropic Radiated Power
ERP	:Effective Radiated Power
EVM	:Error Vector Magnitude

FCS	:Frame Check Sequence
FFD	:Full-Function Device
FH	:Frequency Hopping
FHSS	:Frequency Hopping Spread Spectrum
GTS	:Guaranteed Time Slot
HDR	:Header
IB	:Information Base
IFS	:Interframe Spacing
ISM	:Industrial, Scientific, and Medical
LIFS	:Long Interframe Spacing
LQI	:Link Quality Indicator
LR-WPAN	:Low-Rate Wireless Personal Area Network
LSB	:Least Significant Bit
MAC	:Medium Access Control
MCPS	:MAC Common Part Sublayer
MCPS-SAP	:MAC Common Part Sublayer Service Access Point
MFR	:MAC Footer
MHR	:MAC Header
MIC	:Message Integrity Code
MLME	:MAC Layer Management Entity
MLME-SAP	:MAC Layer Management Entity Service Access Point
MSB	:Most Significant Bit
MPDU	:MAC Protocol Data Unit
MSDU	:MAC Service Data Unit
NF	:Noise Figure
NHLE	:Next Higher Layer Entity
NIB	:Network Layer Information Base
NLDE	:Network Layer Data Entity
NLDE-SAP	:Network Layer Data Entity Service Access Point
NLME	:Network Layer Management Entity
NLME-SAP	:Network Layer Management Entity Service Access Point
NPDU	:Network Layer Protocol Data Unit
NSDU	:Network Service Data Unit
NWK	:Network Layer

OCDM	:Orthogonal Code Division Multiplexing
O-QPSK	:Offset Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	:Open Systems Interconnection
PAN	:Personal Area Network
PC	:Personal Computer
PD	:PHY Data
PD-SAP	:PHY Data Service Access Point
PER	:Packet Error Rate
PHR	:PHY Header
PHY	:Physical Layer
PIB	:PAN Information Base
PLME	:Physical Layer Management Entity
PLME-SAP	:Physical Layer Management Entity Service Access Point
PN	:Pseudorandom Noise
POS	:Personal Operating Space
PPDU	:PHY Protocol Data Unit
PSD	:Power Spectral Density
PSDU	:PHY Service Data Unit
PSSS	:Parallel Sequence Spread Spectrum
QOS	:Quality of Service
RF	:Radio Frequency
RFD	:Reduced Function Device
RREP	:Route Reply
RREQ	:Route Request
RX	:Receiver
SAP	:Service Access Point
SFD	:Start-of-Frame Delimiter
SHR	:Synchronization Header
SIFS	:Short Interframe Spacing
SIR	:Signal-to-Interference Ratio
SNR	:Signal-to-Noise Ratio
SKKE	:Symmetric-Key Key Establishment
SSP	:Security Services Provider
TRX	:Transceiver

TX	:Transmitter
WLAN	:Wireless Local Area Network

1.GİRİŞ

1.1 Genel Bilgi

Bu tezin amacı günümüz akıllı sistemlerinde kablosuz veri iletilimi kapsamında öncelikle tercih edilen ZigBee teknolojisinin araştırılması ve ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulamanın gerçeklenmesidir. ZigBee teknolojisi konusunda Türkçe kaynak sıkıntısının olması bizi bu tez çalışmasının gerçeklenmesine motive etmiştir.

ZigBee IEEE 802.15.4 altyapısında ve sarmal (mesh) ağlar ile uygulama profilleri kullanılarak kurulan kısa mesafe kablosuz ağ standardı olarak tanımlanır. Özellikle uyku moduna geçerek enerji tasarrufu sağlaması, birçok ağın bir arada konfigüre edilebilmesi ve düşük maliyetli olması ZigBee'nin kablosuz sistemlerin kurulumunda tercih edilmesine sebeptir. Bu konuların detayları elektronik ve bilişim sektöründe çalışan mühendis ve akademisyenlerin ilgi alanına girmesi nedeniyle tez çalışmasının kapsamı konunun detayını içermektedir.

1.1 Haberleşme ve ZigBee Ağları Konusunda Genel Bilgi

Haberleşme ve haberleşme ağları günümüz modern teknolojisinin günlük hayatımıza en fazla dokunan unsurlarından biridir. Haberleşme ağlarından kastedilen insanlar arası iletişimi de içine alan her türlü bilgisayar, makina ve kullandığımız araç gereçlerin birbirleri ile olan iletişimi ve bu iletişimi sağlayan ağ yapılarıdır. Teknolojinin gelişimi neticesinde haberleşme ağlarında kullanılan ekipmanlar da her yönüyle (maliyet, boyut ve etkinlik) ileri düzeyde geliştirilmiştir. Bu gelişim doğal olarak sağlık, tarım, endüstri gibi çok farklı alanlara yansıdığı görülebilmektedir. Haberleşme ağlarının içerik ve sayıları arttıkça IEEE gibi otoriteler ihtiyaç duyulan fonksiyonlara göre ağları belirli sınıflara göre tanımlayıp standartları oluşturmuştur. Temelde ağlar kablolu ve kablosuz olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Günümüz modern dünyasında kablosuz ağlar tartışmasız bir şekilde daha fazla uygulama alanı bulmaktadır.

Bu tez çalışmasına konu olan ZigBee ağları IEEE 802.15.4 standart temelli kablosuz kısa meafe, düşük hızlı veri iletişimi sağlayan bir takım iletişim protokollerinden oluşan standartlardan oluşmuştur (Anonim 2008). ZigBee adını arıların çiçekler arasında gidip gelirken yapmış olduğu zig-zaglı karmaşık hareketten alır. Bu zig-zaglı yapı haberleşme ağındaki düğümler arası iletişimi sembolize eder. ZigBee'yi oluşturan ZigBee Alliance adlı kuruluş 2002 yılında Philips, Motorola, Intel gibi küresel teknoloji firmalarının oluşturduğu bir birliktir. ZigBee tabanlı kablosuz cihazlar 868MHz, 915MHz ve 2.4GHz frekanslarında çalışır. Ulaşılabilecek en yüksek veri hızı saniyede 250 Kbits dir. ZigBee genel olarak düşük hız, düşük maliyet, uzun batarya ömrü özelliklerini esas

alan batarya tabanlı uygulamaları hedefler. Pek çok uygulamada ZigBee ekipmanların aktiviteleri çok kısıtlıdır. Ekipmanlar genellikle uyku modu diye de bilinen düşük güç tüketimi modunda çalışır. Bundan dolayı ZigBee ekipmanları yıllarca batarya değişikliğine ihtiyaç duymadan çalışma yeteneğine sahiptir.

ZigBee tabanlı çok farklı uygulamaların gerçeklendiği görülebilmekte ve bu uygulamaların başında ev içi hasta takip uygulaması gelmektedir. Tez konusu aynı zamanda biyomedikal işaretlerin kablosuz iletilmesi olduğundan, hasta takip ağının çalışma adımları şu şekilde özetlenebilir: hastanın kan basıncı, nabzı gibi biyolojik parametler sensörler yardımı ile ölçülüp, hastanın üzerinde taşıyacağı ZigBee ekipmalarına iletilir. ZigBee ekipmaları da sensörlerden aldıkları bu bilgileri periyodik olarak sunucu görevi gören cihaz veya bilgisayara kablosuz olarak iletir. Sunucu ise gelen bilgileri derler ve ihtiyaç durumunda hasta veya hemşireye gerekli talimat veya bilgilendirmede bulunulur (Dagtas ve ark 2007). ZigBee ağların fiber ağlar karşısındaki avantajları; düşük maliyet, düşük güç tüketimi, düşük veri hızları, yüksek güvenlik, karmaşık ağ yapılarını destekleme, üretici bağımsızlığı, hızlı ve kolay kurulum alarak sayılabilir.

1.2 Tezin Amacı

Tezin genel anlamda amacı günümüz akıllı sensör sistemlerinde kablosuz veri iletilimi kapsamında öncelikle tercih edilen ZigBee teknolojisinin araştırılması ve ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulamanın gerçeklenmesidir. Bu çalışmanın amaçlarını maddeler halinde ifade edecek olursak:

i. ZigBee tabanlı ağlar hakkında Türkçe kaynak yok denecek kadar az olduğundan dolayı bu konuda ki boşluğu doldurmak
ii. ZigBee tabanlı ağların yapısını detaylı olarak incelemek
iii. ZigBee tabanlı ağların kullanmış olduğu batarya tüketim, yer tahmini gibi mekanizmaları incelemek
iv. ZigBee tabanlı esnek ağ yapısının kurulumunu araştırmak
v. ZigBee tabanlı ağların kullanım alanlarının geniş ölçekte kullanılabilirliliğini göstermek ve temel bir uygulama gerçeklemektir.

Bu tez çalışmasını diğer akademik çalışmalardan farklı kılan özellikler tüm protokollerin detaylarına bu tez çalımasında yer verilmesidir. Farklı senaryolar çerçevesinde yapılabilecek uygulamaların konfigürasyon detayları bu tez kapsamında açıklanmıştır.

1.3 Tezin Yapısı

Tez konusunun ZigBee tabanlı olmasının nedeni; ZigBee tabanlı ağlar hakkında Türkçe kaynak yok denecek kadar az olmasıdır. Türkçe kaynak boşluğunu doldurmak üzere Shahin Farahani tarafından yazılan ve 2008 yılında Elsevier tarafından basılan "ZigBee Wireless Networks and Transceivers" başlıklı kitabın ilgili bölümleri, bu tezin kapsamına dahil edilmiştir. Böylelikle bu tez, ZigBee tabanlı sistemler hakkında en geniş kapsamlı Türkçe kaynak olma özelliğini taşıdığı değerlendirilebilir. Bu tez, Giriş, Kaynak Özetleri, Materyal ve Metot, Bulgular ve Tartışma, Sonuç ve Öneriler ve Kaynaklar olmak üzere altı bölümden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde haberleşme ağlarının günümüz modern dünyasındaki önemi ve vazgeçilmezliği ile kendisine pek çok alanda hayat bulmuş ZigBee ağlar hakkında temel bilgiler yanında, tezin amacı ve yapısı hakkında bilgiler verilmiştir.

Kaynak özetleri bölümünde ZigBee tabanlı ağlar hakkında yabancı dilde yazılmış temel kitaplar ile ZigBee teknolojisi hakkında yazılan Türkçe doktora ve yüksek lisans tezleri tanıtıldı.

Meteryal ve metod bölümünde ZigBee teknolojisi hakkında Türkçe kaynak eser olarak başvurulacak bir eser olması düşüncesi ile ZigBee teknolojisi detaylı bir şekilde incelendi.

Bulgular ve tartışma bölümünde ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulama gerlekleştirilmiştir. Uygulamanın nasıl gerçekleştirildiğini göstermek amacı ile öncelikle uygulamada kullanılan sıcaklık ve nabız sensörleri, ZigBee modülleri, Arduino ile konfigrasyon araçları tanıltılmıştır. Ardından bu uygulama ekipmanlarının fiziksel bağlantılarının yapılması ve konfigrasyon aşamaları gösterilmiştir. Son olarak sensör ve ZigBee modüllerden oluşan uygulama çalıştırılıp, sıcaklık ve nabız işaretlerinin sensörler vasıtası ile alınıp, ZigBee tabanlı ağlar üzerinden iletilmesi sürecinde tüm aşamalar gösterilip kayıt altına alınmıştır. Bu bölümde örnek uygulamaya ilave olarak, konu hakkında çalışacak araştırmacılara yardımcı olmak amacı ile ZigBee modüllerin konfigüre edilebilen tüm parametreleri uygulamalı olarak açıklanmıştır.

Sonuç ve öneriler kısmında ZigBee tabanlı ağ üzerinden biyolojik işaretlerin başarılı bir şekilde, kablosuz olarak uzak uçtaki bir birime gönderilebildiği gösterilip, ZigBee tabanlı ağlar hakkındaki önerilerimiz paylaşılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tezin amacı günümüz akıllı sistemlerinde kablosuz veri iletilimi kapsamında öncelikle tercih edilen ZigBee teknolojisinin araştırılması ve ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulamanın gerçeklenmesidir. Dolayısıyla, literatürde ZigBee teknolojisi hakkında yer alan temel kaynaklar ve çalışmalar, bu bölümde özetlenmiştir. Bu tezin hazırlanmasında en büyük motivasyon kaynağı, ZigBee teknolojisi hakkında Türkçe yazılmış bir kaynak kitabın olmamasıdır. Dolayısıyla literatürde yer alan kitaplar, yüksek lisans ve doktora tezleri, bu çalışma kapsamında alt başlıklar altında incelenmiştir.

2.1 ZigBee Tabanlı Kitaplar

ZigBee Kablosuz Ağ İletişimi (ZigBee Wireless Networking) adlı kitap Drew Gislason (2008) tarafından yazılmış ve kitapta ZigBee ağlarının nasıl çalıştığına ilişkin temel bilgiler ile birlikte ayrıntılı kod örnekleri verilmiştir.

ZigBee Kablosuz Sensör ve Kontrol Ağı (ZigBee Wireless Sensor and Control Network) adlı kitap, Adam Gschwender (2009) tarafından yazılmış ve kapsamında ZigBee mimarisi ile birlikte temel uygulamalara yer verilmiştir. Kitabın ilgili bölümlerinde, yönlendirmeden güvenliğe kadar uzanan sorunları kapsayan tüm ZigBee protokol yığını açıklanmıştır. Ayrıca, ev otomasyonu, akıllı enerji ağı ve tüketici elektroniği uygulamalarında, ZigBee modüllerine ilişkin özelliklerin detayları çalışmada sunulmuştur.

Uygulamalı ZigBee (Hands-On ZigBee) adlı kitap Fred Eady (2010) tarafından yazılmıştır. Kitap kapsamında; ZigBee protokolünün, WiFi/Bluetooth teknolojilerine alternatif olduğu ve daha verimli bir WPAN (Kablosuz Kişisel Alan Ağı) sağlayabildiğine yer verilmektedir. Ayrıca kitaptaki en önemli farklılığın, yapılan uygulamaların tüm detayları ile birlikte anlatılmış olmasıdır.

ZigBee, XBee, Arduino ve İşleme ile Kablosuz Sensör Ağları Oluşturma (Building Wireless Sensor Networks: with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing) adlı kitap Robert Faludi (2010) tarafından yazılmıştır. Kitap kapsamında; ZigBee kablosuz ağ protokolü Series 2 XBee modülleri kullanılarak dağıtılmış sensör sistemlerine ve akıllı etkileşimli cihazların bulunduğu uygulamalara yer almıştır. Kitaptaki uygulamalarda, uzaktan algılama ile ilişkili bir dizi faydalı projenin nasıl geliştirilebileceği anlatılmıştır.

ZigBee Kablosuz Ağlar ve Alıcı Vericiler (ZigBee Wireless Networks and Transceivers)

adlı kitap Shahin Farahani (2011) tarafından yazılmıştır. Kitapta; ZigBee protokolü, ZigBee donanımının tasarımı ve ZigBee ağlarının nasıl tasarlanacağı anlatılmıştır.

Tennina S. ve ark. (2013) tarafından yazılan diğer bir önemli kitap, IEEE 802.15.4 ve ZigBee Teknolojilerinin Servis Kalitesi Koşulları ile Düşük Güçlü Kablosuz Sistemler için Sağladıkları (IEEE 802.15.4 and ZigBee as Enabling Technologies for Low-Power Wireless Systems with Quality-of-Service Constraints). Kitapta, IEEE 802.15.4 ve ZigBee'nin özellikleri, Servis Kalitesi (QoS), Kablosuz Sensör Ağı (WSN) sistemleri ve uygulamaları yapılandırmak için izlenecek yollar yer almıştır. İlk bölümlerde iki protokolün birbirine benzer özellikleri ile bu özelliklerin arasındaki boşluklara değinilmiş, birçok modern açık kaynaklı uygulama, model ve araçlara yer verilmiştir. Kitapta ayrıca, IEEE 802.15.4 ZigBee ağlarının temel performans limitlerine, gecikme/enerji dengelemelerin optimize edilmesine, sürdürülebilir analitik, simülasyon ve deneysel modellere yer verilmiştir.

WiFi ve ZigBee Ağlarında İşaret Etkileşimi (Signal Interference in WiFi and ZigBee Networks) adlı kitap Gaotao Shi ve Keqiu Li (2016) tarafından yazılmıştır. Kitapta, WiFi ve ZigBee'nin temelleri farklı düzeylerde sistematik olarak özetlenmiş ve bu iki kablosuz veri iletim teknolojisi arasındaki işaret etkileşimi, ayrıntılı olarak teorik ve deneysel sonuçları verilmiştir. Aynı ISM frekans bandını paylaşan WiFi ve ZigBee teknolojilerinde işaret etkileşimi önemli bir sorundur ve çok çeşitli literatürde ele alınmaktadır. Bu kitapta da son araştırma sonuçları tartışılmıştır.

ZigBee Standartını geliştiren, 2002 yılında ticari olmayan bir organizasyon olarak kurulan ZigBee Alliance adlı kuruluşun resmi internet sitesi (https://www.zigbee.org/), ZigBee standardı ve uygulamaları hakkında en geniş bilgi kaynağı olarak görülmektedir.

2.2 ZigBee Tabanlı Doktora Tezleri

Türkiye Üniversitelerinde doğrudan ZigBee teknolojisi konulu tek doktora tezinin Aykaç M. (2018) tarafından "A modified particle filter algorithm and its implementation on a wireless ZigBee network based navigation system" başlıklı çalışma olduğu görülmüştür. Çalışmada, navigasyon sistem tabanlı ZigBee kablosuz ağda parçacık filtre algoritmasının başarıyla uygulanabilirliliği anlatılmaktadır.

Dolaylı olarak doktora tezlerine ZigBee teknolojisini dahil eden doktora çalışmalarının olduğu görülebilmektedir. Bu tezlerin içerikleri aşağıda sunulmuştur.

Çukurova Üniversitesinde, Timur O. (2018) tarafından çalışılan "Akıllı binalarda enerji izleme, analiz ve yönetimi için kablosuz algılayıcılı ağ uygulaması tasarımı ve gerçekleştirilmesi" başlıklı tez çalışmasında, ZigBee kablosuz haberleşme protokolü kullanılarak akıllı bir yönetim sistemi geliştirilmiştir. Bu akıllı yönetim sisteminde kullanılan mikrodenetleyici kartları programlamak için, özel bir algoritma geliştirilerek kodlarda standartlaşmaya gidilmiştir.

Florida International Üniversitesinde, Tonyalı S. (2018) tarafından yapılan "IEEE 802.11s tabanlı akıllı şebeke gelişmiş ölçüm altyapısı için gizlilik koruma protokolleri" başlıklı doktora tezinde, enerji şebekelerde kullanılan akıllı sayaçların ZigBee tabanlı kontrol sistemi geliştirilmiştir.

Anadolu Üniversitesinde, Daragma R.S.M. (2016) tarafından yapılan "Optimal enerji verimliliğinde sensör ağ tasarımı" başlıklı doktora tezinde, kablosuz sensör ağların yaşam sürelerini uzatmak için bazı enerji tasarruf teknikleri önerilmiştir. Bu çalışmada kablosuz sensör ağların yaşam ömürlerini analiz etmek ve önerilen tekniklerin etkisini gözlemelemek amacı ile CC2450 yongalı düşük enerjili bluetooth düğümü, AP2 alıcı-verici modülüne sahip ANT ve Texas Instrument'ın ZigBee modüllerini içeren IEEE 802.15.4 ağı oluşturulmuştur.

Bilkent Üniversitesinde, Tekkalmaz M. (2013) tarafından yapılan "Kablosuz algılayıcı ağlar için güç kaynağı bilinçli devingen yol atama" başlıklı doktora tezinde, kablosuz ağlarda batarya ömrünü uzatmak amacı ile veri paketinin katettiği toplam yolu uzatmadan mümkün mertebe şebeke gerilimi ile beslenen ağ düğümlerinden geçiren yeni bir algoritma tanımlanmıştır.

Süleyman Demirel Üniversitesinde, Oğuz S. (2013) tarafından yapılan "Enerji sistemlerinin kablosuz ağlar ile gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve kontrolü" başlıklı doktora tezinde, bir yaşam alanının konfor düzeyinin hesaplanması amacı ile ortamın sıcaklık, ortalama ışınım sıcaklığı, hava hızı ve nem gibi çevresel faktörler ZigBee tabanlı bir ağ yardımı ile elde edilmiştir. Elde edilen veriler merkezi bir bilgisayarda toplanıp, değerlendirilmesi gerçeklenmiştir.

Bilkent Üniversitesinde, Uluçınar A.R. (2013) tarafından yapılan "Çok-radyolu çok-kanallı kablosuz örgüsel ağlarda girişimin incelenmesi ve azaltılması" başlıklı doktora tezinde, kablosuz örgü ağların oluşan enterferansı azaltacak iki yöntem üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda kanal-içi etkileşimi ve komşu kanal etkileşimini anlamak ve modellemek için, çok-radyolu 802.11b/g örgüsel yönelticilerden oluşan, BilMesh ismi verilen bina içi test ortamı

oluşturulup, üzerinde deneyler ve gözlemler yapılmıştır. Ayrıca, çok-radyolu örgüsel yönelticiler kullanmanın ve böylelikle çoklu atlamalı bir akışın ardışık atlamalarını farklı kanallardan geçirmenin ağ ve uygulama katmanı metrikleri üzerindeki etkilerini incelenmıştır.

Süleyman Demirel Üniversitesinde, Oral O. (2013) tarafından yapılan "Çok eksenli işleme merkezleri için akıllı takım sisteminin tasarımı ve kontrolü" başlıklı doktora tezinde, talaşlı imalat sırasında maksimum takım ömrü, kısa üretim zamanı ve az maliyetle, iyi kalitede yüksek üretim gibi hedeflere ulaşmak amacı ile hata tespit ve tahmini yapan bir sistem önerilmiştir. Frezeleme anında oluşan mekanik titreşimlerin takım içerisine yerleştirilmiş olan mikroelektro-mekanik sistem (MEMS) ivme sensöleri ile algılanıp, eş zamanlı izlenmesi ve ZigBee tabanlı veri iletim modülleri ile uzaktaki bir bilgisayara iletilmesi temeline dayalı bir sistem oluşturulmuştur.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Kahveci S. (2006) tarafından yapılan "Dar-alan kablosuz sabit haberleşme sistemlerinin başarım analizleri ve turbo kodlayıcıların sistem başarımına etkisi" başlıklı doktora tezinde, kablosuz haberleşme ağları ve bu ağların çalışmasında enerji sarfiyatını iyileştirecek unsurlar çalışılmıştır. Bu amaçla kısa mesafe kablosuz haberleşme ağlarından Bluetooth, IrDA, ZigBee gibi temel teknolojiler ele alınarak bu teknolojilerde enerji sarfiyatı ve bağlantı güvenliği konularında yapılacak iyileştirmeler çalışılmıştır.

2.3 Yüksek Lisans Tezleri

Türkiye Üniversitelerinde ZigBee içerikli yapılan yüksek lisans tezleri incelendiğinde, farklı tasarımlar ile farklı sorunlara çözümler bulunduğu görülmüştür. Söz konusu yüksek lisans tezlerine ilişkin kısa açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Güner A. (2004) tarafından yapılan "Çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistemlerin ve zigbee 2450 MHz DSSS fiziksel katmanının rayleigh kanalda başarım analiz" başlıklı yüksek lisans tezinde, dar bantlı MIMO sistemlerde kullanılan anten sayıları değiştirilerek Rayleigh ve Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsünün (AWGN) kanaldaki performansı incelenmiştir.

Orta Doğu Teknik Üniversitesinde, Kaynar K. (2009) tarafından yapılan "Developing a ZigBee wireless network and controlling it through the internet (ZigBee kablosuz ağ protokolünü kullanan kablosuz bilgisayar ağı geliştirmek ve bu ağı internet üzerinden kontrol etmek)" başlıklı yüksek lisans tezinde, elemanları ZigBee kablosuz ağ protokolüyle haberleşen bir bilgisayar

ağının geliştirilmesi ve bu ağın bir kişisel bilgisayar ile İnternet üzerinden kontrol edilme uygulması gerçekleştirilmiştir.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Somay A. (2009) tarafından yapılan "Bir kablosuz ölçüm sisteminin IEEW 802.15.4 ZigBee standardı kullanılarak gerçekleştirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, sayısal radyo sistemleri ile kablosuz okunan, taşınabilir ve batarya ile çalışan bir ölçüm cihazınının yapılması çalışılmıştır.

Gazi Üniversitesinde, Şen M. (2010) tarafından yapılan "Asenkron motor büyüklüklerinin ZigBee haberleşme protokolü kullanılarak izlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablolu iletişimin maliyetli veya olanaksız olduğu endüstriyel sahalarda veri iletimini güvenli ortam ve düşük maliyet ile sağlamak amacıyla bir asenkron motora ait uzaktan kontrol ve izleme sisteminin ZigBee haberleşme protokolü kullanılarak nasıl gerçekleştirildiği incelenmiştir.

Hacettepe Üniversitesinde, Güney M. (2010) tarafından yapılan "ZigBee tabanlı ev otomasyon sistemi" başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee tabanlı ev otomasyon sistemleri incelenmiştir.

İstanbul Üniversitesinde, Yüksel E. (2010) tarafından yapılan "Uzaktan ölçüm için ZigBee mimarisi kullanan sistem tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee sistemi ve uygulamaları incelenmiş, uzaktan ölçüm (telemetri) teknikleri ile elektrik, doğalgaz ve benzeri sayaçların okunmasına yönelik literatür taraması yapılmıştır.

Selçuk Üniversitesinde, Başçiftçi N. (2011) tarafından yapılan "ZigBee tabanlı mobil sağlık izleme sistem tasarımı ve uygulaması" başlıklı yüksek lisans tezinde, biyoelektrik işaretlerden olan EKG işaretlerinin kablosuz olarak bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan bir sistem tasarlanıp gerçekleştirilmiştir.

Hacettepe Üniversitesinde, Kızılırmak E. Y. (2012) tarafından yapılan" ZigBee ile endüstriyel vinç kontrolü" başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee teknolojisi kullanılarak bir LR-WPAN oluşturulması ve bu ağ üzerinden bir endüstriyel vincin kablosuz kontrol edilme uygulaması incelenmiştir.

Boğaziçi Üniversitesinde, İleri F. (2013) tarafından hazırlanan" RSSI based position estimation in ZigBee sensor networks (ZigBee algılayıcı ağlarında AİŞG tabanlı konum algılama)

“ başlıklı yüksek lisans tezinde, mesafe ve konum tahmin algoritmaları üzerine literatür taraması yapılıp, değişken alıcı verici arası mesafelerinde yol kaybı verileri toplamak üzere ZigBee tabanlı bir AİŞG (Alınan İşaretin Şiddet Göstergesi) ölçüm sistemi tasarlanmıştır.

Yıldız Teknik Üniversitesinde, İnce A. T. (2015) tarafından hazırlanan “Design and development of ZigBee radio embedded applications in smart grid (Akıllı şebekeler için ZigBee radyo entegre edilen uygulamaların tasarımı ve geliştirilmesi)” başlıklı yüksek lisans tezinde, bina enerji yönetim sistemi ve bu sistemde kullanılan haberleşme alt-birimlerinın tasarım ve üretilmesi incelenmiştir.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Koç Y. (2015) tarafından hazırlanan “ZigBee algılayıcı ağlarında topolojiye bağlı başarım değerlendirmeleri“ başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee tabanlı kablosuz algılayıcı ağlarının üç farklı senaryo altındaki performansları, karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, ZigBee algılayıcı ağlarının planlanmasına ve geliştirilmesine yönelik bazı öneriler ortaya konmuştur.

Karabük Üniversitesinde, Karaoğlu O. (2015) tarafından hazırlanan “Maden ocaklarında ZigBee tabanlı veri haberleşme uygulaması ve sonuçların bilgisayar ortamında işlenmesi“ başlıklı yüksek lisans tezinde, dinamik çalışma koşullarına sahip maden ocaklarında iş kazalarının ve can kayıplarının önüne geçilmek amacı ile ZigBee teknolojisi kullanılarak bir prototip olma özelliği taşıyan kablosuz haberleşme ağı kurulması konusu incelenmiştir.

Selçuk Üniversitesinde, Bakır H. (2016) tarafından hazırlanan “Fotovoltaik sistem entegreli akıllı şebeke için ZigBee aygıtları ile enerji kontrolü ve izlemenin gerçekleştirilmesi” başlıklı yüksek lisans tezinde, akıllı şebekeler için, sistemde pik talebi azaltmak, elektrik tüketimini daha verimli ve daha akıllı hale getirerek enerji tasarrufu elde etmek amacı ile şebeke bağlantılı fotovoltaik (FV) güç sisteminde gerçekleştirilen arduino kontrollü bir enerji yönetimi sağlayan örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Süleyman Demirel Üniversitesinde, Saadi S. S. J. (2016) tarafından hazırlanan “Design and implement a remote control robot controlled by ZigBee wireless network(ZigBee kontrollü bir robot tasarımı uygulaması)“ başlıklı yüksek lisans tezinde, sahadan anlık veri aktarımı yapan bir robot ile ZigBee protokolu üzerinden haberleşen bir kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Süleyman Demirel Üniversitesinde, Alabdi H. A. A. (2017) tarafından hazırlanan “ZigBee tabanlı enerji izleme ve bilgilendirme sistemi” başlıklı yüksek lisans tezinde, elektrik

enerjisi tüketiminin izlenmesi, kontrol edilmesi, elektrik enerjisi tüketim miktarının ölçülerek fiyatlandırılması ve bu fiyatlandırmanın tüketiciye iletilmesi amacıyla kablosuz bir sistem tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Akdeniz Üniversitesinde, Çelik G. (2018) tarafından hazırlanan ”Veri dağıtım sistemi tasarımı ve ZigBee tabanlı uygulaması” başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee tabanlı ağ ile ölçümler yapılarak uçuş süresi (ToA-Time of Arrival) ve alınan işaret gücü göstergesi (RSSI-Received Signal Strength Indicator) yöntemleri hakkında literatür taraması yapılıp, dağıtım tekniklerini konusunda konumlandırma yöntemi önerilerinde bulunulmuştur.

İstanbul Teknik Üniversitesinde, Futacı T. (2005) tarafından hazırlanan "Araç uzaktan erişim" başlıklı yüksek lisans tezinde, uzaktan araç erişim sistemleri hakkında literatür taraması yapılıp örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Ege Üniversitesinde, Kartal B. (2006) tarafından hazırlanan "Medikal kablosuz sensör ağı için platform oluşturulması ve çoklu gönderim algoritması geliştirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, Zigbee teknolojisi literatürdeki bir çoklu gönderim algoritması ile bütünleştirilerek, ZigBee teknolojisinin medikal alana uygulanabilirliğine katkı sağlayacak bir platform oluşturma çalışması gerçeklestirilmiştir.

Yıldız Teknik Üniversitesinde, İsak S. (2007) tarafından hazırlanan "IEEE 802.15.4 standardına uyumlu RF haberleşme uygulaması" başlıklı yüksek lisans tezinde, IEEE 802.15.4 standardı kapsamlı biçimde incelenmiş ve standarda uygun yapıda haberleşen telsiz ağı kurulumu gerçekleştirilmiştir.

Beykent Üniversitesinde, Yamaç E. (2007) tarafından hazırlanan "IEEE 802.15.4 LR-WPAN standardı ile oluşturulan uygulamalar, güvenlik durumları ve olası güvenlik açıkları için bazı çözüm önerileri" başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee teknolojisininde üyesi olduğu IEEE 802.15.4 (LR-WPAN) Düsük Hız-Kablosuz Kisisel Alan Ağları ve ağ güvenliği konularında literatür taraması yapılmıştır.

Erciyes Üniversitesinde, Yesbek S. (2008) tarafından hazırlanan "Kablosuz algılayıcı ağlarında UWB tekniği kullanılarak enerji tasarrufu sağlanması" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz algılayıcı ağlarda kullanılan ultra geniş bant UWB (Ultra Wide Band) tekniğinin ZigBee teknolojisi ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Kocaeli Üniversitesinde, Biçer M. (2008) tarafından hazırlanan "Kablosuz algılayıcının modül tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinde, hasta üzerinde sürekli olarak taşınabilen kablosuz bir algılayıcı modül aracılığı ile hastanın kan basıncı parametreleri elde ederek kablosuz olarak bir merkeze aktaran bir uygulama tasarlanıp gerçekleştirilmiştir.

İstanbul Teknik Üniversitesinde, Koçkan C. (2008) tarafından hazırlanan "Taşıtlar arası haberleşme" başlıklı yüksek lisans tezinde kablosuz ağ teknolojileri üzerine literatür taraması yapılıp, akıllı taşıt sistemleri için en uygun ağ mimarisi üzerinde inceleme yapılmıştır.

İstanbul Teknik Üniversitesinde, Bulan M. (2009) tarafından hazırlanan "Navigating mobile robots in wireless sensor networks" başlıklı yüksek lisans tezinde, gezgin ve kablosuz haberleşme kabiliyetine sahip robotların bir IEEE standardı olan ZigBee haberleşme sistemi üzerine kurulu kablosuz algılayıcı ağda dolanımı modellenmiştir.

Ege Üniversitesinde, Çetin H. (2009) tarafından hazırlanan "Kablosuz sensör ağlarının micaz tabanlı biyomedikal uygulaması" başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee tabanlı kablosuz sensör ağları kullanan örnek bir biyomedikal uygulama gerçekleştirilmiştir.

Dokuz Eylül Üniversitesinde, Mutlu L. (2011) tarafından hazırlanan "Indoor navigation control of a mobile autonomous vehicle" başlıklı yüksek lisans tezinde, çift teker tahrikli otonom bir robot aracın ZigBee kablosuz haberleşme protokolü kullanılarak kontrolü ve yönlendirilmesi için yeni bir yöntem sunulmuştur.

Maltepe Üniversitesinde, Geren Ö. (2010) tarafından hazırlanan "Mobil sensör cihazları kullanılarak ısı ve nem değerlerinin ölçümü ve değerlendirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz sensör ağları ile mobil sensör cihazları kullanılarak ısı ve nem değerleri ölçüm ve değerlendirme uygulamasının tasarlanması ve gerçekleştirilmesi incelenmiştir.

Muğla Üniversitesinde, Türker G. (2011) tarafından hazırlanan "Kalp atışının sezilmesi ve alınan sinyalin kablosuz algılayıcı ağlar ile iletimi" başlıklı yüksek lisans tezinde, hastaların anlık veya sürekli olarak takibini gerektiren durumlarda, hareket sınırlılığı olmadan kalp sinyallerini izlemek için, giyilebilir bir elektrokardiyogram (EKG) devresinin tasarlanması ve EKG işaretlerin ZigBee tabanlı bir ağ ile uzak mesafedeki kontrol merkezine iletilme uygulaması yapılmıştır.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Zihni H. (2011) tarafından hazırlanan "TCP/IP ile kablosuz algılayıcı ağlarına erişim" başlıklı yüksek lisans tezinde, batarya ile beslenen ve analog veriyi sayısal veriye dönüştüren birimin elde ettiği bilgiyi kablosuz olarak aktaran ve TCP/IP vasıtası ile görüntüleyen bir sistemi gerçekleştirilmesi uygulaması incelenmiştir.

Pamukkale Üniversitesinde, Seçkin A. (2011) tarafından hazırlanan "Kablosuz sensör ağlarının IP tabanlı ağlarla birleştirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz sensör ağı düğümleriyle IP-tabanlı ağlar arasında haberleşme tesis edilerek internete girilebilen her noktadan sensör ağı düğümlerine ulaşılabilecek bir uygulama tasarımı ve gerçekleştirilmesi incelenmiştir.

İstanbul Teknik Üniversitesinde, Taraktaş K. (2010) tarafından hazırlanan "RSSI based localization in sensor network" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz sensör ağlarından mobil cihazların konum bilgilerini alma algoritmaları üzerine literatür taraması ve laboratuvar testleri yapılımıştır.

Bahçeşehir Üniversitesinde, Bilgin B. (2011) tarafından hazırlanan "Adaptive wireless sensor network protocols for smart grid applications" başlıklı yüksek lisans tezinde, bir iç ana enerji kontrol odası, bir dış 500 kv trafo merkezi ortamı ve bir yer altı ağ iletişim ortamı gibi farklı akıllı şebeke ortamları için kablosuz iletişimlerin güvenilirliğindeki zorlukları çözmek için değiştirilebilir FEC mekanizmaları geliştirilip, ZigBee performansının test edilmesi çalışması gerçekleştirilmiştir.

.

Yıldız Teknik Üniversitesinde, Yılmaz O. (2010) tarafından hazırlanan "Kablosuz teknolojilerle kapalı alanda konum belirleme" başlıklı yüksek lisans tezinde, mevcut durumda

konum belirleme amcıyla kullanılan ancak maliyeti yüksek ve gürültülü ortamlarda problem potansiyeli olan ultrasonik çözümlerin, hassasiyeti düşük ve güç tüketimi yüksek 802.11 çözümlerinin, kurulumu zahmetli ve maliyeti yüksek olan RFID ve UWB çözümlerinin dışında, farklı teknolojileri kullanarak bir konum belirleme sistemi geliştirilmiştir.

Selçuk Üniversitesinde, Yalçınlı F. (2013) tarafından hazırlanan "Algılama ve özellik çıkartma tabanlı manyetik araç sensörü tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinde, zemine yerleştirilen, hareketli iletken cisimler manyetik alanın değerini değiştirir prensibine dayanan manyetik entegreler temelli, akıllı manyetik araç sensör tasarlanması ve örnek bir uygulamada kullanılması incelenmiştir.

Çankaya Üniversitesinde, Algoiare O. (2014) tarafından hazırlanan "Design and implementation of intelligent home using GSM network" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz sensör ağlar ile çalışan akıllı evler ile ilgili literatür taraması yapılıp, GSM şebekesi kullanılarak akıllı bir ev sistemi tasarımı uygulamalı olarak gerçeklenmiştir.

İstanbul Teknik Üniversitesinde, Özvural G. (2015) tarafından hazırlanan "System design for internet of things and network coding applications in the wireless personal area networks" başlıklı yüksek lisans tezinde, ev ve ofis ortamlarında ısıtma, soğutma ve güvenlik çözümleri için bant verimli, düşük güç tüketimli, kablosuz pilli çözümlerin altyapıda kullanıldığı otomasyon sistemi incelmesi ve tasarımı yapılmıştır.

Yıldız Teknik Üniversitesinde, Yazar M. (2015) tarafından hazırlanan "Kablosuz sensör ağları ile yangın uyarı sistemi" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz sensör ağları ile orman yangınlarının tespitini amaçlayan erken uyarı sisteminin tasarlanıp kurulumunun yapılması gerçekleştirilmiştir.

Yıldız Teknik Üniversitesinde, Sevil M. (2015) tarafından hazırlanan "Akıllı binalar için özgün kablosuz sensör ağları tasarımı ile gerçek zamanlı enerji izleme ve kontrolü" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz sensör ağlar ile çalışan akıllı ev uygulamarı için örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Yıldız Teknik Üniversitesinde, Kıral G. (2014) tarafından hazırlanan "Akıllı şebekelerde enerji yönetimi için akıllı priz geliştirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, ZigBee, PLC (power line communication), kablosuz M-bus ve Wi-Fi kablosuz harberleşme altyapısına sahip, uzaktan erişilip kontrol edilen bir prizin tasarımı ve gerçekleştirilmesi aşamaları incelenmiştir.

Sabancı Üniversitesinde, Akçapınar K. (2015) tarafından hazırlanan "On the throughput of in-band full-duplex communication in wireless systems" başlıklı yüksek lisans tezinde, kapsamlı olarak yapılmış deneyler aracılığı ile, tek atlamalı iki yönlü haberleşme, iki atlamalı tek yönlü haberleşme ve iki atlamalı iki yönlü haberleşme gibi temel iletişim senaryoları üzerinden, aynı bant tam-çift yönlü ve yarı-çift yönlü iletişimin, aynı bant tam-çift yönlü iletişimin yarı-çift yönlü iletişimin performansını geçtiği şartları açıkça belirterek, performans kıyaslaması incelenmiştir.

Sakarya Üniversitesinde, Arı S. (2016) tarafından hazırlanan "Görme engelliler için yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılarak giyilebilir mesafe ölçer tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinde, görme engellilerin hayatlarını kolaylaştıracak, kaliteli gezinme ortamı sağlayacak kablosuz vücut alan ağı ile görme engelli bireylerin önlerinde bulunan engellerin tespit edilerek titreşim ve ses olarak uyarı yapılmasını sağlayacak bir uygulama tasarnalıp gerçekleştirilmiştir.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Erdal H. (2016) tarafından hazırlanan "IEEE 802.15.6 standardı kablosuz vücut alan ağı haberleşmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, özellikle tıbbi cihazlar için tasarlanan IEEE 802.15.6 standardını kullanan "Kablosuz Vücut Alan Ağı" (Wireless Body Area Network, WBAN) haberleşme protokolünün fiziksel katmanının çeşitli algoritmalar kullanılarak iyileştirilmesi bu amaçla yeni bir kod yayma algoritması incelenmiştir.

Trakya Üniversitesinde, Vatansever A. (2017) tarafından hazırlanan "Ses ile kontrol edilen paletli gezgin robot tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinde, kullanıcı tarafından belirli sesli komutların ZigBee tabanlı bir kablosuz ağ ile iletilerek, paletli gezgin bir robotun kontrolünün yapılması gerçekleştirilmiştir.

Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Özderya H. (2017) tarafından hazırlanan "Uzaktan hasta takip sistemi için IEEE 802.15.6 esaslı kablosuz vücut alan ağı haberleşmesinin gerçekleştirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, uzaktan hasta takip sistemlerinde kullanılmak üzere, kablo eşdeğeri güvenilirlik sunacak, kesintisiz aktarım için optimize edilmiş bir kablosuz haberleşme sistemi geliştirilmesi incelenmiştir.

Gaziantep Üniversitesinde, Hussein M. (2017) tarafından hazırlanan "Design and implementation of a remote monitoring system using mini computer" başlıklı yüksek lisans tezinde, sıcaklık, nem, akım ve voltaj gibi bazı fiziksel niceliklerin gözetimi için mini bilgisayar kullanarak bir kablosuz izleme sisteminin tasarlanıp uygulanması gerçekleştirilmiştir.

İstanbul Aydın Üniversitesinde, Hivehchi H. (2016) tarafından hazırlanan "Kablosuz haberleşme için anten tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezinde, kablosuz sensör ağları ve antenler üzerine literatür taraması yapılmıştır.

Erciyes Üniversitesinde, Azzawi M (2017) tarafından hazırlanan "Design and implementation of a wireless sensor node for real time monitoring applications" başlıklı yüksek lisans tezinde, bir laboratuvarda sıcaklık, mesafe, ışık ve hareketi gözlemlemek için bir kablosuz sensör ağ tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Yaşar Üniversitesinde, Gemalmaz A. (2017) tarafından hazırlanan "Construction of self organizing and updating wireless sensor networks using energy efficient microprocessors" başlıklı yüksek lisans tezinde, kendini yapılandırabilen algoritmalar kullanarak, mümkün olduğunca az enerji tüketerek, sensör ağlarının kapsama alanını arttıracak bir protokol tasarlanmıştır.

Gaziantep Üniversitesinde, Adhami A. (2017) tarafından hazırlanan "Smart energy management for residential buildings based on wireless embedded system" başlıklı yüksek lisans tezinde, ev içi elektrik tüketimini azaltmak için ZigBee tabanlı akıllı bir elektrik prizi tasarlama uygulaması gerçekleştirilmiştir.

İstanbul Aydın Üniversitesinde, Yüksel Z. (2018) tarafından hazırlanan "Akıllı ev sistemlerinde güncel teknolojilerin incelenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinde, akıllı ev uygulamarında kullanılan ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth, EnOcean ve GSM gibi farklı kablosuz iletişim teknolojileri incelenip birbirleri ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Kocaeli Üniversitesinde, Akkurt M. (2019) tarafından hazırlanan "Nesnelerin interneti uygulamalarının cupcarbon ile benzetimi: Akıllı şehir örnekleri" başlıklı yüksek lisans tezinde, akıllı şehir uygulamalarına uygun farklı haberleşme teknolojilerinden olan ZigBee, Wi-Fi ve LoRa seçilerek CupCarbon simülatöründe ayrı ayrı ve kombine şeklinde modellenmiş, elde edilen sonuçlar doğrultusunda da performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında bizim önelikli amacımız günümüz akıllı sensör ağlarında kablosuz veri iletilimi kapsamında tercih edilen ZigBee teknolojisi hakkında detaylı bir Türkçe kaynak oluşturarak bu teknolojinin araştırılmasını sağlamaktır. Diğer bir amacımız ise ZigBee teknolojisi ile uygulama yapmanın esnekliği ve kolaylığını göstermek amacı ile ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulamanın gerçeklenmesidir. Dolayısıyla, literatürde var olan çalışmalara benzer bir çalışmanın tez kapsamında gerçeklendiği şeklinde değerlendirilebilir.

3. METERYAL VE METOT

Bu tezin amacı, günümüz akıllı sensör ağ yapılarında kablosuz veri iletilimi kapsamında öncelikle tercih edilen ZigBee teknolojisinin araştırılması ve ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulamanın gerçeklenmesidir. ZigBee teknolojisini içeren Türkçe kaynakların yetersiz olması nedeniyle, tezin bu bölümünde ZigBee teknolojisi hakkında detaylı bilgilendirme yapılacaktır.

3.1 ZigBee Teknolojisi

ZigBee kablosuz kısa mesafe ve düşük hızlı veri iletişimi sağlayan, bir takım iletişim protokollerinden oluşan standarda verilen isimdir (Anonim 2008). ZigBee tabanlı kablosuz cihazlar 868MHz, 915MHz ve 2.4GHz frekanslarında çalışır. Ulaşılabilecek en yüksek veri hızı saniyede 250Kbits dir. ZigBee genel olarak düşük hız, düşük maliyet, uzun batarya ömrü özelliklerini esas alan batarya ile çalışan uygulamaları hedefler. Pek çok uygulamada ZigBee ekipmanların aktiviteleri çok kısıtlıdır. Ekipmanlar genellikle uyku modu diye de bilinen düşük güç tüketimi modunda çalışır. Bundan dolayı ZigBee ekipmanları yıllarca batarya değişikliğine ihtiyaç duymadan çalışma yeteneğine sahiptir

ZigBee standartının en önemli özelliklerinden biri örgü (mesh) ağ kabiliyetidir. Büyük bir örgü ağda, uzak bir hedefe ulaşana kadar mesaj bir cihazdan diğerine iletilir. Benzer şekilde, geniş bir alana dağılan bal arıları kovana bir mesaj iletmek istediklerinde, benzer yaklaşımla mesajlarını iletirler. Mesaj iletmek isteyen arı, Zik zak şeklinde hareket ederek bir dans figürü oluşturur ve bu figür kovana ulaşıncaya kadar kovana yakın diğer arılar tarafından tekrar edilir. Ağdaki cihazların birbirleri ile olan iletişimi, arıların iletişimine benzemesi nedeniyle, söz konusu teknoloji ZigBee olarak tanımlanmıştır (Adams 2006).

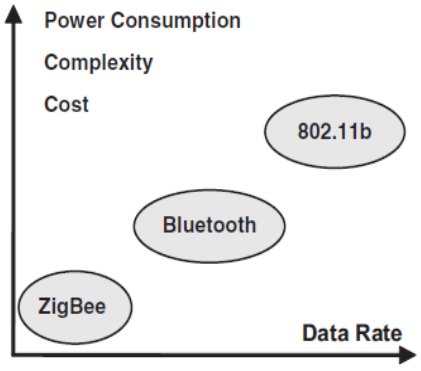
ZigBee standartları, ZigBee Alliance (Anonim 2019) adlı kuruluş tarafından geliştirilmiştir. 2002 yılında herkesin katılımına açık ve ticari olmayan bir organinizasyon olarak kurulan ZigBee Alliance, yüzlerce üye şirketi kapsamında barındırmaktadır. Bu üye şirketlerin temelde yarı iletken teknolojisi üreten, yazılım geliştiren ve ekipman üreten firmalar olduğu görülmektedir.

ZigBee standardı, IEEE 802.15.4 protokolunun PHY (Fiziksel Katman) ve MAC (Medium Access Control) protokollerine dayanmaktadır (IEEE 2006). Bundan dolayı ZigBee, IEEE 802.15.4 standart uyumlu ekipmanlar ile ilave bir katmana ihtiyaç olmadan iletişime geçebilir. Kısa mesafe bilgilerin alınıp, kablosuz olarak bir kontrol merkezine iletim konsepti,

yeni bir konsept değildir. Bu konsepte uygun dizayn edilmiş IEEE 802.11 Kablosuz yerel alan ağları ve Bluetooth gibi kısa mesafe kablosuz ağ standarları mevcuttur. Her standardın avantajlı olduğu uygulamalar bulunmaktadır. Ancak ZigBee özellikle düşük maliyetli, düşük veri hızlı, düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda avantajlı olmakta ve tercih edilebilmektedir.

ZigBee standardı, Bluetooth veya IEEE 802.1 WLAN ile karşılaştırıldığında, ZigBee'nin diğer standartlar ile olan farklılığı daha açık görülebilmektedir. Bu konu daha sonraki alt başlıklarda detaylı olarak incelenecektir. Şekil 3.1'de bu üç standartın temel karakteristikleri özetlenmiştir.

IEEE 802.11, standartlar topluluğunu temsil eder. Karşılaştırmada ZigBee ve Bluetooth gibi IEEE 802.11b ekipmanlar 2.4 GHz'de çalıştığından dolayı, bu protokoller temsilen seçilmiştir. IEEE 802.11b, yüksek veri hızına (11 Mbps değerine kadar) sahip bir kablosuz ağ standartıdır. İç mekanlarda kapsama mesafesi 30-100 metre arasında değişmekte iken, Bluetooth 2-10 metre arasında değişir ve düşük veri hızlarına sahiptirler. ZigBee bu iki standarta göre en düşük veri hızına sahip olmasına karşın, belirgin bir şekilde en uzun batarya ömrüne sahiptir. ZigBee çok düşük veri hızlarına sahip olmasından dolayı, internet bağlantısı ve kablosuz kulaklık gibi uygulamalarda kendisine yer bulamazken, uzun batarya ömründen dolayı ısı, nem, biomedikal sensörlerinden veri ve temel komutların alınıp gönderilmesi gibi uygulamalar kendisine etkili bir yer bulmuştur.



	Data Rate	Typical Range	Application Examples
ZigBee	20 to 250 Kbps	10–100 m	Wireless Sensor Networks
Bluetooth	1 to 3 Mbps	2–10 m	Wireless Headset Wireless Mouse
IEEE 802.11b	1 to 11 Mbps	30–100 m	Wireless Internet Connection

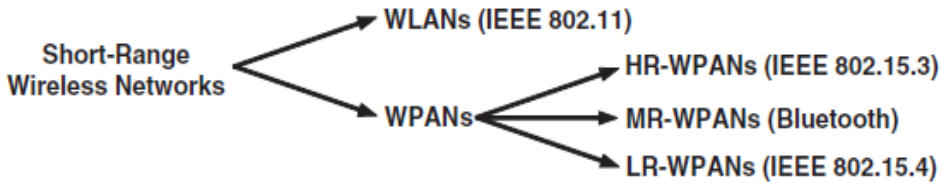
Şekil 3.1. ZigBee Standardının Bluetooth ve IEE 802.11b İle Karşılaştırılması

Kısa mesafe kablosuz ağlar ağ metodolojilerine göre iki ana guruba ayrılırlar:

1- Kablosuz yerel alan ağları (Wireless local area networks, WLAN)
2- Kablosuz kişisel alan ağları (Wireless personal area networks, WPAN)

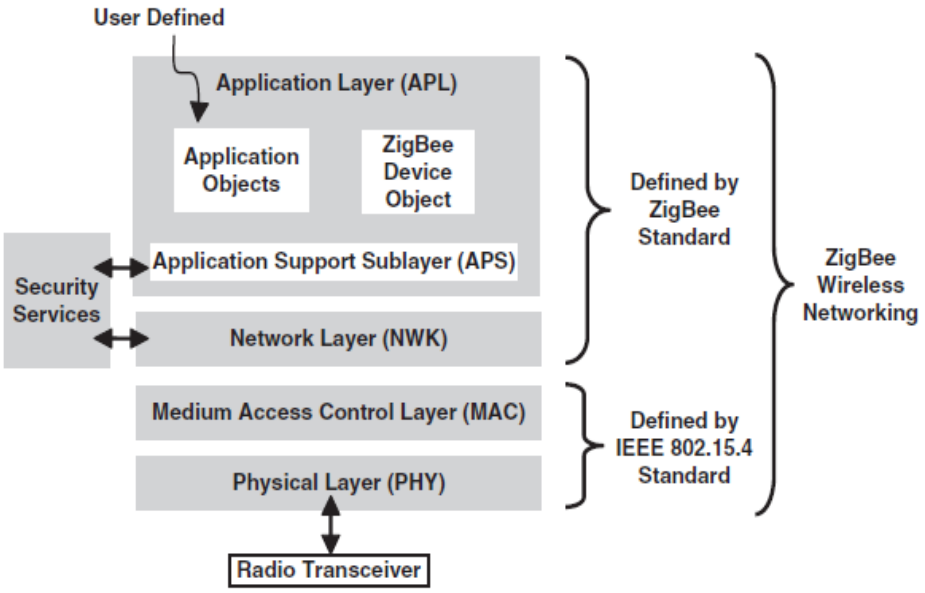
WLAN, Ethernet (IEEE 802.3) gibi geleneksel kablolu yerel ağ standardı yerine gelen yeni ve daha gelişmiş bir ağ mimarisidir. WLAN ekipmanları, kablolu LAN ekipmanları ile entegre çalışırlar. Ekipmanlar birbirlerine bağlandıktan sonra sistem tüm ekipmanlara kablosuz ekipman gibi davranır (IEEE 2005). WLAN ağların amacı, veri hızları ve kapsama mesafelerini en üst düzeye taşımaktır. WLAN ağlarının aksine WPAN ağları herhangi bir eski ağ mimarisinin yerine gelmiş yeni bir mimari değildir. WPAN ağları, güç tüketim odaklı herhangi bir ağ alt yapısı gerektirmeyen, kişisel iletişim amaçlı bir ağ mimarisidir. WPAN ağları, kendi içlerinde üç sınıfa (Şekil 3.2) ayrılır (Gutierrez 2007):

1- Yüksek hızlı WPAN (HR-High Rate WPAN)
2- Orta hızlı WPAN (MR-Medium Rate WPAN)
3- Düşük hızlı WPAN (LR-Low Rate WPAN)



Şekil 3.2. Kısa mesafe kablosuz ağ sınıfları

Yüksek hızlı WPAN ağlara örnek olarak, hızları 11-55 Mbps aralığında değişen 802.15.3 ağları verilebilir (IEEE 2003). Yüksek hızlardan dolayı gerçek zamanlı kablosuz video, TV iletimi gibi uygulamalar için WPAN ağları kullanılır. 1-3 Mbps hız aralığı ile kablosuz ses iletimi için kullanılan Bluetooth mimarisi, orta hızlı ağlar için bir örnek teşkil eder. Maksimum 250 Kbps veri hız ile ZigBee düşük hızlı ağlara örnek olarak gösterilebilir. Bir ağda iletişim tesis etmenin kabul gören ortak konsepti, Ağ katmanları ile modelleme yaklaşımıdır. Bu yaklaşıma göre her katman ağda belirli fonksiyonlardan sorumludur. Her katman işlediği veriyi ve komutları bir üst veya alt katmana doğrudan iletebilir. Diğer bir deyişle hiç bir katman bir üst ve alt katman dışındaki katmanlar ile doğrudan haberleşemez. ZigBee kablosuz ağ protokol katmaları Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. ZigBee Kablosuz Ağın Protokol Katmanları

ZigBee protokol katmanları, Açık Sistem Arabağlantısı (Open System Interconnect, OSI) adı verilen temel referans modeli üzerine inşa edilmiştir (ISO/IEC 1994). Ağ protokollerini katmanlara bölme yaklaşımı, çeşitli avantajlar sağlamıştır. Bu avantajlardan biri; zaman içinde protokollerde değişiklik olması durumunda sadece ilgili katmanın güncellenmesinin yeterli olmasıdır. Diğer bir avantaj; katman yapısının olmaması, tüm protokolün değişmesi veya güncellenmesi anlamına gelmesidir. Farklı bir avantaj; yeni bir uygulama geliştirme aşamasında alt katmanlar uygulamadan bağımsız olduğundan dolayı, üçüncü parti firmaların ürünleri kullanılabilmesidir. Bundan dolayı uygulama geliştiricileri, sadece uygulama ile ilgili katmanlar üzerinde çalışıp gerekli uygulamaları geliştirmektedir. Şekil 3.3'de görülen en alt iki katman, IEEE 802 Standartlar Komitesinin tanımladığı ve 2003 yılında yayınladığı katmanlardır (IEEE 2005). PHY ve MAC katmanları, diğer üst katmanlar ile etkileşimden bağımsız bir şekilde IEEE 802.15.4 tarafından tanımlanmıştır. ZigBee standartı bu iki katmana dair herhangi bir düzenleme yapmadan, Ağ, Uygulama ve Güvenlik protokol katmanlarını yeniden tanımlayıp, IEEE 802.15.4 tarafından tanımlanan PHY ve MAC katmanlarını ZigBee Ağ protokollerine adapte etmiştir. Bundan dolayı ZigBee standarlarına uyumlu tüm cihazlar aynı zamanda IEEE 802.15.4 standartlarına uyumludur.

Eylül 2006'da yayınlanan IEEE 802.15.4 standarlarında üç çalışnma frekans bandı tanımlanmıştır:

1. 868–868.6 MHz (868 MHz bant)
2. 902–928 MHz (915 MHz bant)
3. 2400–2483.5 MHz (2.4 GHz bant)

868 MHz bandı, Avrupa da kısa mesafe kablosuz ağlar ile bir takım uygulamalar için kullanılmaktadır (Anonim 2017).

Diğer iki bant (915 MHz ve 2.4 GHz) ise (ISM, Industrial Scientific and Medical) Endüstriyel Bilimsel ve Tıbbi bandın bir parçası olarak uygulamada kullanılmaktadır. 915 MHz frekansı genelde Kuzey Amerika da kullanılırken, 2.4 GHz dünya genelinde kullanılmaktadır Çizelge 3.1 de bu frekansların IEEE 802.15.4 standartlarında kullanımına dair detaylar verilmiştir. IEEE 802.15.4 standartına göre bir ekipman 868 Mhz bandını destekliyor ise 915 MHz bandınıda desteklemek zorundadır. Tersi de doğru olduğundan bu iki band (868/915 MHz) her zaman bir çift olarak tanımlanır. ZigBee'nin geniş bir uygulma yelpazesi mevcut olduğundan dolayı, pek çok üretici ZigBee tabanlı çözümler üretebilmektedir. ZigBee tabanlı ürünlerin üretici firmadan bağımsız olarak birbirleri ile uyumlu çalışması bu noktada önem arzeder. Başka bir deyişle üretilen cihazlar birlikte çalışılabilir olmalıdır. Birlikte çalışılabilirlik, ZigBee tabanlı cihazlar ve uygulamalar için önemli bir avantajdır.

Çizelge 3.1. IEEE 802.15.4 Veri Hızları ve Çalışma Ferekansları

	Frequency (MHz)	Number of Channels	Modulation	Chip Rate (Kchip/s)	Bit Rate (Kb/s)	Symbol Rate (Ksymbol/s)	Spreading Method
	868–868.6	1	BPSK	300	20	20	Binary DSSS
	902–928	10	BPSK	600	40	40	Binary DSSS
Optional	868–868.6	1	ASK	400	250	12.5	20-bit PSSS
	902–928	10	ASK	1600	250	50	5-bit PSSS
Optional	868–868.6	1	O-QPSK	400	100	25	16-array orthogonal
	902–928	10	O-QPSK	1000	250	62.5	16-array orthogonal
	2400–2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62.5	16-array orthogonal

3.1.1 Cihaz Tipleri ve Rolleri

IEEE 802.15.4 kablosuz ağlarda bulunan cihazlar, fonksiyonlarına göre iki gruba ayrılır:

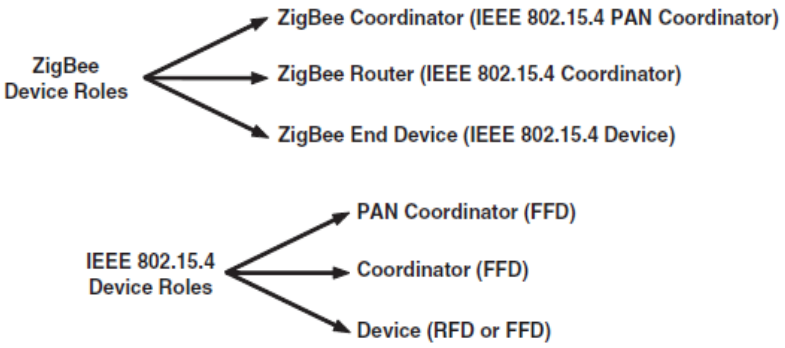
1. Tam fonksiyonlu cihazlar (Full-Function Devices, FDD)
2. Düşük fonksiyonlu cihazlar (Reduced-Function Devices, RFD)

FDD cihazlar, IEEE 802.15.4 standartında tanımlı tüm rol ve görevleri yerine getirme yeteneğine sahip iken, RFD cihazlar sınırlı rol ve görevlerde bulunabilirler. Örneğin FDD yapsındaki cihaz ağdaki tüm cihazlar ile iletşim kurabilirken, RFD cihazlar ise yalnızca FDD cihazlar ile iletişim kurabilmektedir. RFD cihazlar açma kapama anahtarı gibi basit roller yüklenir İşlemci güçleri ve hafıza kapasiteleri FDD cihazlarda daha düşüktür.

IEEE 802.15.4 ağlarında bulunan cihazlar; Koordinatör, PAN koordinatör ve cihaz olmak üzere üç farkı rol üstlenebilirler. Koordinatör rolüne sahip cihazlar, mesaj alıp-verme yeteneğine sahiptir. Eğer koordinatör cihaz, PAN'daki (Personal Area Network –Kişisel Alan Ağı) ana kontrol edici ise PAN koordinatör olarak adlandırılır. Ekipman krodinator rolünde değil ise cihaz olarak adlandırılır. ZigBee standartında cihaz rolleri benzemekle beraber bazı farklılıklar bulunmaktadır (Şekil 3.4).

1. Zigbee Koordinatör, IEEE 802.15.4 PAN Koordinatöre eşdeğerdir.
2. ZigBee Yönlendirici IEEE 802.15.4 Koordinatöre eşdegerdir.
3. ZigBee Cihaz Koordinatör veya Yönlendirici olmayan cihazlar.

ZigBee cihazları en düşük hafıza, işlemci kapasitesi ve özelliğe sahip ekipmanlardır. Doğal olarak ağdaki en ucuz ekipmanlardır.



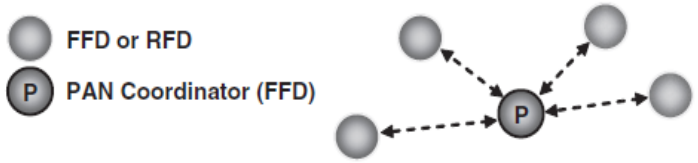
Şekil 3.4. IEEE 802.15.4 ve ZigBee Standartlarında cihaz rolleri

3.1.2 ZigBee Ağ Topolojileri

Ağ fonksiyonu ve yapısı ZigBee ağ katmanı tarafından yönetilir. IEEE 802.15.4 standartında iki farklı ağ topolojisi tanımlanabilir:

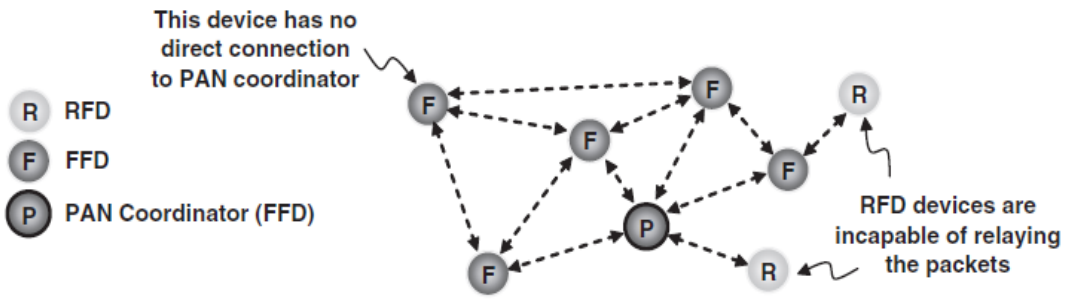
1. Yıldız Ağ Topolojisi (Star),
2. Eşler Arası Ağ Topolojisi (Peer to Peer).

Yıldız topolojisinde (Şekil 3.5), ağdaki her cihaz sadece bir PAN koordinatör ile iletişim kurabilir. Tipik bir yıldız ağ yapısında FDD bir cihaz PAN koordinatör olarak proglamlanıp etrafındaki diğer cihazlar ile iletişime geçirilip ağ tesis edilir. PAN koordinatörün yapacağı ilk şey, kapsama alanındaki tüm cihazları kontrol edip, hiç biri tarafından kullanılmayan kendine has bir PAN kimlik numarası atamak olacaktır. Bu kimlik numarası, ağı tanımlayan çevredeki ağlarda kullanılmayan ağa özel bir numaradır.



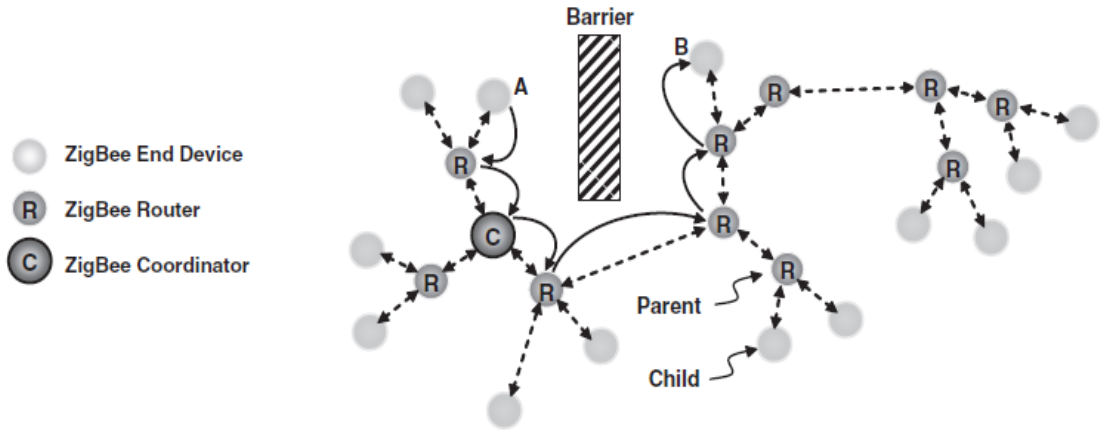
Şekil 3.5. Yıldız Ağ Topolojisi

Eşler arası ağ topolojisinde (Şekil 3.6) her cihaz kapsama alanındaki diğer cihazlar ile doğrudan doğruya iletişim kurabilir Ağdaki herhangi bir FDD cihazı PAN koordinatörü rolünü oynayabilir. Ağda bulunan birden fazla FDD cihazdan hangisinin PAN koordinatör rolünü alacağını ilk iletişim kurulan PAN koordinatör rolünü kapar kuralı belirler Eşler arası ağ da mesaj tutma özelliğine yalnızca FDD cihazlar yetkindir RFD cihazların mesaj alıp işleme yetkinliği yoktur RFD cihazlar ağdaki koordinatör veya yönledirici cihazlar ile iletişim kurup ağa dahil olurlar.



Şekil 3.6. Örgü Ağ Topolojisi

Eşler arası ağlar ağdaki cihazların birbirleri ile iletişimlerinin kısıtlanıp kısıtlanmaması durumuna göre farklı şekillerde oluşturulur. Eğer cihazların birbirleri ile iletişimine dair hiç bir kısıtlama tanımlanmamış ise bu ağlara Örgü (Mesh) topolojisine sahip ağlar denir ZigBee standardınca desteklenen diğer bir eşler arası ağ topolojisi de Şekil 3.7'de gösterilen Ağaç (Tree) topolojisidir.



Şekil 3.7. ZigBee Ağaç Topolojisi

Ağaç topolojisi ağlarında öncelikle ZigBee koordinatör (veya PAN kondinatör) tanımlanarak ağ tesis edilir. Ardından ZigBee yönlendiriciler ile ağın dalları oluşturulup mesaj trafiği başlatılır. ZigBee uç cihazları bir yaprak gibi davranır ve mesaj yönlendirme fonksiyonları yoktur. ZigBee yönlendiriciler yardımı ile koordinatör tarafından temeli atılan ağ genişletilebilir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi fiziksel engellerden dolayı birbirlerini göremeyen iki cihaz arasında mesaj fiziksel engele rağmen tesis edilebilir Örnek verecek olursak; CihazA'nın CihazB'ye mesaj göndermesi gerek ancak aradaki engelden dolayı birbirlerine doğrudan erişemiyorlar. Dolayısıyla radyo iletişimi kuramıyorlar. Ağaç topolojisi bu durumlarda, mesajın A'dan B'ye etraftaki radyo iletişimi kurulabilecek diğer cihazlar yardımı ile gönderilmesine olanak sağlar. Mesajın kaynaktan hedefe varıncaya kadar çok sayıda cihazdan atlayıp geçmesinden dolayı bu metodoloji çoklu atlama (multihopping) olarak tanımlanır. Ancak bu metot ile iletişimde çok sayıda cihazdan atlayarak mesaj ulaştırıldığından kaynaklanan bir potansiyel geçikme riski mevcuttur.

IEEE 802.15.4 ağı topolojiden bağımsız olarak her zaman PAN koordinatör tarafından oluşturulur. PAN koordinatör ağı kontrol ederek aşağıda belirtilen işlemleri yapar:

- Ağdaki her bir cihaza 16-bit veya 64-bit uzunluğunda yegane bir adres atar,
- Tüm ağda dolaşan mesajları duruma göre oluşturur, sonlandırır veya yönlendirir.

PAN koordinatör, ağın işleyişi için hayati fonksiyona sahip olduğundan dolayı her zaman aktif çalışır durumda bulunur, bundan dolayı sürekli bir güç sağlayıcısına yakın tesis edilir. Diğer cihazlar ise genellikle güç kaynağı olarak batarya kullanır. En küçük olası, ağda minimum iki cihaz bulunur.

3.2 ZigBee ve IEEE 802.15.4 İletişim Temelleri

Bu bölümde IEEE 802.15.4 ve ZigBee standartlarında kullanılan çoklu erişim metodu, adresleme veri iletim metodu gibi temel iletişim metodları verilmiştir.

3.2.1 Çarpışma Önleme ile Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (CSMA-CA)

EEE 802.15.4 iletişiminde, birden fazla cihazın aynı frekansı kullanması temeline dayanan basit bir yaklaşım kullanılır. Kullanılan kanal erişim mekanizması, Çarpışma Önleme ile Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA-CA,) mekanizmasıdır. CSMA-CA'da bir cihaz ne zaman işaret/mesaj iletmek isterse, kanalın başka bir cihaz tarafından kullanılmadığından emin olmak için öncelikle kanal değerlendirmesi (CCA,Clear Channel Assessment) yapar. Ardından cihaz kendi işaretini iletmeye başlar. Bir kanalı açık olarak ilan etme kararı ilgilenilen frekans kanalındaki spektral enerjinin ölçülmesi veya tutulan işaret türünün saptanması esasına dayanır.

Bir cihaz bir işaret iletmeyi planladığında, önce alıcı moda geçip istenen kanaldaki işaret enerji seviyesini algılar veya tahmin eder. Bu işleme, Enerji Algılama (Energy Detection, ED) adı verilir. Eğer ilgilenilen bant ta bir işaret var ise ED bunun bir IEEE 802.15.4 işareti olup olmadığına bakmaksızın enerji seviyesine bakar.

Taşıyıcı Duyarlı (Carrier Sense, CS) metodunda bir frekans kanalının açık veya meşgul olduğuna karar vermenin diğer bir alternatif yoludur. Bu yaklaşımda, ED'nin aksine enerji seviyesi değil tutulan işaretin tipi belirlenir. Eğer bu işaret bir IEEE 802.15.4 işareti ise cihaz bu kanalı işaret enerjisi kullanıcı tarafından tanımlanan eşiğin altında bile olsa meşgul ilan eder. Cihaz bu durumda rastgele bir süre için geri çekilip tekrar dinlemeye geçer ve kanal tutmaya çalışır. Geri çekilme ve kanal tutma işlemi, kanal serbest oluncaya kadar veya kullanıcı tanımlı maksimum kanal tutma süresince devam eder.

3.2.2 İşaretçi (Beacon)-Etkin Ağlara Karşı İşaretçi Pasif Olan Ağlar

Kanal erişimi için çekişmeli ve çekişmesiz olmak üzere iki yöntem vardır. Çekişmeli kanal erişiminde aynı frekans kanalını kullanmak isteyen tüm cihazlar CSMA-CA mekanizmasını kullanır ve kanalı serbest bulan ilk cihaz iletime başlar. Çekişmesiz kanal erişiminde ise PAN koordinatör belirli bir cihaza belirli bir zaman dilimini tahsis eder. Buna garantili zaman dilimi denir (Guaranteed Time Slot, GTS). Garantili zaman dilimi tahsis edilen cihaz, bu sürede CSMA-CA mekanizmasına ihtiyaç duymadan iletime başlar. PAN koordinatörünün garantili zaman dilimi tahsisi yapabilmesi için ağdaki tüm cihazlar koordinatör ile senkronize olmalıdır.

İşaretçi (Beacon), ağdaki düğümlerin saatlerini senkronize etmek için kullanılan belirli bir formata sahip mesaja verilen isimdir. Bir koordinatör kendisine bağlı cihazları senkronize etmek için işaret iletme seçeneğine sahiptir. Bu seçeneğe sahip koordinatöre, İşaretçi-Etkin PAN (Beacon-Enabled PAN) adı verilir. PAN koordinatör, tüm ağ elemanlarının saatlerini senkronize etmek için düzenli olarak işaretçi mesajı gönderip onları uyku modundan çıkarır. Onlardan gelen işaretleri dinleyip cevaplandırarak saatlerini senkronize eder. Senkronizasyon gerçekleştikten sonra ağ elemanları tekrar uyku moduna geçerler. İşaretçi kullanmanın dezavantajı, şebekedeki cihazların yalnızca senkronizasyon için uyanıp, bu sürede herhangi bir görevde bulunmamalarıdır. Bu nedenle, işaretçi etkin ağda bir cihazın batarya ömrü, işaretçi etkin olmayan bir ağdan daha kısa sürelidir. PAN koordinatörünün işaretçi iletmediği ağlar ise İşaretçi Etkin olmayan ağlar (Nonbeacon Network) olarak adlandırılır. İşaretçi etkin olmayan ağlar da cihazlar senkronizayon için uyandırılmadığından, batarya ömürleri belirgin bir şekilde daha uzun olur.

3.2.3 Veri Aktarım ve Doğrulama Metodları

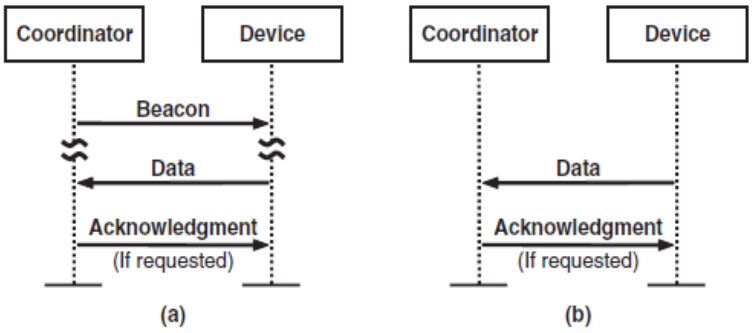
IEEE 802.15.4 ağlarında üç tip veri iletim metodu bulunmaktadır. Bunlar:

1. Bir cihazdan bir koordinatöre veri aktarımı,
2. Bir koordinatörden cihaza veri aktarımı,
3. İki eş aygıt arasında veri aktarımıdır.

Her üç yöntemde, eşler arası ağ topolojisi kullanılabilir. Ancak yıldız ağ topolojisinde, doğrudan eşler arası iletişime izin verilmediğinden, yalnızca ilk iki aktarım kullanılabilir.

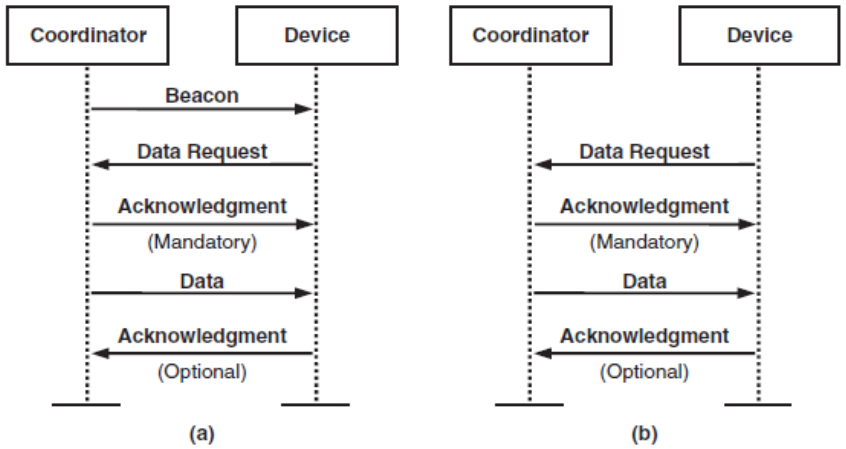
İşaretçi etkin bir şebekede, bir cihaz koordinatöre veri iletecek ise cihaz saatini düzenli aralıklarla senkronize eder ve verileri CSMA-CA mekanizması ile verileri iletir. Koordinatör ancak veriyi aktaran tarafın talebi üzerine veri alındı bilgisini doğrular. Aktarım sırasında oluşan

mesaj dizisi Şekil 3.8a'da gösterilmiştir. Şekil 3.8b'de ise İşaretçi etkin olmayan ağlar için aynı dizi gösterilmiştir. Bu senaryoda cihaz, veriyi kanal serbest olur olmaz iletir. PAN koordinatöründen -Alındı bilgisini alma- işlemi isteğe bağlıdır.



Şekil 3.8. IEEE 802.15.4 de Koordinatöre Veri Aktarımı: (a) İşaretçi Etkin (b) İşaretçi Pasif

İşaretçi etkin ağlarda, koordinatörden bir cihaza veri aktarımı için izlenen adımlar Şekil 3.9a'da gösterilmiştir. Eğer koordinatör veri aktarımını belirli bir cihaza yapıyor ise işaretçi mesajının içeriğinde söz konusu cihaz belirtilir. Cihaz daha sonra koordinatöre aktif olduğunu belirten bir veri talebi mesajı gönderir ve verileri almaya hazır bekler. Koordinatör, veri talebinin alındığını onaylar ve verileri cihaza gönderir. Onayın cihaz tarafından gönderilmesi isteğe bağlıdır. İşaretçi etkin olmayan bir ağda (Şekil 3.9b), veri aktarımı için koordinatör cihazı bekler. Eğer cihaz veri talep eder ve cihaz için bekleyen bir veri yok ise koordinatör tarafından cihaz için bekleyen bir mesajın olmadığı içeren bir doğrulama mesajı gönderilir. Alternatif olarak, koordinatör sıfır uzunluktaki taşıma yüküne sahip bir bilgi mesajı gönderebilir. Eşler arası ağ topolojisinde, her cihaz doğrudan başka bir cihaz ile iletişim kurabilir.



Şekil 3.9. Koordinatörden Cihaza Veri Aktarımı (a) İşaretçi Etkin ve (b) İşaretçi Pasif

Bir bilgi paketi, belirli bir format ile birlikte iletilen bir dizi bitten oluşur. Alıcı, alınan bitlerin eksik olup olmadığını doğrulamak için bir mekanizmaya sahiptir. Veri paketindeki muhtemel hatalar, International Telecommunication Union (ITU) Cyclic Redundancy Check (CRC) tabanlı 16-bit Çerçeve Kontrol Dizisi ve (FCS,Frame Check Sequence) ile tespit edilir.

3.2.4 Adresleme

Bir ağdaki her cihazın ağ içinde benzersiz bir adrese ihtiyacı vardır. IEEE 802.15.4 ağlarda adresleme için **i)** 16-bit kısa adresleme, **ii)** 64 bit genişletilmiş adresleme, olmak üzere iki yöntem kullanır.

Bir ağda, 16 bit veya 64 bit adresleme seçilebilir. 16 bit lik kısa adresleme, tek bir ağ içinde iletişimde kullanılır. Kısa adresleme mekanizmasının kullanılması durumunda, mesaj uzunluğu daha küçük olduğundan adresleme için ihtiyaç duyulan bellek kapasitesi azalır. PAN tanımlayıcı numarası ile birlikte kısa adres, diğer bağımsız ağlar ile iletişim kurmak için kullanılabilir. 64 bit adreslemenin kullanılması demek, ağdaki maksimum cihaz sayısının 2^{64} veya $1.8x10^{19}$ olması anlamına gelir. Bu nedenle, bir IEEE 802.15.4 kablosuz ağda, ağa katılabilecek cihazların sayısı konusunda pratikte bir sınır yoktur.

ZigBee Protokolünün Ağ katmanı (NWK), IEEE adresine ilave olarak 16-bitlik bir ağ adresi atar. Arama tablosu, her bir 64-bitlik IEEE adresini aynı ağ içinde benzersiz bir ağ adresine eşleştirmek için kullanılır. Ağ katmanı işlemleri, ağ adresi kullanılmasını gerektirir. Her bir radyonun tek bir IEEE ve tek bir ağ adresi olmasına karşı, bir radyoya en fazla 240 cihaz bağlanabilmektedir. Aynı radyoya bağlı olan cihazların her biri bitiş noktası (endpoint) olarak adlandırılan 1 ile 240 arasında bir numara ile ayırt edilir.

Birleşme (Association) ve Ayrışma (Disassociation) servisleri, cihazların ağa katılıp ağdan ayrılmaları için IEEE 802.15.4 tarafından tanımlanmış servislerdir. Örneğin bir cihaz PAN'a dahil olmak istediğinde, koordinatöre birleşme mesajı gönderir. Koordinatör ise birleşme talebini kabul veya red edebilir. Yine aynı şekilde cihaz ağdan ayrılma isteğini koordinatöre ayrışma mesaji ile iletir.

Bağlama (Binding), bir biriyle alakalı uygulamalar arasında mantıksal bağlantılar oluşturma görevidir. Örneğin Lambaya bağlı bir ZigBee cihazı mantıksal olarak diğer uçtaki anahtara bağlı diğer bir ZigBee cihazı ile ilgilidir ve bu ilgi mantıksal bağlantı olarak adlandırılır. Ağdaki mantıksal bağlantı bilgilerinin tutulduğu tabloya, bağlama tablosunda denir. Bağlama

tablosu oluşturma ve güncelleme desteği, ZigBee standartında uygulama katmanı tarafından yürütülür. Bağlama tablosunda mantıksal bağlatıları olan cihazlara, bağlı cihazlar nedir.

ZigBee ağı, ağdaki bağlı cihazlar aktif olur olmaz oluşmaya başlar. Örgü topoloji yapısına sahip bir ağda FDD cihaz kendi kendini ZigBee Koordinatörü olarak atayıp, diğer cihazlar ile ağ oluşturmak üzere iletişime geçebilir. Diğer cihazlarda koordinatöre ağa katılım için birleşme mesajı gönderir. Ağ oluşumu için ilave başka da bir özellik gerekmez. ZigBee ağlar, kendi kendini oluşturan ağlar olarak kabul edilir. Öte yandan örgü ağ topolojisinde, bir mesaj bir cihazdan diğer cihaza birden farklı yoldan iletilebilir. Doğal olarak mesaj en kısa yoldan ulaşır. Ancak yönlendiricilerden birisi batarya ömrü, fiziksel engel gibi nederlerden dolayı devre dışı kaldığında mesaj alternatif bir yoldan gönderilir. Örgü topolojisine sahip ZigBee ağların mesajı alternatif güzergahlardan göndermesi özelliği, ağın kendi kendini iyileştirme özelliği olarak adlandırılır.

3.3 ZigBee ve IEEE 802.15.4 Ağ Katman Fonksiyonları

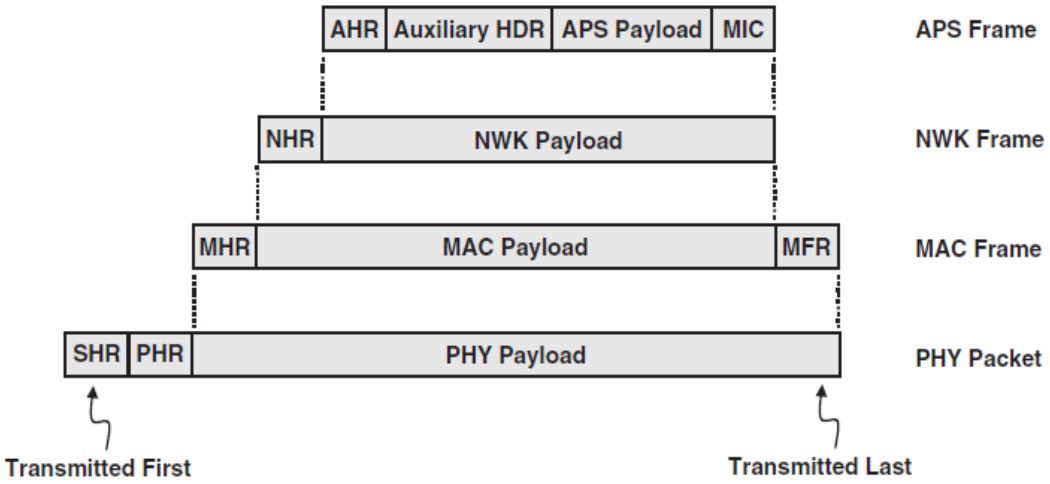
Bu bölümde ZigBee ve IEEE 802.15.4 ağların protokol katmanlarının fonksiyonları gözden geçirilecektir.

3.3.1 Fiziksel Katmanı (PHY)

ZigBee, kablosuz ağında (Şekil 3.3) en düşük protokol katmanı olan IEEE 802.15.4 fiziksel katmanıdır (PHY). Bu katman donanıma en yakın katmandır. Doğrudan radyo alıcı-vericisini kontrol eder ve iletişim kurar. PHY katmanı, paketleri ileten veya alan radyonun etkinleştirilmesinden sorumludur. PHY katmanı ayrıca frekansı ve kanalı seçer, kanalın başka bir cihaz veya ağ tarafından kullanılmadığından emin olur. Veri ve komutlar paketler şeklinde çeşitli cihazlar arasında karşılıklı iletilir. Bir paketin genel yapısı Şekil 3.10'da gösterilmiştir. PHY paketi; Senkronizasyon başlığı (SHR), PHY başlığı (PHR) ve PHY yükü olarak adlandırılan üç bileşenden oluşur.

Diğer cihazlara bir PHY yükü olarak iletilen MAC çerçevesi üç bölümden oluşur. MAC başlığı (MHR) adresleme ve güvenlik gibi bilgiler içerir. MAC yükü değişken uzunluklu bir boyuta (sıfır uzunluk dahil) sahiptir ve komutlar veya veriler içerir. MAC altbilgisi (MFR) Veri doğrulama için (FCS) 16 bitlik bir Çerçeve Kontrol Dizisi içerir. NWK çerçevesi iki bölümden oluşur: NWK başlığı (NHR) ve NWK yükü. NWK başlığında, ağ düzeyinde adresleme ve kontrol bilgileri bulunmaktadır. NWK yükü, APS alt katmanı tarafından sağlanır. APS alt katman çerçevesinde APS başlığı (AHR), uygulama katmanı kontrolü ve adres bilgisi bulunur. Yardımcı çerçeve başlığı (yardımcı HDR), kullanılan güvenlik anahtarları ile çerçeveye güvenlik eklemek

için kullanılan mekanizma bilgilerini içerir. Yardımcı çerçeve başlığında bulunan güvenlik anahtarı ilgili cihazlar arasında paylaşılır ve şifreli bilgilerin kilidini açmaya yarar. NWK ve MAC çerçevelerinde ayrıca ek güvenlik için isteğe bağlı yardımcı başlıklar olabilir. APS yükü veri veya komutlar içerir. Mesaj Bütünlüğü Kodu (MIC), APS çerçevesinde mesajın içeriğinde izinsiz herhangi bir değişiklik yapılıp yapılmadığını tespit etmek için kullanılan bir güvenlik özelliğidir. Şekil 3.10'de görüldüğü üzere, ZigBee paket yapısında ilk iletilen bit SHR deki en az anlamlı bittir (LSB, Least Significant Bit). En önemli bit (MSB, Most Significant Bit) olarak adlandırılan PHY yükünün son okteti ise en son iletilir.



Şekil 3.10. ZigBee Paket Yapısı

SHR, alıcının senkronize olmasını ve bit akışına kilitlenmesini sağlar.
PHR, çerçeve uzunluğu bilgisini içerir.
PHY üst katmanlar tarfından sağlanan PHY yükünü ve alıcı cihaz için veri veya komutları içerir.

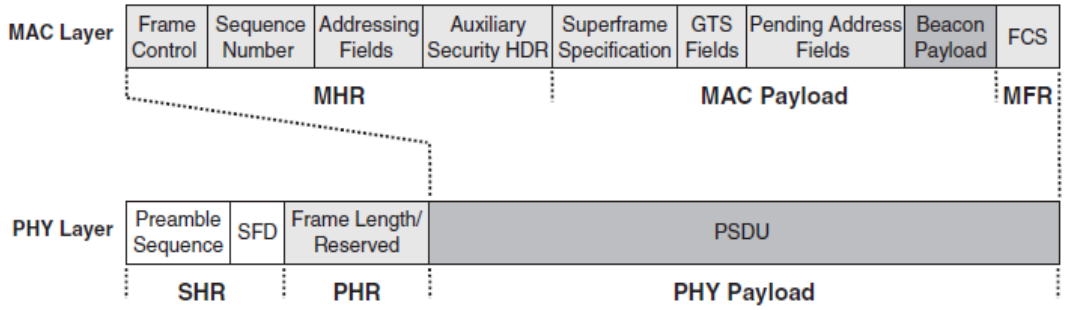
3.3.2 MAC Katmanı

Ortam Erişim Kontrolü (MAC) katmanı, PHY ve NWK katmanları arasındaki arayüzü sağlar. MAC katmanı işaretçi üretmekten ve cihazları (işaretçi etkin bir ağda) işaretçiler ile senkronize etmekten sorumludur. MAC katmanı birleşme ve ayrışma taleplerini de yerine getiren katmandır. IEEE 802.15.4 MAC katmanında kullanılan çerçeveler sırasıyla; i) İşaretçi çerçeve, ii) Veri çerçevesi, iii) Onay çerçevesi ve iv) MAC komut çerçevesidir.

İşaretçi çerçevesi, işaretlerin iletilmesi için bir koordinatör tarafından kullanılır. İşaretçiler aynı ağdaki tüm cihazların saatini senkronize etmek için kullanılır. Veri ve onay

çerçeveleri, veriyi iletmek ve ardından iletilen verilerin başarılı alımını onaylamak için kullanılır. MAC komut çerçevesi, MAC komutlarını iletmek için kullanılır.

Bir işaretçi çerçevesinin yapısı, Şekil 3.11'de gösterilmiştir. MAC çerçevesinin tamamı PHY çerçevesinde yük olarak konumlandırılır. PHY yükünün içeriği, PHY çerçevesinde PHY Hizmet Veri Birimi (PSDU) olarak adlandırılır. Başlangıç işareti, alıcı tarafından senkronizasyon için kullanılır. Çerçeve başlangıç sınırlayıcısı (SDF), SHR'nin sonunu ve PHR'nin başlangıcını gösterir. PHY yükündeki (PSDU) toplam oktet (sekizli) sayısı, çerçeve uzunluğunu belirtir.



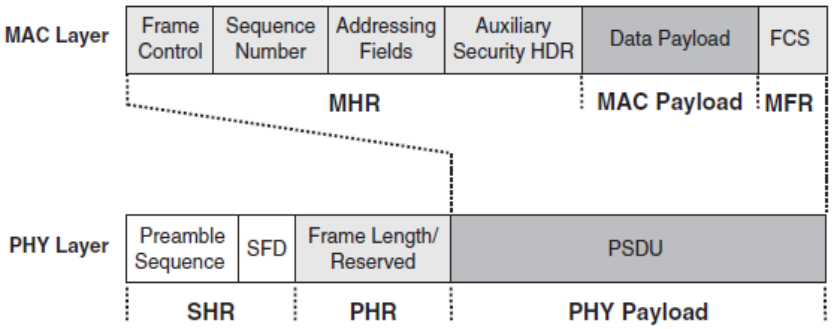
Şekil 3.11. MAC İşaretçi Çerçeve Yapısı

MAC çerçevesi üç bölümden oluşur:
MAC başlığı (MHR), MAC yükü ve MAC altbilgi (MFR) dir. MHR'deki çerçeve kontrol alanı, çerçeve türünü, adresleme alanlarını ve diğer kontrol bayraklarını tanımlayan bilgileri içerir. Dizi numarası, işaretçi sıra numarasını (BSN) belirtir. Adresleme alanı, kaynak ve hedef adreslerini içerir. Yardımcı güvenlik başlığı isteğe bağlıdır ve güvenlik işlemleri için gerekli bilgiler içerir. MAC yükü, NWK katmanı tarafından sağlanır. Süper çerçeve, iki işaretçi çerçevesi ile sınırlandırılan bir çerçevedir. Süper çerçeve isteğe bağlı olarak işaretçi etkin bir ağda kullanılır ve GTS'lerin tanımlanmasına yardımcı olur. MAC yükündeki GTS alanı, bir GTS'nin alan/ileten olarak kullanılacağını belirler. İşaretçi çerçevesi, yalnızca bir şebekedeki cihazları senkronize etmek için kullanılmaz, ayrıca koordinatör tarafından bir ağdaki belirli bir cihaz için koordinatörde bekleyen bir veri olup olmadığını bilgilendirmek için de kullanılır.

Cihazın kendi takdiri ile koordinatöre başvurup verileri cihaza iletmesini talep etmesi, dolaylı iletim olarak adlandırılır. MAC yükündeki bekleyen adres alanı, koordinatörde bekleyen veriye sahip cihazların adresini içerir. Bir cihaz bir işaretçi aldığında, bekleyen veri alanının olup olmadığını görmek için bekleyen adres alanını kontrol eder. İşaret yükü alanı, NWK katmanı

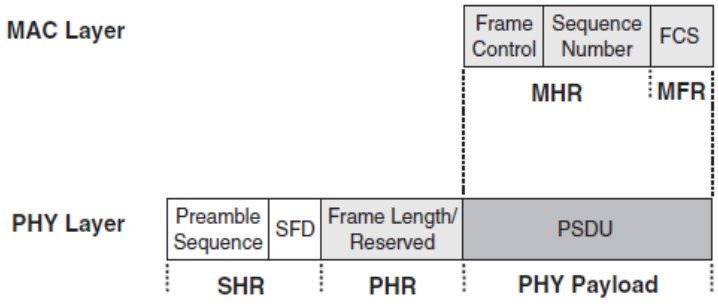
tarafından kullanılabilecek isteğe bağlı bir alandır ve işaretçi çerçevesi ile birlikte iletilir. Alıcı, alınan çerçevede olası herhangi bir hatayı kontrol etmek için Frame Check Sequence (FCS) alanını kullanır.

MAC veri çerçevesi, Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Veri yükü NWK katmanı tarafından sağlanır. MAC yükündeki veriler, MAC Servis Veri Birimi (MSDU) olarak adlandırılır. MAC veri çerçevesindeki alanlar; süper çerçeve, GTS ve bekleyen adres alanlarının dışında işaretçi çerçevesine benzer. MAC veri çerçevesi, MAC Protokol Veri Birimi (MPDU) olarak adlandırılır ve çerçevesinde PHY yükü kısmını oluşturur.



Şekil 3.12. MAC Veri Çerçeve Yapısı

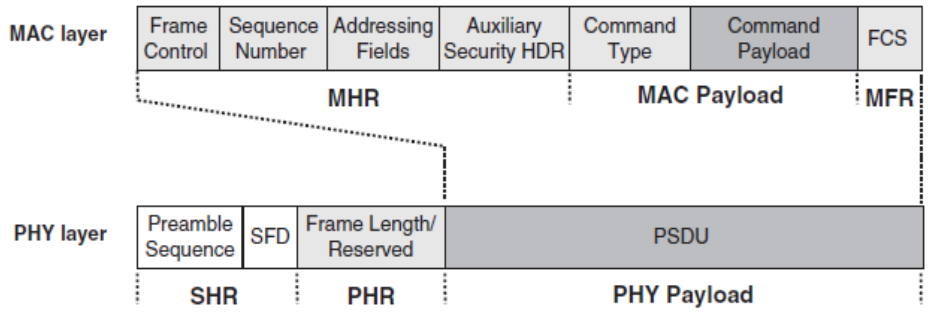
Şekil 3.13'de gösterilen MAC onay çerçevesi en basit MAC çerçeve formatıdır ve herhangi bir MAC yükü taşımamaktadır. Onay çerçevesi paket alımının başarılı bir şekilde gerçekleştiğini onaylamak için bir cihaz tarafından diğerine gönderilir.



Şekil 3.13. MAC Onay Çerçeve Yapısı

Bir ağa dahil olma ve ağdan çıkma için kullanılan birleşme ve ayrışma alepleri gibi MAC komutları MAC komut çerçevesi kullanılarak iletilir (Şekil 3.14). Komut türü alanı, komutun

türünü belirler (örneğin birleşim isteği veya veri isteği). Komut yükü komutun kendisini içerir. Tüm MAC komut çerçevesi PHY yüküne PSDU olarak yerleştirilir.



Şekil 3.14. MAC Komut Çerçeve Yapısı

3.3.3 ZigBee Protokolünün Ağ Katmanı (NWK)

NWK katmanı, MAC ve Uygulama (Application Layer, APL) katmanları arasında arayüz oluşturur. Ağ oluşumunu ve yönlendirmeyi yönetmekten sorumludur. Yönlendirilecek mesajın hedef cihaza hangi yol ile aktarılacağını belirler. Ağda bulunan ZigBee uç cihazı, rota oluşturma işlemini gerçekleştiremez. Ağda bulunan ZigBee koordinatörü veya yönlendirici, cihaz uç cihaz adına rota oluşturma işlemini gerçekleştirir. Bir ZigBee koordinatörünün NWK katmanı, yeni bir ağ oluşturmaktan ve ağ topolojisini (ağaç, yıldız veya örgü) seçmekten sorumludur. Bu sorumluluğuna ilave olarak, ağındaki cihazlara NWK adres ataması yapar.

3.3.4 APL Katmanı

APL katmanı, ZigBee kablosuz ağdaki en yüksek protokol katmanıdır ve uygulama nesnelerini barındırır. Üreticiler, çeşitli uygulamalarda bir cihazı özelleştirmek amacı ile uygulama nesnelerini geliştirir. Uygulama nesneleri, bir ZigBee cihazındaki protokol katmanlarını kontrol eder ve yönetir. Tek bir cihazda 240'a kadar uygulama nesnesi olabilir. ZigBee standartı, bir uygulama geliştirme amacı için uygulama profillerini kullanma seçeneği sunar. Uygulama profili, uygulamaya özel mesaj biçimleri ve eylemleri içeren bir dizi önkabul kümesidir. Bir uygulama profilinin kullanılması, belirli bir uygulama için farklı üreticiler tarafından geliştirilen ürünler arasında birlikte çalışabilirliğine olanak sağlar.

3.3.5 Güvenlik

Bir kablosuz ağda, iletilen mesajlar, ağa izinsiz giriş yapan bir cihaz veya ağda mevcut yakındaki herhangi bir cihaz tarafından alınabilir. Kablosuz bir ağda iki temel güvenlik kaygısı vardır. Birincisi veri gizliliğidir. Ağa izinsiz giriş yapan bir cihaz, iletilen mesajları dinleyerek hassas bilgiler elde edebilir. Mesajları iletimden önce şifrelemek, iletim gizlilik problemini

çözecektir. Şifreleme algoritması ile güvenlik anahtarı olarak bilinen bir dizi bit kullanılarak mesaj değiştirilir ve yalnızca arzulanan alıcı mesajı alıp değişen mesajı orjinal haline çevirebilir. IEEE 802.15.4 standardı, giden mesajlarını şifrelemek için Gelişmiş Şifreleme Standardı (AES) (usdoc 2001) kullanımını destekler. İkinci güvenlik konu ise ağa izinsiz giriş yapan bir cihazın, mesajları şifreli olsa bile değiştirip yeniden göndermesidir. Her giden çerçeveye bir mesaj bütünlük kodu (MIC) eklemek, alıcının mesajın iletimi sırasında değiştirilip değiştirilmediğini bilmesini sağlayacaktır. Bu işlem veri doğrulama olarakta bilinir.

3.3.6 ZigBee Ağ Geçidi

ZigBee ağ geçidi, bir ZigBee ağ ile farklı bir standart kullanan başka bir ağ arasındaki arayüzü sağlar. Örneğin ZigBee kablosuz ağ bağlantısı, hasta bilgilerini yerel olarak bir oda içinde toplamak için kullanılıyor ise bilgilerin internet üzerinden bir izleme istasyonuna iletilmesi gerekebilir. Bu durumda ZigBee ağ geçidi, ZigBee paketlerini internet protokolü paket biçimine ve tersi olan internet paketlerini ZigBee paketine dönüştürme işlemini yapar.

3.4 ZigBee/IEEE 802.15.4 Ağına İlişkin Uygulama Alanları

ZigBee ağlar; ev otomasyonu, envanter takibi, sağlık hizmetleri gibi çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılabilmektedir (Şekil 3.15). Bu bölümde, söz konusu uygulama alanları ile ilişkili ağ örnekleri açıklanacaktır.



Şekil 3.15. ZigBee Etkin Cihazların Kullanıldığı Alanlar

3.4.1 Ev Otomasyonu

Ev otomasyonu, ZigBee kablosuz ağ iletişimi için ana uygulama alanlarından biridir. Ev otomasyonunda kullanılan tipik veri hızı 10 Kbps'dir (Gutierrez 2007).

3.4.2 Güvenlik Sistemleri

Bir güvenlik sistemi; hareket dedektörleri, cam kırılması dedektörü ve güvenlik kameraları gibi çeşitli sensörlerden oluşabilir. Bu cihazların, merkezi güvenlik paneli ile kablolu veya kablosuz ağ aracılığı ile iletişim kurması gerekir. ZigBee tabanlı güvenlik sistemleri yeni güvenlik sistemlerinin kurulmasını ve mevcutların geliştirmesini kolaylaştırmıştır (EATON 2019). ZigBee düşük veri iletim oranına rağmen, kamera görüntülerini kablosuz olarak kabul edilebilir kalitede aktarabilmektedir. Çalışmalarda, bir evin ön kapısında kurulu kameradan gelen ziyaretçilerin videolarını kaydedebilen ve kaydı evin içindeki bir monitöre kablosuz olarak aktarabilen uygulamaların olduğu görülebilmektedir.

3.4.3 Sayaç Okuma Sistemleri

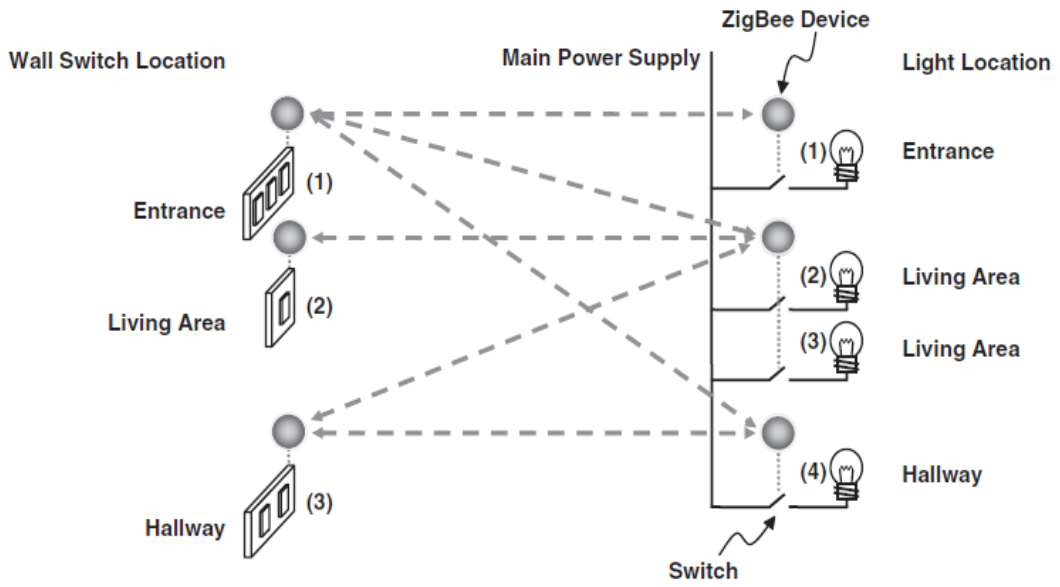
Faturaları oluşturmak için elektrik, gaz ve su sayaçlarının düzenli olarak okunması gerekir. Bunu yapmanın bir yolu, sayaçları yerinde okumak ve okunan değerleri bir veritabanına kaydetmektir. Bu uygulamanın yerine, ZigBee tabanlı otomatik sayaç okuma (Automatic Meter Reading, AMR) sistemi ile konut veya sitelerde kablosuz örgü ağ yapısını oluşturup, otomatik olarak sayaç bilgilerini proglamlanan periyotta ilgili firmanın veri merkezine iletilebilir. Bu uygulama ile insan ziyaretine duyulan ihtiyaç ortadan kalkar. AMR sisteminin sağladığı diğer olanaklar: ayrıntılı kullanım bilgileri, kaçakların saptanması ve ekipman sorunlarını otomatik olarak tespitidir (AMRA 2019). ZigBee tabanlı kablosuz cihazlar, yalnızca izleme görevlerini yerine getirmekle kalmaz, aynı zamanda ev içindeki cihazlar ile iletişim kurarak kullanım oranları yönetilebilir. Örneğin, elektrik kullanımında pahalı zaman aralığı için ilgili cihazın kapatılması veya sınırlandırılması mümkün olabilmektedir.

3.4.4 Sulama Sistemleri

Sensör tabanlı bir sulama sistemi ile su yönetimi daha yüksek verimle sağlanabilir. Araziye dağılmış sensörler yardımı ile arazideki değişik derinlikteki nem oranları sulama paneline iletilebilir. Sensörlerden gelen nem seviyesi, bitki türü, günün saati ve mevsim gibi değişkenler göz önünde bulundurarak, kontrol cihazı tarafından sulama süresi belirlenebilir. Böylelikle, kablosuz sensör ağı ile araziye kablo döşeme zorluğu ve maliyeti bertaraf edilebilir. Ayrıca kablosuz sensör ağların bakım maliyetleri, kablolu emsallerine göre daha ucuzdur.

3.4.5 Aydınlatma Kontrol Sistemleri

Aydınlatma kontrolü, ZigBee'yi bir evde veya ticari binada kullanmanın klasik örneklerinden biridir. Geleneksel aydınlatma sisteminin kurulumunda, ışığı açmak/kapatmak için aydınlatma birimi ve anahtar arasında kablolamanın yapılması gerekir. ZigBee cihazlarının kullanılması durumunda, aydınlatma birimi ve anahtar arasında kablolamanın yapılmasına gerek kalmaz. Oluşturulacak sistemde, evdeki herhangi bir anahtar belirli bir aydınlatma birimini kontrol etmek için atanabilir. Örnek bir uygulama Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Örnekte aydınlatma birimleri; konut girişine, oturma alanına ve koridora yerleştirilmiştir. Girişteki duvar anahtarı, dört aydınlatma biriminden herhangi birini kontrol edebilir. Kurgulanan örneğe göre, yaşam alanındaki duvar anahtarı, sadece yaşam alanındaki aydınlatma birimleri ile iletişim kurabilmektedir. Yaşam alanında yer alan aydınlatma birimlerinin birbirine yakın olması, tek bir ZigBee cihazı üzerinden kontrollerine olanak sağlar. Duvar anahtarı 1, dört aydınlatma birimine mantıksal olarak bağlanmıştır. Duvar anahtarı 2, yalnızca yaşam alanındaki aydınlatma birimlerine bağlanmıştır. Ağdaki cihazlardan biri, bağlantı durum tablosunu saklama ve güncelleme görevine sahiptir. ZigBee özellikli aydınlatma birimi, normal bir lambaya kıyasla daha maliyetli ancak ZigBee sisteminin kablosuz kurulumu ile toplam maliyetin daha düşük olduğu hesaplardan görülmüştür.



Şekil 3.16. ZigBee Kablosuz Ağları ile Bina Aydınlatma Kontrolü

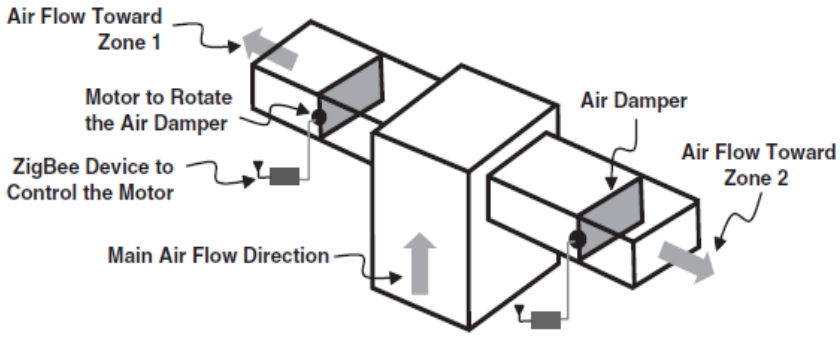
Aydınlatma birimlerini kontrol etmek için kablosuz uzaktan kumanda kullanmak, yeni bir kavram değildir. Ancak ZigBee, uzun batarya ömrü ve çeşitli tedarikçilerden gelen ürünlerin birlikte çalışabilirlik özelliği sayesinde, bu uygulamalarda kullanılabilir. Potansiyel maliyet

tasarruflarına ek olarak, ZigBee'nin aydınlatma konusunda etkin olarak kullanım avantajları da vardır. Örneğin, ev için ek bir kuruluma gerek duymadan, televizyonlar her açıldığında ışıklar kararacak şekilde programlanabilir. ZigBee tabanlı aydılatma kontrol mekanizmasının sokak aydınlatma birmleri için de kullanıldığı uygulamalar günümüzde mevcuttur (Lee 2006).

3.4.6 İklimlendirme Sistemleri

ZigBee tabanlı çok bölgeli iklimlendirme sistemi ile evin (veya işyerinin) farklı alanlarında farklı iklim koşulları sağlanabilmektedir. İşin en önemli noktası, bu işlemin tek bir ünite olan ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme ünitesi (Heating, Ventilation and Air-Conditioning, HVAC) tarafından kontrol edilebilmesidir.

Çok bölgeli iklimlendirme sistemi, her odaya hava akışını kontrol ederek gereksiz soğutma veya ısıtma alanlarının oluşmasını engeller ve dolayısıyla enerji tasarrufu sağlar. Hava perdelerini kontrol eden ve farklı bölgelere hava akışını motorlar ile düzenleyen basitleştirilmiş bir diyagram, Şekil 3.17'de gösterilmiştir. ZigBee cihazları, bu motorları ana HVAC bölge kontrol panelinden aldıkları komutlara ve sıcaklık sensörlerine göre kontrol eder.



Şekil 3.17. ZigBee Kontrollü Hava Perdeleri ile Çok Bölgeli İklimlendirme

3.4.7 Uzaktan Kontrol

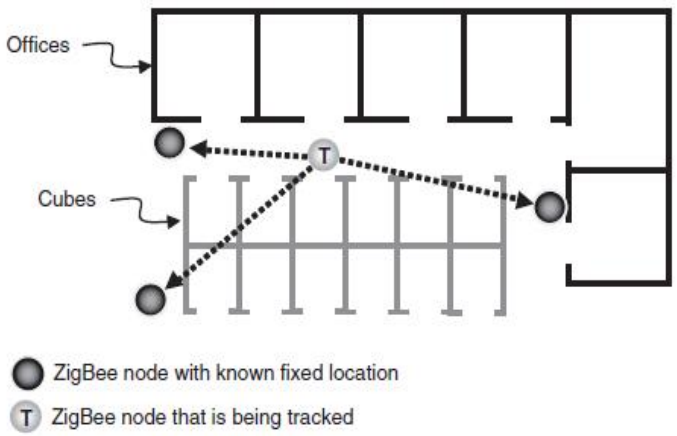
Uzaktan kumanda, hayatın her alanında karşılaşılan en temel donanımdır. Oyun kumandalarında, kablosuz farelerde ve diğer birçok uygulamada ZigBee tabanlı donanımlar az da olsa görülebilmektedir. Oysa günümüzde uzaktan kumanda cihazları, televizyonlar, DVD'ler ve diğer eğlence cihazlarında sıklıkla kızılötesi (IR) işaretler kullanılmaktadır. IR uzaktan kumandasının dezevantajı, yalnızca tek yönlü iletişim sağlamalarıdır. Ayrıca, IR sinyalleri duvarlara ve diğer nesnelere nüfuz etmez ve bu nedenle çalışması için uygun görüş hattı gerekir. Bunu karşı radyo frekansı (RF) sinyalleri, duvarlara ve nesnelerin çoğuna kolayca nüfuz eder. Dolaysıyla IEEE 802.15.4 teknolojisi, IR teknolojisine sahip uzaktan kumandalar için uygun bir

alternatif olabilir. Diğer önemli gerekçeler ise kablosuz iletişimde düşük maliyetin eldesi ve uzun batarya ömrüne sahip olmasıdır (Anonim 2018). IEEE 802.15.4 teknolojisinin uzaktan kumanda sistemlerinde kullanılması durumunda, sisteme kazandırılabilecek diğer bir özellik; uzaktan kumanda ve eğlence cihazı arası iki yönlü iletişimin kurulabilmesidir. Bu durum sistemdeki var olan ayarların uzaktan kumandaya iletilebilmesi anlamına gelmektedir.

3.4.8 Personel/Nesne Takibi

Pasif radyo frekansı ile tanımlama (RFID) etiketleri, yıllardır personel/nesne takibi uygulamalarında kullanımdadır. Pasif bir RFID etiketinde batarya olmamasına rağmen, RFID okuyucu ünitesi pille çalışan bir cihaz olabilir. Pasif bir RFID etiketi, birçok uygulama için yeterli olan bir kimlik numarasını iletir. ZigBee cihazları gibi aktif RFID'ler, pille çalışır ve genellikle pasif RFID'lerden daha pahalıdır. Ancak ZigBee tabanlı aktif RFID'lerin kapsama aralığı daha uzun ve personelin/nesnelerin yerini tahmin etmek gibi ek yetenekleri vardır.

Personelin tipik bir ofis binası içinde belirlenmesine ilişkin temeller, Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, bilinen konumlara sahip üç sabit ZigBee düğümü vardır. Bir çalışan tarafından taşınan mobil ZigBee düğümü, üç sabit düğümün yaydığı işaretlerini alır. Personel hareket ettikçe üç sabit düğüm tarafından alınan işaretler zayıflar. Personelin her üç sabit düğüme olan uzaklığı farklı olduğundan, her bir sabit düğüm tarafından alınan işaretin güç oranı da farklı olacaktır. Alınan işaret güçlerine göre, personelin bulunduğu konum farklı algoritmalar ile saptanabilir.



Şekil 3.18. ZigBee Ağlarında Ofis İçi Personel Takibi

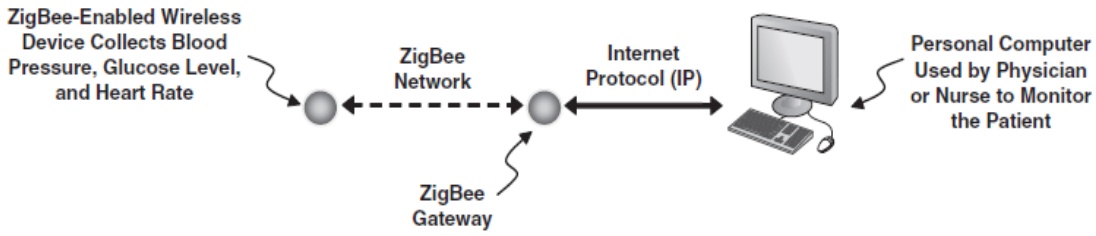
3.4.9 Sürü Takip

Hayvancılıkta hastalık çok hassas bir konudur ve hastalıklı bir hayvanı hızlı bir şekilde tespit etme/izlemek konusu hayvancılıkta son derece önemli bir konudur. Hastalık salgını veya hayvan sağlığı olaylarından etkilenen üreticilerin sayısını günümüzde azaldığı görülmektedir (NAIS 2019). Pasif RFID etiketlerin, günümüz uygulamalarında hayvanları izlemek amacıyla kullanılabildiği görülmekte ve kısmen çeşitli sorunlara çözümler üretebildiği gözlenmektedir. IEEE 802.15.4-tabanlı aktif etiketler pasif olanlardan daha maliyetli olabilir, fakat IEEE 802.15.4 etiketleri ile geniş menzil ve hayvan kalp atışı/hayvanın yaklaşık konumu gibi ek bilgiler sağlanabilir.

3.4.10 Sağlık

IEEE 802.15.4'ün sağlık endüstrisindeki uygulamalarından biri, hastanın hayati bilgilerini uzaktan izlenebilmesidir. Dünya nüfusunun giderek yaşlanması ve yaşlanan bireylerin yaşamsal fonksiyonlarının takibi, günümüzün en temel ihtiyaçlar listesine girdiği görülmektedir. Sabit bir yerde konumlanan bir bireyin (hastanın) kalp atış hızı ve/veya kan basıncı periyodik olarak doktoru tarafından görülmek istenebilir. Bu koşullarda, hastaya bağlı çeşitli sensörlerden veri toplamak için bir IEEE 802.15.4 ağı kullanılabilir. 802.15.4 standardı gereği, ZigBee cihazlar ve diğer ağlar arasında verilerin güvenli bir şekilde aktarımı için 128-bitlik AES teknolojisi kullanılır.

Uzaktan izleme sisteminin basitleştirilmiş bir diyagramı Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, bir hasta farklı yaşamsal bilgileri ölçebilen bir ZigBee cihazı takar. Bu ölçülen bilgiler, bir ZigBee ağ geçidine iletilir. ZigBee ağ geçidi, ZigBee ağı ile İnternet Protokolü (IP) ağı gibi diğer ağlar arasındaki arayüzü sağlar. Hasta bilgileri İnternet üzerinden doktor veya hemşirenin kişisel/kurumsal bilgisayarına iletilir. Bu sistem, hastanelerin hasta bakımını iyileştirmesine ve evde hastaların izlenmesine olanak sağlayarak, hastane hasta yoğunluğunu azaltmada yardımcı olabilmektedir.



Şekil 3.19. ZigBee Ağ ile Ev İçi Hasta Takip Sistemi

3.4.11 Otellerde Oda Giriş Sistemi

ZigBee tabanlı sistemler, otellerde kullanılan manyetik anahtar kart sistemlerinin yerine kullanılabilir. Otellerde odaya giriş sisteminde, çoğunlukla bir tarafında manyetik band bulunan plastik kartlar kullanılır. Oda kapısına monte edilen kart okuyucu, odaya erişimin izni için manyetik şeride kodlanan bilgileri okur. Bu okuyucuyu her bir kapı için monte etmek, kapıdan kablolamayı gerektirir. Alternatif bir çözüm olarak, ZigBee tabanlı oda erişim sistemi önerilebilir. Bu sistem; anahtar işlevi gören taşınabilir bir ZigBee cihazından ve kapı içine gömülü ZigBee cihazı ile kapının kilitlenmesini/açılmasını sağlayan donanımdan oluşur. Geleneksel yöntemlerin aksine, ZigBee tabanlı oda erişim sistemi, her bir kapı için kablolama gerektirmez ve bu da kurulum maliyetini azaltır.

3.4.12 Yangın Söndürme Sistemi

Tüm tüplerin doluluğundan ve basınçların doğru seviyede olduğundan emin olunabilmesi için yangın söndürücülerin her 30 günde bir kontrol edilmesi gerekmektedir. Söndürücüleri manuel olarak kontrol etmek yerine, ZigBee tabanlı bir izleme sistemi kurulabilir. ZigBee tabanlı sistem, her bir yangın söndürücüye durumunu bildiren ve bakım gerektiğinde koordinatörle kablosuz olarak iletişim kurabilen bir yapıya sahip olabilir. ZigBee tabanlı bir izleme sistemi sadece zamandan ve işçilik maliyetinden tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bir yangın söndürücü tüp uygun şekilde çalışmıyorsa, yetkilileri derhal uyararak yangın söndürme sisteminin güvenliğini artırmaya yardımcı olur.

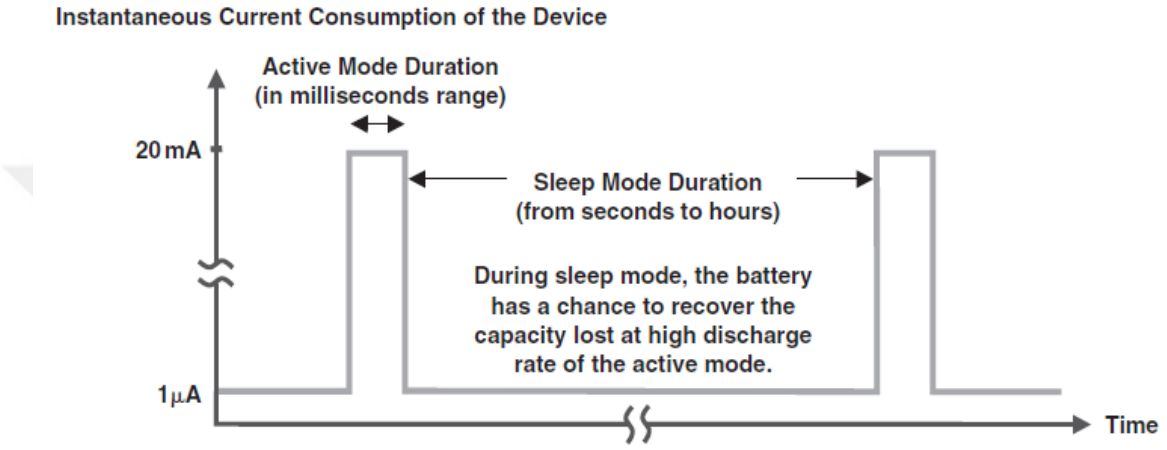
3.5 Batarya Deşarj Karakteristiği

Bu bölümde batarya deşarj karekteristiklerini inceleyip, batarya ömrü hesaplamanın basit bir yöntemi ve cihazların ağda daha uzun süre çalışmasını sağlamak için kullanılan bazı güç tüketimi azaltma yöntemleri tanıtılmıştır. Batarya ömrü, donanım ve de ağ işlem verimliliğinin bir işlevidir.

Batarya kapasitesi miliamper saat (mAH) cinsinden ölçülür. Bir batarya 250 mAH kapasiteye sahip ve ortalama 2 mA akım sağlar ise teorik olarak bağlı olduğu sisteme 125 saat güç sağlar. Bataryayı üretici tarafından önerilen oranda boşaltmak, bataryanın nominal kapasitesine yakın bir şekilde kullanılmasını sağlar.

Kısa menzilli kablosuz sensör ağlarında bir cihazın ortalama akım tüketimi düşük olsa da, anlık akım değeri yüksek olabilir. Şekil 3.20'de ZigBee ağda kullanılan alıcı-verici özelliğine sahip bir cihazın akım profili gösterilmiştir. Cihaz 1 μA uyku akımına ve 20 mA tepe aktif akımına sahip olup, her iki saniyede bir uyanır ve 5 ms boyunca aktif kalır. Ortalama akım

tüketimi sadece 50 μA olmasına rağmen, 20 mA olan en yüksek tepe akım değeri, özellikle de bataryanın yeniden dolmasına izin vermek için yüksek akım boşalma süreleri arasında yeterli zaman yok ise bataryanın gerçek kapasitesi üzerinde olumsuz bir etki oluşturur (Fuller ve ark 1994). Bir batarya sürekli ve hızlı deşarj olduğunda, bataryada kapasite olmasına rağmen ömrünün sonuna ulaşır. Bununla birlikte, deşarj hızı sürekli değil (veya çok düşük akım periyotları var) ise bataryayı oluşturan aktif maddelerin yenilenme hızı, tükenme hızına oranla daha iyi ise batarya yüksek deşarj oranında kaybedilen kapasiteyi geri kazanabilir.



Şekil 3.20. ZigBee Ağın Kullanılan Bir Cihazın Akım Profil Örneği

Bir bataryanın belirli bir uygulama senaryosu için gerçek kapasitesi ancak deneysel olarak belirlenebilir. Ancak batarya üreticilerinin belirli uygulamalar için batarya profilini sağlaması durumunda, gerçek batarya kapasitesi için bir tahmin yürütülebilir. Bataryanın gerçek kapasitesinin nominal kapasitesine oranı, batarya verimlilik faktörü olarak adlandırılır. Yüksek akım deşarj sürelerini önlemenin bir yolu, (eğer mümkün ise) düğüm aktifken akımı alıcıya aktaracak kadar büyük bir kapasitör kullanmaktır. Kapasitör kullanılması durumunda, cihaz uyku modundayken, batarya kondansatörü şarj eder, cihaz aktif hale geldiğinde veya yüksek deşarj oranı gerektiğinde, bu kapasitör cihaza akım sağlar. Bu şekilde bataryanın yüksek hızlı deşarj sürelerinin oluşumunun önüne geçilerek, bataryanın verimliliği arttırılır. Bataryanın bir diğer karektiristik parametresi de deşarj oranıdır. Batarya, kullanılmadığı zamanlarda bile, iç sızıntı nedeniyle zamanla kapasitesini kaybeder. Batarya üreticileri bu sızıntıyı aylık kendiliğinden boşalma olarak adlandırıp ölçümlendirmektedirler. Örneğin, ayda %0.5 oranında aylık kendiliğinden deşarj değerine sahip olan 300 mAH değerli bir batarya, bir ay sonra 1.5 mAH lik kapasitesini kaybeder. Batarya raf ömrü tanımlanırken; mevcut kapasitesinin nominal kapasitesinin %80 oranının altına düşmeden önce depolanabileceği en uzun süre dikkate alınır.

3.5.1 Basit Bir Batarya Ömrü Hesaplama Yöntemi

Batarya ömrü hesaplamasında öncelikle, kullanım senaryosu tanımlanmalıdır. Çizelge 2.2'de örnek bir kullanım senaryosu gösterilmiştir. Bu örnekte, cihaz iç saatiyle her saat uyanır, sensör bilgilerini toplar, Kanal Giriş Prosedürünü (Clear Channel Assessment, CCA) uygulayarak verileri ağ koordinatörüne iletir. Cihaz koordinatörden onay aldıktan sonra uyku moduna geri döner. Kanal giriş prosedürü uygyulanamaz veya koordinatörden onay alınamaz ise cihaz, iletimin başarısız olduğunu ilan etmeden önce çizelgedeki 4–6 adımlarını önceden belirlenmiş sayıda tekrarlar. Tekrar durumunda kullanılan batarya kapasitesi, her bir adımın süresi, tabloda tanımlanan akım tüketim değeri ile çarpılarak hesaplanır. Çizelge 3.2'den gözlemlenen ilginç bir durum, 1x10 mAH'ın kullanılmadığı gerçeğidir.

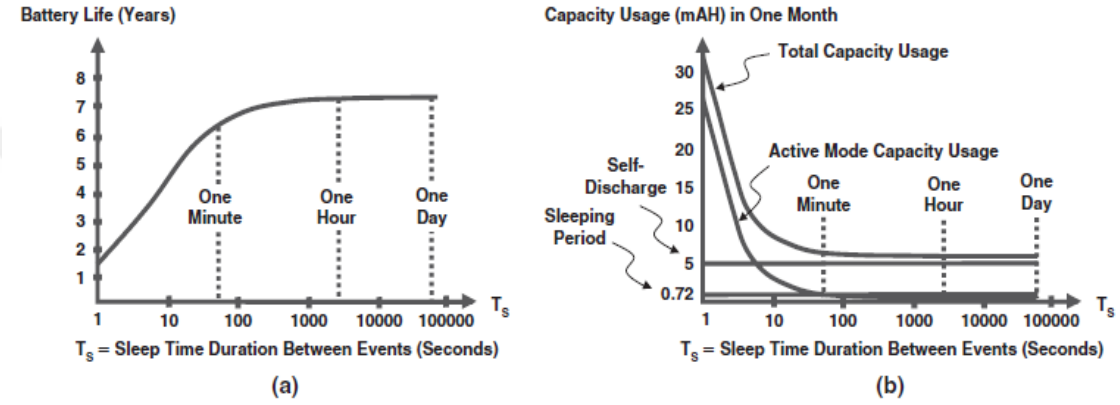
Çizelge 3.2 Basitleştirilmiş Bir Kullanım Örneği Senaryosu

Step	Action	Duration	Average Current	Energy (mAH)
1	Device is in sleep	1 hour	1 μA	1.00×10^{-3}
2	Device transitions to active mode	10 ms	50 μA	1.39×10^{-7}
3	Sensor information is captured, processed, and stored	1 ms	5 mA	1.39×10^{-6}
4	Device is in receive mode to perform CCA	700 μs	20 mA	3.89×10^{-6}
5	Device transmits the packets	550 μs	20 mA	3.06×10^{-6}
6	Device is in receive mode waiting for an acknowledgment	400 μs	20 mA	2.22×10^{-6}
7	Device goes back to sleep			
Total Energy for this event (mAH):				1.01×10^{-3}

ZigBee uygulamalarında batarya ömrünü belirleyen etkin faktör aktif mod ortamala akımı iken çok düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda uyku modu ortalama akımı asıl belirleyici olur.

Batarya ömrü hesaplanmasında ikincil olarak göz önünde bulundurulması gereken unsur; özel uygulama senaryosu için batarya verimliliğini belirlemektir. Bu unsur batarya üreticisi tarafından sağlanan değerler ile elde edilir. Örneğin, belirli bir uygulama için batarya nominal kapasitesi %60 verimlilikle 300 mAH olarak tanımlanmış ise batarya ömrü hesaplamalarında kullanılması gereken asıl kapasite 180 mAH'dir.

Bataryanın kendi kendine deşarj olması, çok düşük devirli uygulamalarda batarya ömrünü belirleyen önemli faktörlerden biridir. Gerçekte 500 mAH kapasiteye ve ayda %1 kendi kendine deşarj olma oranına sahip olan bir batarya ile Çizelge 3.2'de verilen uygulama senaryosuna sahip bir uygulamada; bir ay sonra, aktif mod ve uyku modu sırasında cihazın kullandığı toplam kapasite sırasıyla 0.009 mAH ve 0.72 mAH olacaktır. Buna karşılık, bataryanın bir ay boyunca kendi kendine deşarj olması nedeniyle boşa harcanan enerji 5 mAH olacaktır. Bu değerler gözününde bulundurulduğunda, bataryanın bir ay boyunca kendi kendine deşarj olması, batarya ömrü üzerindeki en büyük etken olarak değerlenirilebilir.



Şekil 3.21 (a) Çizelge 3.2'de gösterilen Senaryo için Batarya Ömrü. Batarya 1000 mAH Nominal kapasiteye, %50 Batarya Verimliliğine ve Ayda %1 Akü deşarjına sahiptir (b) Farklı Faaliyetler İçin Bir Ay İçinde Kullanılan Toplam Kapasite.

Batarya ömrünü yaklaşık olarak hesaplamanın en basit yolu, bataryanın gerçek kapasitesini cihazın uygulama sırasında kullandığı ve kendi kendine dolması nedeniyle deşarj olan toplam kapasitenin toplamına bölmektir.

Şekil 3.21'de görev döngüsünün batarya ömrü üzerindeki etkisi görülmektedir. Aktiviteler arasındaki uyku süresi arttıkça, batarya ömrü artar. Ancak, daha yüksek zaman aralıklarında bu artma oranı yavaşlar, çünkü aktif akım artık batarya ömrüne önemli bir katkı yapmaz. Şekil 3.21b'de, bir aylık süre boyunca aktif mod, uyku modu ve bataryanın kendi kendini şarj etmesi sırasında kullanılan toplam kapasiteyi gösterilmiştir. Şekil 3.21.b'de verilen grafikteki değerlerden, aktiviteler arasındaki uyku süresi bir saniye ise aktif modda bir ay boyunca tüketilen toplam enerji 27 mAH olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, eğer uyku süresi bir dakikaya yükseltilir ise cihaz daha az uyanır ve aktif modda bir ay boyunca tüketilen toplam enerji sadece 0.46 mAH olur. Bu grafik, aktif mod akım tüketiminin bir saatin üzerindeki uyku süreleri için ihmal edilebilir bir etkisi olduğunu göstermektedir.

3.5.2 Batarya Kapasitesini İzleme

Bataryalarda, genellikle bataryanın kalan kapasitesi azaldıkça bataryanın dahili direnci artar. Dahili direnç ne kadar yüksek olursa, batarya gerilimi de o kadar düşük olur. Aktif mod sırasında, en yüksek akım seviyesi bataryadan çekildiğinde, bu gerilim düşüşü maksimum olur. Yeni bir AA batarya 20 mA akım sağlarken sağladığı gerilim değeri 1.5V'un altına düşmez. Ancak bataryanın ömrünün sonuna doğru gerilim değeri 1.0V'a kadar düşebilir. Bu nedenle, batarya gerilimi, yüksek akımda deşarj olurken, pilin kalan kapasitesini gösteren bir gösterge olarak kullanılılabilir. Batarya gerilimini periyodik olarak kontrol etmenin ve gerektiğinde düşük batarya seviyesi uyarısı oluşturmanın en kolay yollarından biri, uygulamada kullanılan alıcı verici cihazı telsiz analog sayısal dönüştürücü (ADC) ile donatmaktır. ADC, cihaz aktif iken ve batarya deşarj hızı yüksek olduğunda batarya seviyesini okumalıdır. Batarya kapasite seviyesini bilmek, uygulamalarımızı önceden planlamanıza ve uygulamada kullanılan cihazların daha etkin kullanılmasını sağlayarak bataryanın potansiyel ömrünü uzatmamıza yardımcı olur.

3.5.3 Güç Tüketimini Azaltma Yöntemleri

Kablosuz bir ağda güç tüketimini azaltmanın iki yolu vardır: daha iyi donanım seçmek ve ağ işletim verimliliğini artırmak. Batarya ömrünü arttırmak için her iki yöntemi de yerinde kullanmak önemlidir.

3.5.4 Donanım Düzeyinde Dikkat Edilmesi Gerekenler

Donanım düzeyinde güç azaltma sezgiseldir. Alıcı/Verici aktif akımın yanı sıra uyku modundaki akım tüketimi de batarya ömrünü doğrudan etkiler. Dinamik güç yönetimi (DPM), bir cihazın donanım seviyesinde farklı çalışma modlarına sahip olmasını sağlar. DPM, yalnızca bir görevi gerçekleştirmek için gereken alt devreleri açma ve gerekmediği durumlarda ihtiyaç duyulmayan alt devreler tarafından tüketilecek olan batarya enerjisini koruma seçeneği sunar. Örnek olarak analog sayısal dönüştürücü (ADC) kullanarak sensör bilgilerini okurken, veriler iletilmeye hazır olana kadar radyo devrelerinin çalıştırılmasına gerek yoktur.

Çizelge 3.3, bir kablosuz cihazdaki çalışma modlarının basitleştirilmiş bir örneğini göstermektedir. Çizelgeki ON (Açık) işareti, belirli bir bloğun açık olduğu anlamına gelir. Mod1 durumunda aktif bir uygulama olmadığından ve tüketilen tek akım, güç kaynağından cihaza giden kaçak akım olduğundan, minimum miktarda akım tüketilir. Mod1'de çalışan saat yok, bu nedenle Mod1'den çıkmanın tek yolu harici bir tetikleyicidir. Mod2'de yalnızca dahili düşük hassasiyetli saat ve regülatör çalıştığından, çok düşük akım tüketimi olur. Mod3, yüksek akım tüketimi pahasına bir kristal osilatör kullanarak zamanı daha doğru takip eder. Mod4, sensör bilgilerini

toplamak ve hafızaya kaydetmek için kullanılır. Mod5, (Mod6) alma ve (Mod 7) gönderme arasında bir geçiş modudur.

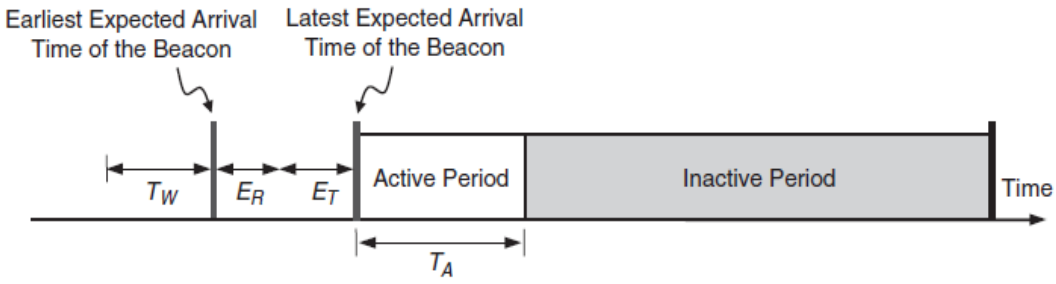
Çizelge 3.3 Basitleştirilmiş Çalışma Modları Örneği

Mode	Receiver	Transmitter	Regulator(s)	High-Frequency Crystal Oscillator	Low-Accuracy Oscillator	RAM	MCU	ADC
Mode 1								
Mode 2			ON		ON			
Mode 3			ON	ON				
Mode 4			ON	ON		ON	ON	ON
Mode 5			ON	ON		ON		
Mode 6	ON		ON	ON		ON		
Mode 7		ON	ON	ON		ON		

Basit uygulamalarda, mikrokontrolür ünitesi (MCU-Microcontoller Unit) güç tüketimi, batarya ömrü üzerinde küçük bir etkiye sahip olabilir. Ancak mikrokontrolür ünitesi yoğun olarak kullanılan uygulamalarda MCU büyük bir güç tüketimi kaynağı olabilir. Bir MCU tarafından tüketilen güç, hem MCU çekirdek gerilimi (V) hem de saat frekansı (f) ile orantılıdır.

$$\text{MCU güç tüketimi} \propto fV^2 \tag{3.1}$$

Saat frekansını veya çekirdek gerilimini azaltmak, anlık güç tüketimini azaltır. Düşük çekirdek gerilimiyle ilgili tek dezavantaj, MCU'nun maksimum saat frekansında çalışamamasıdır. Bunun nedeni, mikroişlemcilerin çoğunda kullanılan CMOS mantığının gerilime bağlı bir maksimum çalışma frekansına sahip olmasıdır ve çekirdek gerilimi azaldığında, saat frekansının da azaltılması gerekir. Saat frekansını düşürmek sistemdeki gecikmeyi arttıracaktır çünkü cihazın hesaplama görevlerini tamamlamak için daha fazla zamana ihtiyacı vardır. Saat frekansını düşürmenin sebep olduğu gecikme, düşük görev döngülü, düşük veri hızlı kablosuz sensör ağlarında herhangi bir aksaklığa neden olmaz. Saat frekansını düşürme yöntemine Dinamik Gerilimi Ölçeklendirme (DVS) denir, çünkü cihaz farklı senaryolarda istenen performansa göre MCU güç tüketimini ve saat frekansını dinamik olarak değiştirebilir. Bu teknik aynı zamanda Dinamik Gerilim ve Frekans Ölçeklendirme (DVFS) olarak da bilinir. Uygulama zaman açısından kritik değil ise tipik olarak çok güç tüketen hassas bir saat yerine düşük frekanslı ve düşük güç tüketimi olan düşük hassasiyete sahip bir saat kullanmak mümkündür.



Şekil 3.22 Bir Düğüm, İşaretçi Beklenen Varış Zamanında Önce Etkin Bir Şekilde Uyanmalı

Düşük hassasiyetli saat, cihazın işaret ulaşmadan hemen önce uyanmasının beklendiği işaretçi etkin uygulamalar için tasarlanmamıştır. Saatin yanlış olması, işaret çerçevesinin beklenen varış zamanında bir belirsizliğe neden olur. Şekil 3.22'de alıcı ve vericideki zamanlama hataları nedeniyle en erken ve en son beklenen işaretçi varış zamanı gösterilmiştir. Alıcıdaki saat yanlışlığı ile ilgili toplam zamanlama hatası E_R ile gösterilir. E_R değeri, işaretçi aralığının bir fonksiyonudur. Örneğin, alıcı kristal frekansı +/- 40pm hataya sahipse ve işaretçi aralığı 61.44ms ise alıcı zamanlayıcı 61.44ms süresini geçtikten sonra +/- 2.46µs hataya sahip olacaktır (E_R=2.46µs). Zamanlayıcının hatayı zaman içinde biriktirdiğinden dolayı, işaretçi aralığı ne kadar uzun olursa, biriken hata da o kadar büyük olduğu anlamına gelir. İşaretçi vericisindeki (E_T) zamanlayıcı hatası benzer şekilde hesaplanır. İşaret ulaştığında alıcının hazır olduğundan emin olmak için, beklenen işaretçi varış saatinden E_R +E_T saniye önce alıcı uyanmalıdır. Alıcı aktif olmadığı süre boyunca uyku modunda bekliyor ise alıcı beklenen işaretçi varmadan önce bir ısınma süresine (T_W) ihtiyaç duyar. Bu nedenle, işaretçi etkin bir ağda bir alıcının işaretçi çerçevesinden sonra aktif süreye (T_A) ek olarak T_{W+} E_R+E_T saniye boyunca aktif kalması gerekir. Çizelge 3.2'de Mod2'deki düşük güç/düşük hassasiyetli bir saatin saat frekans yanlışlığı %30 kadar yüksek olabilir ve bu durum E_{R+} E_T süresini önemli ölçüde arttırır. Bundan dolayı işaretçi etkin bir uygulamada, düşük güç, düşük hassasiyetli bir saat kullanılması tavsiye edilmez.

Bir düğüm zamanının çoğunu uyku modunda geçirebilir ancak uygulama senaryosuna bağlı olarak çok sık uyanabilir. Isınma süresi boyunca tüketilen akım düşük olabilir, ancak devre başlatma süresi çok uzun olursa, uyanma süresi sırasında tüketilen enerji cihazın batarya ömrünü belirgin şekilde düşürür. Bir düğüm, diğer düğümlerle tüm iletişimini her zaman belirli bir yönde gerçekleştirebileceği bir konuma yerleştirilir ise yüksek kazançlı yönlü bir anten, çok yönlü bir antenden daha iyi bir seçim olur. Tek yönlü anten kullanılmasından dolayı elde edilen ilave kazanç, vericiye istenilen yönde aynı RF çıkış gücünü, daha düşük güç tüketimi ile sağlama imkanı verir. Verici de güç tüketiminin gerçekleştiği birim, işaretin havaya gönderilmeden önceki son aşama olan Güç Yükselticisidir. (PA, Power Amplifier). Güç yükselticisi antene gönderilen

RF çıkış gücü ile ölçeklendirilir. Bir antenin pozitif kazancı varsa, güç yükselticisinden istenen RF çıkış gücü düşürülür. Ayrıca yönlü anten kullanımı, başarılı paket alım şansını artırarak hassasiyet seviyesini de iyileştirir.

Enerji hasadı; ısı, ışık veya hareket gibi kaynaklardan elde edilen az miktardaki enerjiyi toplama kabiliyetidir. Bataryaya ilave olarak ikincil bir kaynağın kullanılması, bir cihazın batarya ömrünün uzatılmasını sağlar. Enerji hasadı, ZigBee ağlar için ikincil bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Ancak enerji hasadı ile kaynak sağlanması; çok düşük maliyetli bir çözüm olmayabilir. Bunun nedeni, enerjinin kaynağı her zaman mevcut olmaması veya çevreden alınan enerji miktarı zamanla değişebildiğinden dolayı kararlı bir kaynak olmamasıdır. Bundan dolayı uygulamaya bağlı olarak, enerji hasadı bir düğümdeki enerjinin tek veya ikincil güç kaynağı olarak kullanılması, güvenilir ve kararlı bir çözüm olmayabilir.

3.5.5 Ağ Operasyon Verimliliği

Önceki bölümde, bir düğümün donanım düzeyinde performansı ile batarya ömrü arasındaki ilişki incelendi. Donanım düzeyinde batarya ömrünü doğrudan etkileyen iki unsur; aktif mod sırasında maksimum akım tüketimi ve uyku modundaki kaçak akım tüketimidir. Batarya ömrü yalnızca her bir düğümün donanım düzeyinde performansının bir işlevi değildir, aynı zamanda ağın çalışma verimliliğine de bağlıdır. Ağ oluşturma protokolünü basitleştirmek, bir cihazın ağdaki diğer düğümlerle iletişim kurması için işlem sayısını azaltarak tüketilen güç miktarını azaltır. Yönlendirme mekanizması ve bağlantı maliyetinin seçimi, ağ operasyon verimliliğini etkileyen diğer unsurlardır.

ZigBee standardı, ağ mimarlarınına farklı bağlantı maliyet hesaplama yöntemleri seçme esnekliği sunar. Ağ mimarları planlamada, bir cihazın ağdaki diğer bir cihaza veri iletmeye çalışırken, verilerin iletilmesi için gereken toplam enerji değerini kulanırlar. Paket ek yükü ve yeniden iletimler hariç, saniyede iletilen bitlerin sayısına yararlı iş değeri (goodput) denir. IEEE 802.15.4 standardında veri paketlerinin tümü bir başlangıç alanına sahiptir. Her paketteki başlangıç alanı süresi 120 mikrosaniyeden 1600 mikrosaniyeye kadar değişebilir. Paket yükünün birkaç yüz mikrosaniye kadar küçük bir değere sahip olabileceği göz önüne alındığında, başlangıç alanının iletilmesi ve alınması için ayrılan süre, bir cihazın aktif modda geçirdiği toplam sürenin önemli bir kısmını oluşturur. Yararlı iş biti (Goodbit) başına düşen enerji (Joule/bit, Jpb) değeri, çeşitli ağ yöntemlerinin performansını karşılaştırmak için bir değer olarak kullanılır.

.

$$Yararlı\ iş\ biti\ başına\ düşen\ enerji\ değeri\ (Jpb) = \frac{Ortalama\ Tüketine\ Güç\ (W)}{Goodput(bps)} \quad \textbf{(3.2)}$$

Bir cihaz bir paketi başarılı bir şekilde iletmek için birden fazla iletim durumunda, yararlı iş değeri (goodput) aynı kalır. Ancak yararlı iş değeri (goodput) bit başına enerji iletim sayısıyla orantılı olarak artar. ZigBee ve benzeri düşük veri uygulamaları için geliştirilen standartlar, genellikle aktif modda tüketilen enerjinin uyku modunda tüketilen enerjiden daha az olması ve uzun batarya ömrüne sahip olmasından dolayı, IEEE 802.11 gibi yüksek veri iletimi yapan standartlara kıyasla yararlı iş değeri (goodput) bit başına daha yüksek enerjiye sahiptir. Bu avantaj ZigBee uygulamalarında her yararlı iş değeri (goodput), bitindeki enerjiyi azaltarak değil, görev döngü sayısı düşürülerek sağlanır. Bundan dolayı denklem (3.2), sadece aynı tip uygulamalar için geliştirilen standartları karşılaştırmak için kullanılır.

Alıcının, RF iletim gücünü artırmak, genellikle alıcıdaki sinyalin sinyal-gürültü oranında iyileşme sağlar ve sonuç olarak paket hata oranını (Packer Error Rate,PER) iyileştirir. Güç tasarrufu yöntemlerinden biri de, RF iletim gücünü paket boyutuna göre ayarlamaktır. Belirli bir bit hata oranı (BER) için, daha uzun bir paket, daha kısa bir paket ile karşılaştırıldığında, yüksek bir hata oranına sahiptir. RF iletim gücünün paket uzunluğu ile orantılı olarak arttırılması, PER'i potansiyel olarak iyileştirir ve paketi hedefe başarıyla iletmek için gereken yeniden deneme sayısını azaltır.

Cihazların fiziksel yerleri biliniyorsa, batarya ömrünü optimize etmek için RF iletim gücü, verici ile alıcı arasındaki fiziksel mesafeye bağlı olarak ayarlanır. Bununla birlikte, kanal özellikleri dinamik olarak değiştiğinden dolayı, RF çıkış ayarınında periyodik olarak ayarlanması gerekir. RF çıkış gücünü azaltmak, cihazın anlık güç tüketimini azaltır, ancak güç ayarı belirli bir ortam için çok düşükse, onay alınmadan önce paketler birkaç kez iletilir.

Bir sinyalin alıcıya hava ortamında iletilmesi sırasında yansıma kaynaklı sinyalin zayıflaması veye kaybolması durumunda, RF iletim gücünü artırmak, iletim başarı oranı üzerinde etkin bir fark oluşturmaz. Bu durumlar için anten çeşitliliği, yansıma ortamında başarılı paket iletim oranını artırırken, iletim için gereken deneme sayısını azaltır.

IEEE 802.15.4 kanal erişimi için Çarpışma Önleme ile Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (CSMA/CA) erişim metodu kullanır. Kanal meşgul olduğundan cihaz bir süreliğine iletimi durudurup bekleme durumuna geçer. Bu metod ile iletimde, kullanılan kanalın meşgul olması durumunda, cihaz rastgele bir süre için bekler ve yeniden kanalı kontrolın uygunluğunu kontrol eder.

Bir ağdaki batarya ömrünü olumsuz yönde etkileyen sebeplerden biri de gizli ve açık düğümlerdir. Gizli düğüm olması durumunda, paketler çarpışır ve iletilemez; bundan dolayı paketlerin yeniden iletilmesi gerekir. Açık düğüm olması durumunda, bir paketi ileten düğüm engellendiğinden, cihaz iletimi tekrarlar. İletim tekrarı batarya tüketimini artırır. Düğümlerin yerini değiştirmek, düğümlerin RF çıkış gücünü ayarlamak ve yönlü antenler kullanmak, gizli ve açık düğüm sorunlarını çözmek için kullanılan yöntemlerdir.

3.5.6 Enerji Odaklı Yönlendirme

Ağ ömrü parametresi uygulamaya özeldir. Bir ağın ömrü genellikle ağdaki ilk düğümün bataryasının tükenip, ağdaki paket iletiminin başarısız olmasına kadar geçen süre ile belirlenir. Ağda kalan toplam enerji seviyesi tek bir düğümdeki enerjinin tükenmesinden daha kritik ise ağ ömrü, ağdaki tek tek düğümlerin kalan enerjisinin toplamı olarak tanımlanır. Ağ ömrünü hesaplama metodu, enerji verimliliğini artırmak için kullanılacak yöntemi de belirler. Ağdaki paketleri yönlendirmek amacı ile tüketilen toplam enerjiyi en aza indiren bir yönlendirme yöntemi, ağ ömrünü belirlemek için toplam enerji tüketiminın kullanılması durumunda, en uygun seçenek olur iken, ağ ömrünün, ilk düğüm başarısız olana kadar geçen süre kullanılarak belirlendiği ağlar için uygun bir enerji verimlilik yöntemi değildir. Bir ZigBee ağında mevcut tüm yönlendiriciler bir ana kaynağa bağlıysa, yönlendirmedeki enerji verimliliği kritik değildir. Bu durumdaki ağlar için ağ planlayıcıları güvenlik ve gecikme gibi diğer performans kriterlerine odaklanabilir. Ağ yönlendiricilerinin tümünün ana güç kaynağına bağlı olduğu durumun aksine, yönlendiricilerin çoğu batarya ile çalışıyorsa, yönlendirme enerji verimliliğinde önemli bir kriter haline gelir. Bu tür ağlarda uygun rota seçimi, ağ ömrünü uzatır. ZigBee ağlarda rota seçimi, NWK katmanındaki rota bulma prosedürü ile gerçekleştirilir. Ancak uygulama geliştiricileri, bağlantı maliyet değeri vasıtası ile rota bulma prosedürü sonuçlarını etkileyebilirler. Bu durum ZigBee ağlarda kullanıcıya uygulama seneryosuna göre rota seçme esnekliği sağlamaktadır.

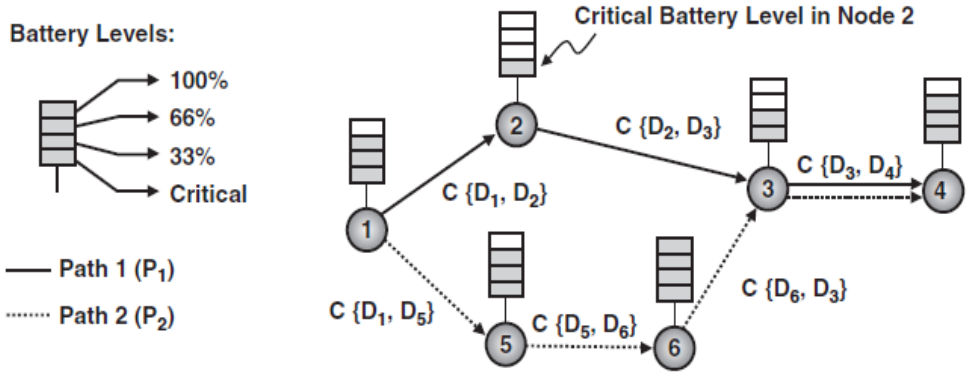
Rota keşfindeki bağlantı maliyet; bağlantı kalitesi, düğümler arasındaki mesafe veya her düğümdeki batarya durumu gibi mevcut bilgilerin bir fonksiyonudur. Evrensel bir optimum yönlendirme mekanizması yoktur. En iyi yönlendirme yöntemi kullanım senaryosuna göre değişir. Gerçek bir ağda düğümlere gelen/giden tüm paketler önceden kestirilememesi, yönlendirme verimliliğini optimize etmekte zorluğuna sebep olur. Bu nedenle, rota seçim mekanizmasının ağdaki gerçek paket trafik dağılımına bağlı olarak zaman içerisinde değiştirilmesi gerekir. Bir sonraki bölümde, yönlendirme verimliliğini artırmak için kullanılan birkaç yöntem incelenmiştir. Rota seçimi ve yönlendirmenin temel amacı, bağlantı kalitesini

düşürmeden, gecikmeye sebep vermeden ağ ömrünü uzatmaktır. Bağlantı kalitesi bir mesajı iletmek için birden fazla girişime neden olarak ağ ömrü süresini azaltır.

3.5.6.1 Batarya Duyarlı Yönlendirme

ZigBee ağlar da kullanılan temel rota bulma metodunda, bağlantı maliyeti fonksiyonunu oluşturmak amacı ile Bağlantı Kalite İndikatörü (Link Quality Indicator, LQI) parametresi kullanılmaktadır. Bu yöntem bağlantı maliyetinin bir parçası olarak enerji tüketimini içermediğinden, enerji duyarlı bir mekanizma değildir. Rota seçiminde LQI ile bir paketi yönlendirmek için tüketilen toplam enerji değerlerini takas ederek bu rota bulma metoduna enerji duyarlılığı ilave edilebilir. Bu yaklaşım her bir paket dağıtımında enerji tüketimini düşürür iken, ağ yapılandırmasına bağlı olarak, bazı düğümlerin çok sık, bazı düğümlerin ise çok nadir, yönlendirme rotalarına katılması gibi bir dezevantajı içermektedir. Bunun sonucu olarak bazı düğümler bataryalarını çok çabuk tüketir. Bu olumsuzluk ağdaki düğümlerin batarya durumuna göre paket trafiğini yönlendirme, yaklaşımı ile çözülür.

Bağlantı maliyeti hesaplanırken, bir düğüm bataryasının kalan (artık) enerji seviyesi de dikkate alınır. Bağlantı maliyeti, LQI'nin bir fonksiyonu olabildiği gibi batarya artık enerjisinin de bir fonksiyonudur. Kalan enerjinin düşük olduğu düğümlerin bağlantı maliyet değeri artırılarak, yeni rotaların bu düğümlerden daha az sıklıkta geçmesi sağlanır. Böylece veri trafiği mümkün olduğunca kritik derecede düşük batarya seviyesi olan düğümlerden geçirilmemektedir. Veri trafiğinin etkin bir şekilde yönlendirilmesi, bir ağdaki düğümlerin bataryalarını daha düzgün bir şekilde tüketmelerini sağlar.



Şekil 3.23 Artık Enerji Duyarlı Yönlendirme

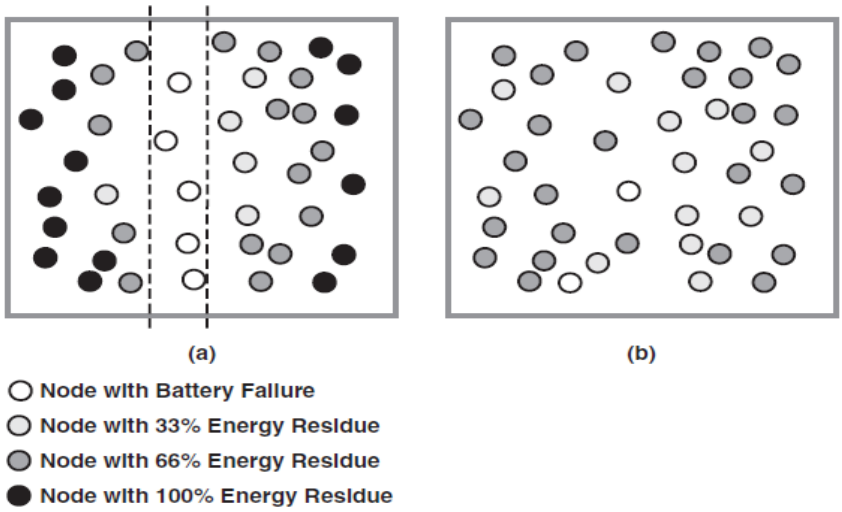
Şekil 3.23 de örnek bir artık enerji duyarlı yönlendirme modeli gösterilmiştir. Bu modele göre yol1 daha düşük gecikme süresi ile paketleri düğüm1'den düğüm4'e iletmek için daha az enerji

tüketimine sahiptir. Ancak düğüm2'nın kalan enerji değeri kritik bir değerde olduğundan dolayı, C {D1, D2} bağlantı maliyet değeri, 5 ve 6 nolu düğüm noktalarının yönlendirme tabloları dolu olmadıkça, LQI ve gecikme kabul edilebilir olduğu sürece paketlerin yol2 boyunca yönlendirilmesini sağlayacak kadar arttırılmıştır.

Bir aygıt enerji hasatı yapabiliyorsa, link maliyeti hesaplanır iken, hasat edilen enerji kalan enerji değerine eklenir. Enerji toplama özelliğine sahip bir düğümün bağlantı maliyet değeri, benzer LQI ve artık enerjiye sahip düğüme göre daha düşüktür.

Düğüm güç tanımlayıcısı, bir düğümdeki güç kaynağının türünü belirtir. Bir düğümün ana güç kaynağından beslemesi var ise artık enerji duyarlı yönlendirme mekanizması, paketleri mümkün olduğunca güç kaynağına bağlı düğümler üzerinden yönlendirmeye çalışır. Güç kaynağına bağlı bir düğüme olan bağlantı maliyeti, benzer LQI seviyesine sahip diğer tüm düğümlerden daha düşüktür.

Batarya arızası bir ağın bölünmesine neden olabilir. Şekil 3.24a'da, düğümlerin artık enerji mekanizması rota seçiminde dikkate alınmadığından, ortadaki düğümler daha sık kullanılır ve bataryaları tamamen boşalır. Bu durumda, ağın iki bölümü birbiriyle iletişim kuramaz ve ağın bir kısmı PAN koordinatörü ile olan bağlantısını kaybeder. Şekil 3.24b'deki ağda ise artık enerji duyarlı yönlendirme mekanizması kullanıldığından dolayı, ağda nispeten düzgün batarya tüketimi sağlanmış ve ağ bütünlüğü korunmuştur.

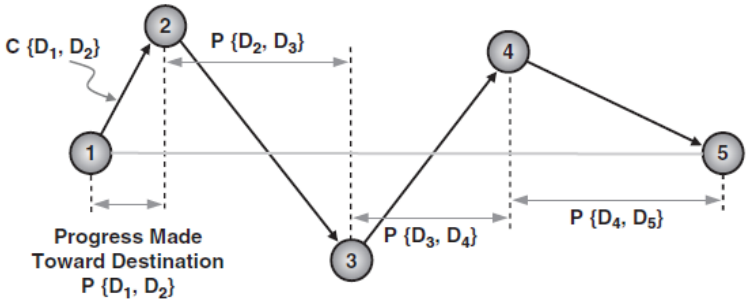


Şekil 3.24 (a) Batarya Arızası Nedeniyle Bölünmüş Bir Ağ ve
(b) Bir Örnek Göreceli Olarak Tekdüzen Enerji Tüketiminin bir Ağ

Kablosuz sensör ağ uygulamaları düşük görev döngüsüne sahip olduklarından dolayı, düğümler batarya kapasitelerini iyileştirme imkanına sahiptir. Uyku modunda, batarya aktif modda kaybedilen kapasiteyi kısmen geri kazanır. Bu bilgi bağlantı maliyetinin belirlenmesinde de dikkate alınır. Bu yöntemde, bataryanın durumu sadece artık enerjiye değil, aynı zamanda düğümün iletim hızına da bağlıdır. Daha yüksek bir iletim hızı, bataryanın paket iletim aralarında kapasitesini artırmak için daha az zamana sahip olduğu anlamına gelir. Daha yüksek aktarım hızına sahip bir düğüme olan bağlantı maliyeti, benzer artık enerjiye sahip bir düğümden daha yüksek olur.

3.5.6.2 Konum Duyarlı Yönlendirme

Fiziksel konum bilgisi genel yönlendirme verimliliğini arttırmak ve trafik akışını kontrol etmek için rota oluşturma algoritmasının bir parçası olarak kullanılır. Kısa mesafeli kablosuz ağdaki düğümlerin yaklaşık fiziksel konumu, belirli algoritmalar kullanılarak belirlenebilir. Bir sonraki düğümün yer bilgisi, bir düğümün RF çıkış gücünü buna göre ayarlamasına yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda, düğümün kendisi bir sonraki düğüm olarak seçilirse hedefe doğru kaydedilen ilerleme miktarını da belirler. Bu bilgi, LQI ile birlikte, bataryada kalan enerji, bağlantı maliyetinin belirlenmesinde kullanılır. Şekil 3.25'de, bir paketin düğüm1'den düğüm5'e iletildiği bir senaryo gösterirmiştir.



Şekil 3.25 Hedefe Doğru İlerleme

Paketi düğüm1'den düğüm2'ye göndererek hedefe doğru kaydedilen ilerleme P {D1, D2} ile gösterilmiş. İlerleme, düğüm1'den düğüm5'e kadar olan toplam doğrusal mesafeye normalize edilirse, tüm ilerlemelerin toplamı 1'e eşit olur:

$$P\ \{D1,\ D2)+\ P\ \{D2,\ D3\}+P\ \{D3,\ D4)+\ P\ \{D4,\ D5\}\ =1 \qquad \textbf{(3.3)}$$

C {D1, D2} maliyet fonksiyonu, P {D1, D2} ile ters orantılı seçilmiştir. Bu şekilde bir sonraki

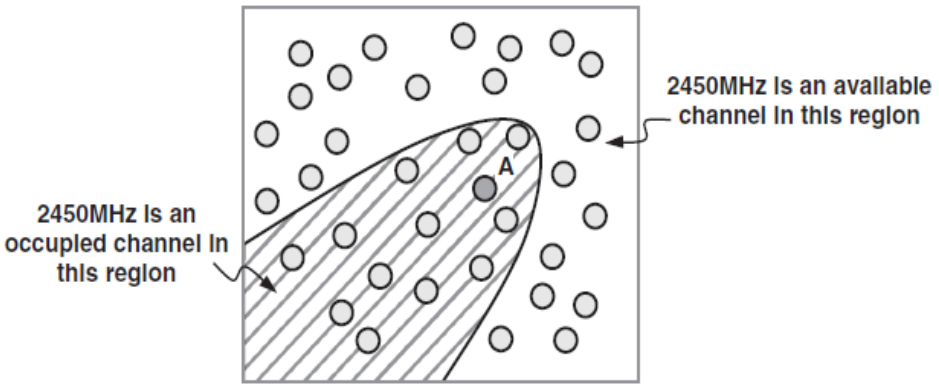
düşük bağlantı maliyetine sahip düğüm seçilerek hedefe doğru ilerleme sağlanmıştır. Varış noktasına doğru ilerleme ne kadar artarsa, bağlantı maliyeti o kadar düşük olur. Bir sonraki düğüm, paketi hedeften uzağa götürürse, P ilerleme fonksiyonu negatif değer alır. Bağlantı maliyeti, yalnızca varış yeri ve bağlantı kalitesine doğru ilerlemenin fonksiyonu değil, aynı zamanda bir sonraki komşu düğümlerin bataryalarının artık enerjisi ve her komşuya paket iletimi için gereken enerji tüketimi gibi bilgilerinde fonksiyonudur.

Uygulama senaryosuna dayalı olarak toplam bağlantı maliyetini belirlemede her girdi farklı bir ağırlığa sahiptir. Bir ağda cihazların konum bilgisi biliniyorsa, ağdaki paketlerin akışı, bağlantı maliyet değerini değiştirerek yönlendirilir. Trafiğin yönlendirmesi ile düğümlerin enerji tüketiminin birbirine yakın olması, dolayısıyla ağ ömrünün iyileşmesi sağlanmaktadır.

3.5.6.3 Yönlü Bir Anten Kullanarak Yönlendirme Verimini Artırma

Ağdaki her bir düğüm yönlendirilebilir bir yönlü anten ile donatılarak yönlendirmenin ağ enerji verimliliği artırılabilir. Yönlü anten, bir yöne doğru yüksek kazanç sağlayan bir antendir. Elektronik olarak yönlendirilebilen bir antenin yönü, mekanik bir hareket olmadan değiştirilebilir. Mekanik hareketler ile değiştirilen antenler büyük miktarlarda enerji tüketir, bu nedenle düşük güçlü kablosuz sensör ağları için uygun anten tipi değildir. Elektronik olarak yönlendirilebilen yönelimli antenler, sabit yayılma özelliklerine sahip basit bir antene kıyasla, bir düğümün maliyetini ve boyutunu arttırır.

Elektronik olarak yönlendirilebilen bir yönlü anten ağda çok sayıda sabit yönlere sahip yönlü anten kullanılan bir noktaya yerleştirilir. Ancak anten bir seferde yalnız bir radyoya bağlanabildiğinden dolayı, anten bir radyoya bağlı iken, diğer radyolar antene bağlı olamaz. Bu Elektronik olarak yönlendirilebilen anten kullanımı, düğüm aktif olarak paket aldığında veya ilettiğinde enerji tüketimini azaltır ve iletilen sinyal istenen alıcıya yönelik olduğundan, çok yönlü antenler kullanmaya kıyasla, istenmeyen girişimleri azaltır. Şekil 3.26'da, gösterilen örnek bir ağda düğümA, aynı anda ağda başka düğümlerde 2450 MHz frekansını kullandığı halde,sinyalleri gölgeli bölgeye iletmek için yönlü anten kullanarak 2450 MHz frekansını kullanır. Aynı frekans, aynı anda iletim yapan düğümlerin yönlü antenlerinin kapsama alanı örtüşmediği sürece tüm ağda kullanılabilir. Yönlü antenler ağdaki girişimi azalttğından, enterferans kaynaklı başarısız iletimden dolayı paketlerin yeniden gönderilme sayısı etkili bir şekilde azalır. Bunun sonucu olarak ağ ömrü uzar.



Şekil 3.26 Yönlü Bir Anten Ağın Bazı Bölgelerinde Gereksiz Girişimi Azaltabilir

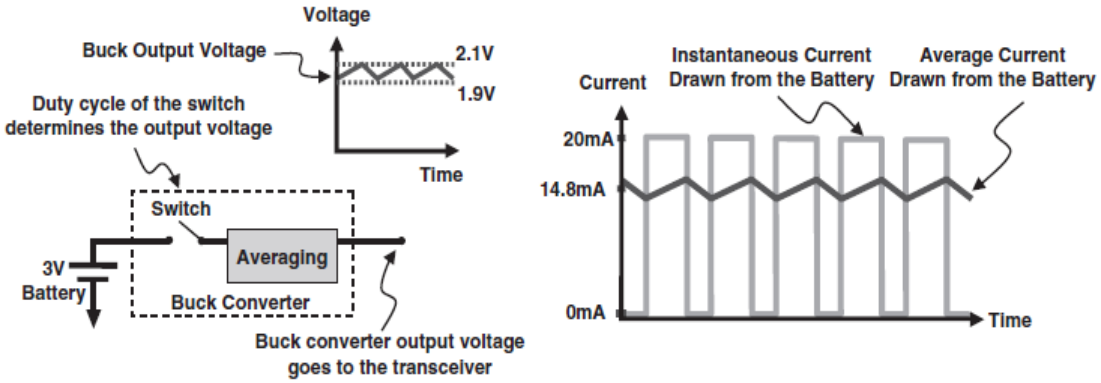
Bu yöntemin dezavantajı ilave karmaşıklıktır. Her bir düğümün yalnızca diğer düğümlerin fiziksel yerini bilmesinin yanında, düğümün antenini doğru zamanda doğru yöne yönlendirmesi gerekir. Anten yönlü olduğunda, rota talebi komutu hedefe doğru gönderilerek, sonraki komşu düğümlerden bazılarının, daha iyi bağlantı kalitesi ile rota isteği komutunu alma şansı artırılır. Başka bir deyişle, bir sonraki düğüm için arama, ağın sınırlı bir bölümünde gerçekleştirilir. Buna karşılık, çok yönlü bir anten, rota isteğini her yöne yayınlar ve gereksiz yere rota keşfi için birçok düğüme bağlanır.

3.5.7 Buck Dönüştürücüler (DC-DC Gerilim Azaltan Dönüştürücüler)

Kablosuz ağlarda kullanılan alıcı verici özelliğine sahip cihazlar genellikle 2 V veya daha az çalışma gerilimine sahiptir. Ancak harici gerilim kaynağı olan, tipik bir yassı batarya veya seri halinde iki adet AA batarya 3 – 3.6V nominal gerilim sağlar. Besleme geriliminin ihtiyaç duyulan minimum gerilimden yüksek olduğu böyle durumlarda, devre içinde kullanılan regülatör blokları, harici besleme gerilimini istenen çalışma gerilim değerlerine düşürür. Tipik bir alıcı-vericide, akım tüketimi batarya geriliminden bağımsız olduğundan, alıcı-verici için ihtiyaç duyulan minimum gerilim değerinden fazla bir gerilim sağlamak, bataryadan çıkan akım miktarını azaltmaz. 3.3V luk AA batarya ile beslenen, 2V çalışma gerilimine sahip bir alıcı-verici bataryadaki ilave 1.3V'u kullanmaz. Ancak, bir dönüştürücü ile alıcı-vericinin ortalama akım tüketimini azaltmak için bu ilave gerilim kullanılır. Şekil 3.272'de 3.3 V batarya geriliminin minimum 2 V'a dönüştürüldüğü temel yapı gösterilmiştir. Bu yapıda batarya, sürekli akım çekmek yerine, bir anahtar bataryayı periyodik olarak ortalama devresine bağlar ve ayırır. Bu anahtarın görev döngüsü çıkış gerilimini belirler.

Anahtarlama devresi ve ortalamanın kombinasyonu, bir buck regülatörü veya DC-DC dönüştürücü olarak adlandırılır. Bir DC gerilimini, anahtarlama ve ortalama yoluyla düşük değerli

bir DC gerilimine dönüştürme etkinliğine buck dönüştürücü verimliliği denir ve bu oran %90 veya daha fazla olabilen bir orandır.



Şekil 3.27 (a) Örnekte açıklanan Buck Dönüştürücü İşleminin Temel Kavramı Anahtarlama Yoluyla 3V Beslemenin 2V Değerine Dönüştürüldüğü Örnek ve Ortalamasının. (b) Pilden Alınan Anlık ve Ortalama Akım

Buck dönüştürücü kullanılarak kazanılan ortalama akımın hesabı için Denklem(3.4) kullanılır:

$$I_B = I_T \frac{Buck\ Convertor\ Output\ Voltage}{Battery\ Voltage \times Convertory\ Efficiency} \quad \textbf{(3.4)}$$

I_B bataryadan alınan ortalama akım ve I_T alıcı-vericiye verilen ortalama akımı ifade eder.%90 verimliliğe sahip bir dönüştürücü, 20mA'yı alıcı-vericiye iletirken 3V akü gerilimini 2V kaynağa dönüştürürse, aküden çekilen ortalama akım 20mA yerine 14.8mA olacaktır.

Bir buck dönüştürücü, hassas RF blokları üzerinde olumsuz etkileri olan, besleme gerilimi üzerinde parazit bir artı değer ortaya çıkarabilir. Dönüştürücü düzgün bir şekilde tasarlanmamışsa, bataryanın yüksek deşarj oranına neden olacak şekilde atılma akımı olarak adlandırılan çok yüksek akım çıkarım sürelerine sahip olacaktır. Bu yüksek akım süreleri çok kısadır, ancak batarya kapasitesini olumsuz yönde etkiler.

3.6 Yer Tahmini Yöntemleri

Bu bölümde, bir nesnenin konumunu belirlemek için bir IEEE 802.15.4 ağında kullanılabilecek üç yöntem incelenmiştir. İlki, alınan sinyal gücünü (Received Signal Strength, RSS) düğümler arasındaki mesafeyi tahmin etmenin bir yolu olarak kullanır. İkinci yaklaşım, eğer biliniyorsa, sinyali ileten düğümün konumunu tahmin etmek için iki veya daha fazla düğümde sinyal varış açısından faydalanır. Son yöntem ise ilgilenilen düğümün konumunu tahmin etmek

için bilinen konumlara sahip çoklu düğümlerde sinyal varış zaman farkını kullanır. Bu üç yöntem arasında, RSS tabanlı konum tahmini, minimum donanım gereklilikleri ve uygulamanın basitliği nedeniyle en fazla öne çıkan yöntemdir.

Çeşitli sayıdaki kısa menzilli kablosuz ağ uygulamalarından biri de, herhangi bir zamanda ağdaki nesnelerin yaklaşık fiziksel konumlarını belirleme uygulamasıdır. Personelin, nesnelerin ve taşınabilir cihazların konumuyla ilgili gerçek zamanlı bilgiler, yönetim verimliliğini artırır. Konum tahmini, bilinen bir dizi referans konumu ile bilinmeyen bir düğümün konum bilgisini elde etme işlemini ifade eder. Düğümlerin konum bilgisi, lokasyona bağlı hizmetler ve uygulamalar sağlama fırsatı sunar. Örneğin, müzedeki bir ziyaretçinin müzedeki konumuna bağlı olarak ziyaretçiye bulunduğu lokasyon ile alakalı bilgiler sağlayan bir ses/video cihazı tasarlanabilir. Bir düğümün konumu, kimlik doğrulama işleminin bir parçası olarak da kullanılabilir.

Kablosuz ağlarda genellikle kısa menzilli radyo frekans (RF) sinyallerini kullanan konum kestirim yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak konum tahmin algoritmasında, RF sinyali yerine ultrason veya kızılötesi gibi başka tür sinyallerin kullanılması da mümkündür. Ultrason, insan işitme kabiliyetinin üstünde olan düşük frekanslı bir sinyaldir. Ultrason sinyali ses hızıyla hareket ettiğinden, vericiden alıcıya olan seyahat süresi biliniyor ise verici ile alıcı arasındaki yaklaşık mesafe, seyahat süresi, ses hızıyla çarpılarak hesaplanabilir. Kızılötesi bir sinyal ışık hızıyla hareket eder. Ancak, bir RF sinyalinin aksine, kızılötesi sinyal nesnelere nüfuz edemez. RF tabanlı bir yer belirleme sisteminde, yer tahmini, kablosuz ağ veri iletişimi ve kontrolü foksiyonlarına ilaveten gelen bir özelliktir. RF tabanlı konumlandırma sistemleri, kızılötesi tabanlı konumlandırma sistemlerine kıyasla büyük ölçekli uygulamalar için daha uygundur.

Kısa menzilli kablosuz ağlar kullanılarak geliştirilen konum tahmin sistemlerini küresel konumlandırma sistemlerinden (Global Positioning System, GPS) ayırmak için yerel konumlandırma sistemleri (Local Positioning System, LPS) olarak adlandırılır. GPS özellikli bir cihaz, dünyayı çevreleyen en az üç ya da daha fazla GPS uydusuna olan mesafeyi hesaplayarak konumunu belirler. Her GPS uydusu sürekli olarak uydu konumunu ve tam zamanı içeren bir mesaj iletir. Bu mesaj, GPS alıcısına ulaşmak için yaklaşık ışık hızında hareket eder. GPS alıcısı, kat edilen mesafeyi hesaplamak için mesajın uydu tarafından iletildiği zaman ile mesajın alındığı zamanı karşılaştırır. En az üç uyduya olan mesafeyi bilerek, alıcı kendi konumunu hesaplar. LPS kullanan uygulamalar, GPS uyduları veya diğer uzun menzilli vericiler tarafından sağlanan bilgileri kullanamaz. Bir LPS sisteminde, konumu bilinen düğümler tarafından iletilen RF sinyalleri veya mobil düğümün kendisini kullanır. Konum tahmin algoritması seçimi, uygulama

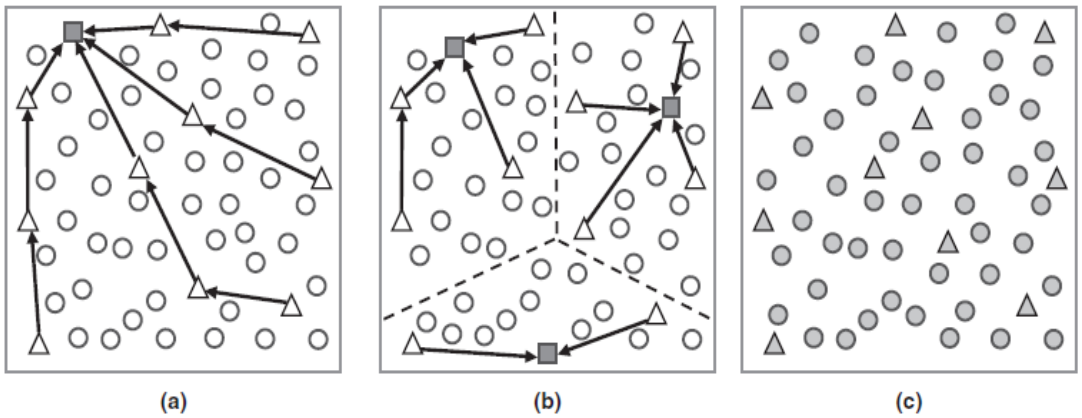
senaryosuna bağlıdır. Konum tahmin yöntemleri performans ve karmaşıklıklarına göre karşılaştırılır. Gerçek konum ile tahmini konum arasındaki mesafe olan konum doğruluğu, en sezgisel performans ölçütüdür. Santimetre aralığında doğruluğa sahip bir konumlandırma sistemi ile birkaç metre aralığında doğruluğa sahip bir konum tahmin hatasının hala kabul edilebilir olduğu bir sistem arasında büyük bir fark vardır. Uygulamanın amacına göre bu kabuller belirlenir. Konum tahmininin amacı bir ofis binasındaki personeli izlemek ise birkaç metrenin aralığında doğruluk yeterli olabilir. ZigBee gibi kısa mesafeli kablosuz ağ protokollerine dayalı olarak uygulanan basit ve düşük maliyetli konumlandırma sistemleri, santimetre aralığında konum tahmini yapabilmektedir. Ultra geniş bant (UWB) sinyalleri kullanan sistemler çok hassas konumlandırma uygulamaları için daha uygundur.

Bir düğümün yerini belirlemek için geçen süre, başka bir performans kriteridir. Çekişmeli kanal erişim süresi boyunca, bir ZigBee düğümünün, kanala bir kaç deneme sonucu erişmiş olması konum belirleme süresini doğrudan etkiler. Nesnelerin yavaş hareket ettiği bir sistemde, konum belirleme süresinin uzaması büyük bir sorun olmaz. Konum belirlemede kullanılan kavramlardan biride, bir LPS'nin kapsayabileceği ve düğümlerin konumunu başarıyla izleyebileceği maksimum fiziksel alanı belirten kapsama alanıdır. Düğüm sayısı arttıkça ve kapsama alanı genişledikçe, konumlandırma algoritmasının ne kadar iyi ölçeklendiğini belirleyen ölçeklenebilirlik de başka bir konum belirleme kriteridir. Düşük maliyetli uygulamalarda, batarya ile çalışan düğümlerin sınırlı hesaplama gücü ve küçük bellek alanı olduğundan, karmaşık konumlandırma algoritmalarını çalıştıramazlar.

Yer tahmini hesaplamalarına dahil olan düğümler iki guruba ayrılır. İlk grup konumları bilinen, sabit düğümlerden oluşur. Bağlantı düğümleri olarak da adlandırılan bu sabit düğümler, yer tahmini için referans olarak alınır. Bağlantı düğümlerinin konumu, montajcı tarafından belirlenebilir veya bağlantı düğümleri kendi konumlarını belirlemek için GPS ile donatılır. GPS, LPS'nin bir parçası olarak kullanılıyorsa, sistem hibrit bir GPS/LPS konumlandırma sistemi olarak kabul edilir. İkinci grup ise izlenen düğümler olarak adalandırılan, konumları bilinmeyen düğümlerdir. Konum tahmininin temel amacı, izlenen düğümlerin yerlerini, sabit düğümler yardımıyla belirlemektir. Sistem, bazı bağlantı (sabit) düğümleri devre dışı bırakıldığında da sistem hatası toleransı denen bir hata oranı ile çalışmaya devam eder.

Yerel konumlandırma sisteminin çalışma prensiplerinin temel adımlarını özetleyecek olursak: Bilinmeyen konuma sahip izlenen düğüm, komşu bağlantı düğümleri tarafından alınan bir sinyal yayar. Bağlantı düğümleri alınan sinyalin gücünü (Received Signal Strength, RSS),

varış zamanını (ToA-Time of Arrival) veya alınan sinyalin varış açısını (AoA-Angle of Arrival) ölçer. Bu ölçülen değerler, izlenen düğümün yaklaşık konumunu belirleyen bir algoritmada girdi değerleri olarak kullanılır. Konum belirleme algoritmaları, bu üç girişten yalnızca birini kullanır. RSS ölçümü çok basittir ve ZigBee düğümleri alınan her paket için RSS'i ölçebilir. Kesin varış zamanının belirlenmesi çok doğru bir saat gerektirir. Varış açısını bulmak donanım değişikliği gerektirdiğinden maliyeti artırır. RF tabanlı konumlandırma algoritmaları; basitliği, minimum veya hiç donanım değişikliği gerektirmediğinden dolayı, konumu tahmin etmek için sadece RSS kullanır.



Şekil 3.28 (a) Merkezi, (b) Bölünmüş ve (c) Dağıtılmış Konum Tahmini İşleme

Şekil 3.28'de yer tahmini için üç senaryo gösterilmiştir. Şekil 3.28a'da, gösterilen seneryoda, merkezi konum işleme düğümü olarak adlandırılan tek bir düğüm konum tahmin algoritmasını yürütmeye adanmıştır. Ağdaki diğer tüm düğümler yalnızca RSS gibi konumla ilgili bilgileri toplar ve merkezi konum işleme düğümüne gönderir. Buna merkezi işlem yaklaşımı denir. Merkezi konum işleme düğümü, izlenen tüm düğümlerin tahmini konumunu hesaplar ve talep edilir ise hesaplanan konumu izlenen her düğüme bildiririr. Merkezi işlem yaklaşımının avantajı, merkezi konum işlem düğümü dışındaki düğümlerin, işlem gücü ve bellek alanını gibi özelliklerininin minimum düzeyde olmasıdır. Merkezi işlem yaklaşımının dezavantajları; yüksek trafik seviyeleri ve tüm düğümlerin konumlarını belirlemek için tek bir düğümle iletişim

kurmalarından dolayı, gecikme süresi oluşturmasıdır. Yüksek trafik seviyesi, ağda darboğazlara neden olur. Bu durum konum güncelleme oranını sınırlar. Merkezi konum işleme düğümüne komşu yönlendirici düğümler batarya ile çalışıyor ise konumlandırma taleplerinin sık sık iletilmesi, yönlendirici düğümlerın bataryalarını hızla boşaltır. Ağ boyutunun artması, gecikme ve trafik sorunları kötüleştirir Bu nedenle, merkezi işlem yaklaşımı, konum güncelleme oranının düşük olduğu küçük ağlar için daha uygundur. Konum güncelleme oranı, düğümlerin tahmini konumunun güncellendiği orandır Örneğin, saniyede bir kez gibi.

Merkezi işlem yaklaşımında trafik darboğazının üstesinden gelmenin bir yolu, ağı bölümlere ayırmak ve konumlandırma algoritmasını her bölüme uygulayan bir düğüm tahsis etmektir. Şekil 3.28b'de gösterilen seneryoda, fiziksel olarak aynı bölümde bulunan düğümler konum belirlemek için bölümdeki konum işleme düğümü ile iletişim kurmaktadır. Şekil 3.28c'de gösterilen seneryoda ilk iki yönteme alternatif bir yaklaşım sunulmaktadır. Sunulan alternatif yaklaşım; yer belirleme görevini ağdaki hemen hemen tüm düğümler arasında dağıtmaktır. Bu yaklaşımda, merkezi bir konum işleme düğümü yoktu. Her düğüm yalnızca yakındaki bağlantı düğümleriyle ve potansiyel olarak diğer izlenen düğümlerle iletişim kurarak kendi konumunu belirler. Dağıtılmış işleme yöntemi olarak adaladırabileceğimiz bu yöntemde, tüm düğümlerin belirli işlem yeteneklerini ve bellek alanı gereksinimlerini karşılaması gerekir. Dağıtılmış işlemencyönteminin avantajlarından biri, ağın boyutunu genişletmeyi kolaylaştıran nispeten düzgün paket trafiğidir.

Farklı konumlandırma yöntemlerini karşılaştırmanın bir diğer avantajı ise belirli konum doğruluğunu elde etmek için gerekli olan bağlantı düğümlerinin dağıtım yoğunluğudur. Yerleştirme yoğunluğu, bağlantı düğümlerinin sayısının kapsama alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, 100 m^2'yi kapsayan 20 bağlantı düğümü varsa, dağıtım yoğunluğu 0.2 düğüm/m^2 dir. Belirli bir konum belirleme doğruluğu için dağıtım yoğunluğu ne kadar düşük olur ise maliyette aynı şekilde düşük olur.

3.6.1 Alınan Sinyal Gücüne Dayalı Konumlandırma Algoritmaları

Alınan sinyal gücü (enerji) olarak adlandırdığımız RSS (Received Signal Strength), ulaşan her paket için ölçülür. Alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI), ölçülen sinyal enerjisi yardımıyla elde edilir. RSSI ve paketin alındığı zaman (zaman damgası) MAC, NWK ve APL katmanlarının tümünde tanımlıdır. Örneğin, bağlantı kalitesi göstergesini (Link Quality Indicator, LQI) oluşturmanın en basit yolu, RSSI'yı bağlantı kalitesinin bir göstergesi olarak kullanmaktır.

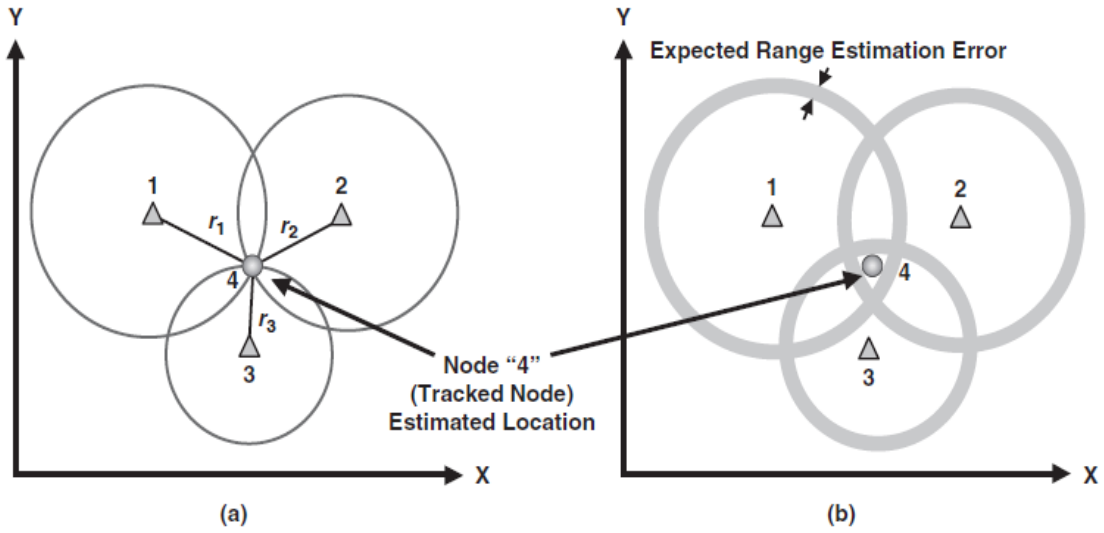
RSSI, basit bir yer belirleme yöntemi geliştirmek için de kullanılabilir. RSSI'nin mevcudiyeti ilave donanım gerektirmeden, konum tahmin sisteminin kurulabileceği anlamına gelir.

RSSI ile ilişkili dört parametre vardır: dinamik aralık, doğruluk, doğrusallık ve ortalama periyodu. Alıcının ölçebildiği minimum ve maksimum alınan sinyal enerjisini gösteren, RSSI dinamik aralığı dB olarak belirtilir. Örneğin, bir alıcı tarafından sağlanan RSSI dinamik aralığı 92dB (–88dBm ile 4dBm arasında) ise alıcının ölçebileceği minimum sinyal enerjisi –88dBm iken, RSSI olarak bildirebileceği maksimum sinyal enerjisi 4 dBm dir. RSSI doğruluğu, alınan her sinyal gücü ölçümü ile ilgili ortalama hatayı gösterir. Ticari olarak temin edilebilen tipik bir alıcı-vericinin, 4dB veya daha iyi tipik RSSI doğruluğu sağlayabilmesi beklenmektedir. RSSI doğrusallığı, belirli noktalardan (logaritmik ölçekte) alınmış gerçek sinyal gücünün maksimum sapmasını gösterir. Alınan sinyal gücü belirli bir süre boyunca ölçülür ve daha sonra RSSI üretmek için ortalaması alınır. Ortalama süre, eğer RSSI LQI üretmek için kullanılacaksa, IEEE 802.15.4'ün gerektirdiği sekiz sembol dönemidir.

İzlenen bir düğümün konumunu belirlemek için en basit yöntem; izlenen düğümün bir sinyal iletmesini talep etmektir. Ardından, en yüksek RSSI'yi bildiren referans düğümün yeri, izlenen düğümün tahmini konumu olarak kabul edilir. Bu yöntemin avantajı, küçük bellek boyutu ve düşük işlem yeteneklerine sahip düşük maliyetli, batarya ile çalışan düğümlere kolayca uygulanabilmesidir. Bununla birlikte, bu yöntemin konum kestirim doğruluğu birçok uygulama için yetersiz olabilir. Bu yöntemin doğruluğunu arttırmanın tek yolu, düşük maliyetli uygulamalarda istenen bir yaklaşım olmayan bağlantı düğümlerinin sayısını artırmaktır.

3.6.2 Trilatrasyon Kullanarak RSSI Tabanlı Konum Tahmini

Muhtemel görüş mesafesi (LOS) yüksek açık bir ortamda, kaba doğruluk kabul edilebilir ise RSSI tabanlı basit bir yer tahmin algoritması kullanmak mümkün olabilir. Şekil 3.29a'da bilinen sabit konumlara sahip üç düğümün (düğüm 1, 2 ve 3) olduğu ideal bir yer belirleme senaryosu gösterilmiştir. Dördüncü düğüm mobildir ve amaç dördüncü düğümün tahmini iki boyutlu konumunu belirlemektir. İki boyutludan (2D) kastedilen, yalnızca düğümün X ve Y koordinatlarının tahmin edilmesidir. Aynı yaklaşım üç boyutlu (3D) uzay için de kullanılabilir. Şekil 3.29a'daki yer tahmini hesaplamasına, düğüm4'ün önceden tanımlanmış çıkış gücüne sahip bir sinyal iletmesi ile başlanmıştır.



Şekil 3.29 Trilatrasyon Kullanarak Konum Tahmini (a) İdeal Durum ve (b) Aralık Tahmini Hatası ile

Şekil 3.29a'daki tüm düğümlerin çok yönlü antenlere sahip olduğu varsayıldığında, sabit düğümlerin (düğüm1, düğüm2, düğüm3) her biri için denklem (3.5) kullanılarak, konumu ve düğüm 4'ün konumu arasındaki mesafe (r) tahmin edilebilir:

$$P_R = P_T - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(r) + 30 \times n - 32.44(dBm) \quad \textbf{(3.5)}$$

P_T, düğüm4 tarafından iletilen güçtür (dBm cinsinden), P_R, sabit düğüm konumundaki RSS'dir; f, MHz'de iletilen sinyal frekansıdır, n, yol-kayıp üssüdür ve r ise metre cinsinden uzaklıktır.

Örneğin; Düğüm1, düğüm4 ile arasındaki mesafeyi (r1), RSS ile tahmin edebilir. Düğüm1 tarafından yapılan tek ölçümden, çıkarılabilecek yegane sonuç düğüm4'ün, düğüm1 merkezli, r1 yarıçaplı bir daire çevresi üzerinde konumlandığıdır. Öklid mesafesi kullanılarak, denklem (3.6) yazılabilir:

$$(X_1 - X_4)^2 + (Y_1 - Y_4)^2 = r_1^2$$

veya **(3.6)**

$$(X_1 - X_4)^2 + (Y_1 - Y_4)^2 - r_1^2 = 0$$

(X1, Y1) ve (X4, Y4) sırasıyla düğüm1 ve düğüm 4 için koordinatlardır. Düğüm2 koordinatları (X2, Y2) ve düğüm3 koordinatları (X3, Y3) için benzer denklemler türetilebilir. Bu nedenle,

düğüm4'ün yerini bulmak için denklem (3.7)'yi sağlayan (X4, Y4) değerlerinin bulunması gerekir:

$$\begin{bmatrix}(X_1 - X_4)^2 + (Y_1 - Y_4)^2 \\ (X_2 - X_4)^2 + (Y_2 - Y_4)^2 \\ (X_3 - X_4)^2 + (Y_3 - Y_4)^2\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 \\ 0 \\ 0\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.7)}$$

Şekil 3.29a'da gösterilen ideal senaryoda, bu denklemi sağlayan bir çift koordinat (X4, Y4) olacaktır. Üçgenlerin geometrisini kullanarak düğümlerin göreceli konumunu belirlemeye yönelik bu yöntem, trilaterasyon olarak adlandırılır. Bununla birlikte, pratik bir uygulamada, ölçüm hataları nedeniyle denklem 3.7'deki eşitliğin sağ tarafını herhangi bir değer için gerçek bir sıfır vektör yapmak mümkün olmayabilir (X4, Y4). Alıcı-vericiler tarafından sağlanan RSSI, sınırlı hassasiyetlere sahiptir. Bu durum düğümler arasındaki tahmini mesafeyi doğrudan etkiler. Deneysel olarak belirlenen yol kaybı, büyük bir hata kaynağıdır. Şekil 3.29b'de gösterildiği gibi, her bir sabit düğüme bağlı daireler, gerçek aralık kestirim hatası beklenen aralık kestirim hatasından yüksek olduğunda, ortak bir kesişme noktasına bile sahip olmayabilir. Denklem 3.7'nin sağ tarafını gerçek bir sıfır yapmak mümkün olmadığından, bunun yerine bir hata vektörü (E) tanımlanabilir:

$$abs\left(\begin{bmatrix}(X_1 - X_4)^2 + (Y_1 - Y_4)^2 \\ (X_2 - X_4)^2 + (Y_2 - Y_4)^2 \\ (X_3 - X_4)^2 + (Y_3 - Y_4)^2\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2\end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix}e_1^2 \\ e_2^2 \\ e_3^2\end{bmatrix} = \text{E} \quad \textbf{(3.8)}$$

burada abs (.) mutlak değer fonksiyonudur.

$$Karesel\ Hata = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 \quad \textbf{(3.9)}$$

Bu durumda konum tahmininin amacı denklem 3.8'deki karesel hatayı en aza indiren bir çift kordinat (X4, Y4) bulmak olur. Bu hata fonksiyonunun değerini en aza indirmek, yinelemeli veya yinelemesiz yöntemlerin kullanıldığı klasik optimizasyon probleminin basit bir örneğidir.

RSSI tabanlı konum tahmini, bilinen konumlara sahip üçten fazla sabit düğüm olduğunda da kullanılabilir. Bu şekilde, bilinmeyen bir konuma sahip olan düğüm tarafından iletilen sinyal, yalnızca üç düğüm yerine birkaç düğüm tarafından alınacaktır. Denklem 3.8'deki satır sayısı, yer tahminine katılan sabit düğüm sayısı ile orantılıdır. Sabit düğümlerin sayısının arttırılması, bazı uygulamalarda konum tahmini doğruluğunu iyileştirir. Konum tahmininde sadece yakındaki düğümleri dahil etmek de mümkündür. Her bir bağlantı düğümü tarafından alınan paketin RSSI değeri, düğümler arasındaki mesafeyi belirtir. Bir bağlantı düğümü, konum tahmini işleminin bir

parçası olarak izlenen düğümden bir paket alırsa, bağlantı düğümü yalnızca alınan paketin RSSI değeri belirli bir sınırın üzerindeyse konum tahminine katılır. RSSI sınırını değiştirerek, yer tahminine katılan bağlantı düğümlerinin sayısı artırılıp veya azaltılabilir. Bu bölümde incelenen RSSI ile yer tahmin metodu, pratik bir konumlandırma yöntemi olmak için daha fazla iyileştirme gerektirir. Bu yöntem, bir ofis veya endüstriyel depo gibi çok yollu ortamlar için uygun değildir.

3.6.3 RSSI ile Konum Tahmininde Hata Kaynakları

RSSI tabanlı konum tahminindeki hata kaynakları üç ana kategoriye ayrılır: donanımla ilgili hatalar, konum tahmin algoritmasından kaynaklı kısıtlamalar ve çevre etkisi. Bu bölümde, bu hata kaynaklarının yer belirleme doğruluğu üzerindeki etkisi kısaca gözden geçirilecektir.

Vericinin önceden belirlenmiş bir kuvvette bir sinyal iletmesi beklenir. Bununla birlikte, düşük maliyetli, kısa menzilli kablosuz ağlar için oluşturulan alıcı vericiler normalde yalnızca basit bir çıkış gücü kontrol mekanizmasına sahiptir ve donanım üreticileri, belirli bir çıkış gücü ayarı seçildiğinde yalnızca bir miktar çıkış gücü garanti eder. Bu bir hata kaynağıdır ve aynı zamanda ortam sıcaklığına da bağlı olarak değişir. Belirtilen bu hata, anten kaynaklı belirsizliği içermez. Antenin kendisi de, iletilen sinyal gücünün doğruluğunu düşürebilir. Antene bağlı zayıflama miktarı, alıcıya gelen sinyal açısına bağlı olduğundan dolayı, anten iletim paterni, alıcı tarafındaki sinyal gücü ölçümlerinin doğruluğunu etkiler. Basit konum kestirim algoritması, anten iletim paterni değişimlerini hesaba katmaz. RSSI hatası sabit bilinen bir değer ise ve ortamın veya düğümün konumunun bir fonksiyonu değil ise ölçülen RSSI değerini, bilinen bir RSSI ofseti ekleyerek ayarlamak mümkündür.

Alıcı normal olarak alınan sinyal gücünü ölçmek için basit bir mekanizma kullanır. Gerçek alınan sinyal gücü ile rapor edilen değer arasındaki fark, yer tahmininde bir hata kaynağıdır. Alınan sinyal gücü RSSI'yi oluşturmak için kuantize edilir. Kuantizasyon işlemi, herhangi bir RSSI bazlı konum-tahmin yöntemi için kaçınılmaz bir hata kaynağı olacaktır.

Yer belirleme algoritmasının kendisi yer belirleme hatasına sebep olabilir. Bir optimizasyon algoritması global minimum yerine yerel minimumu kullanabilir. Yerel minimum, bir girdi değeri aralığı için bir fonksiyonun en düşük noktasıdır, ancak yerel minimum, bir fonksiyonun mümkün olan en düşük değeri olmayabilir. Genel minimum, tüm olası girişler için bir fonksiyonun en düşük değeridir.

Çevrenin etkisi doğal olarak, yer belirleme hata kaynakları içinde en zorlu olan kaynaktır. Çok yolluluk, alınan sinyal gücünü büyük ölçüde etkiler. İzlenen düğümün hareketliliği, solma (fading) kanalında dinamik bir değişime neden olur ve solma etkisini telafi etmeyi daha zorlaştırır. Anten çeşitliliği veya kanal kestirim yöntemleri solma etkisini azaltan yöntemlerdir.

RSSI ölçüm süresinin arttırılması veya RSSI ölçümünün birkaç kez tekrarlanması, bazı uygulamalarda ağ ömrünü azaltma ve konum güncelleme oranını düşürme pahasına ölçüm hatasını azaltabilir. Ancak, hatanın kaynağına bağlı olarak, ölçüm sayısını artırmak her zaman doğruluğu iyileştirmez.

Kanal özelliklerini tahmin etmenin iki yöntemi vardır: deneysel veya teorik. Ampirik yaklaşımda, gerçek bir saha araştırması yapılır ve sinyal kuvveti birkaç yerde ve zamanda ölçülür. Ölçülen veriler, solma etkisini göz önünde bulunduran bir model oluşturmakta kullanılır. RSSI ölçümünü sabit bir yerde tekrarlayarak, kanalın istatistiksel modelini tahmin etmede kullanılan, RSSI değerlerinin histogramı oluşturulur.

Teorik yaklaşımda; iç ortama ilişkin gerçek ölçüm gerektirmeyen mevcut bilgiler ile beklenen kanal özellikleri modellenir. Işın izleme yöntemi; saha araştırması yapmadan mevcut iç mekan yerleşim planı, çevredeki malzemelerin yansıma katsayıları bilgilerini kullanılarak elde edilen popüler bir yöntemdir. Teorik yaklaşımın avantajı, yoğun emek gerektiren saha araştırmalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmasıdır. Ampirik yöntem, eğer doğru bir şekilde uygulanırsa, teorik kanal modelinin sunabileceğinin ötesinde doğruluğu geliştirme avantajına sahiptir.

3.6.4 Konum Parmak İzine Dayalı Konum Tahmini

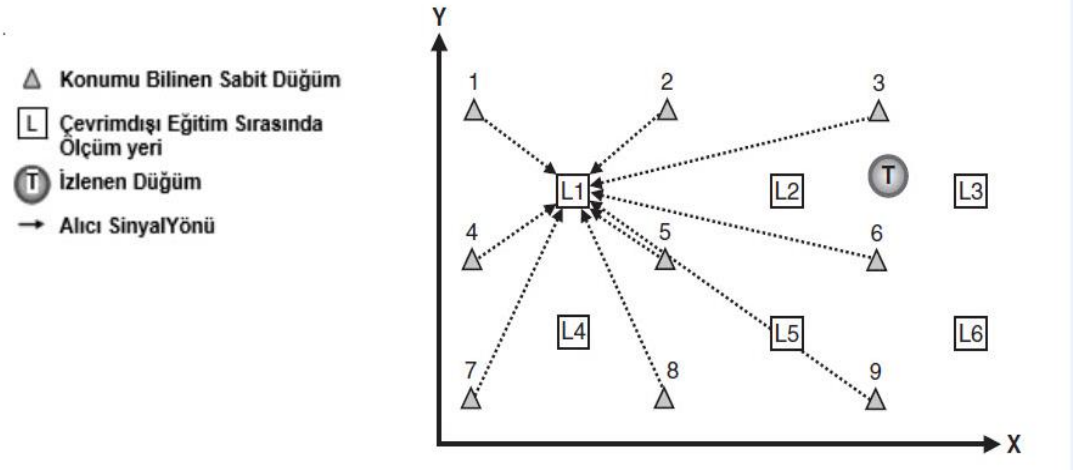
Konum parmak izi uygulamasına dayalı konum tahmini, iki aşamada gerçekleştirilir. İlk aşama, bir saha araştırması (çevrimdışı eğitim) kapsamında belirli konumlardaki bağlantı düğümlerinden gelen sinyallerden ölçülen RSSI değerleri ile bir veritabanı oluşturmaktır. İkinci aşama ise (gerçek zamanlı aşama), izlenen her düğüm, bağlantı noktalarından alınan sinyallerin gerçek zamanlı olarak ölçülen RSSI değerlerini, veritabanında bulunan karşılıklarlarına tekabül eden RSSI değerleri ile karşılaştırmaktır. Ardından konumları belirlemektir (Bahl ve Padlaman 2000).

Bu yöntemin temel kavramları Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Bilinen konumlara sahip sabit düğümler 1-9 arasında numaralandırılmıştır. Bu sabit düğümler (çapa düğümleri) örtüşen kapsama alanlarına sahiptir. Düğümler arasındaki fiziksel mesafelerin mutlaka eşit olması gerekmez. Bir ortak örtüşme alanındaki iki sabit düğüm arasındaki en küçük mesafe, örtüşme alan aralığı olarak bilinir. Birinci aşamada, önceden belirlenmiş her L1-L6 konumuna bir alıcı yerleştirilir yerleştirilir ve sabit düğüm1 ile düğüm9 dan alınan sinyallerin RSSI değerleri ölçülür ve bir dizide saklanır. Tipik olarak, alınan sinyal gücünün, logaritmik olmayan ölçekte dizisi, SS

gösterimi ile temsil edilir. Örneğin, L1 konumunda, alınan sinyal gücünü içeren dizi denklem (3.10)'da gösterilmiştir:

$$SS_{LI=} [SS_{LI\,1}\ SS_{LI\,2}\ \ldots\ SS_{LI\,9}\ ] \qquad \textbf{(3.10)}$$

burada SS_{L1} terimi, L1 konumundaki çapa düğümünden alınan sinyalin gücüdür. Ll'den L6''ya kadar bütün lokasyonlarla ilişkili sinyal gücü bilgisini içeren veri tabanı, radyo haritası olarak adlandırılır. Uygulamada, bilinen konumdaki Ll-L6'daki sinyal kuvveti, birçok kez ölçülür ve sinyal kuvveti dizisi, 1-9 sabit düğümlerinden alınan sinyallerin mukavemet istatistiki ortalamasını içerir. Her bir konumdaki sinyal gücü değerleri dizisi, o yerin parmak izi (veya RF imzası) olarak bilinir.



Şekil 3.30 Parmak İzine Dayalı Konum Tahmini

Belirli bir konumdaki sinyal gücü, veri toplayıcı yönüne bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Bir yönde, anten bir bağlantı düğümüne görüş hattı (LoS) bağlantısına sahip olabilir, zıt yönde ise kişinin vücudu bir engel oluşturabilir. Kişinin vücut yönünü, yerin RF imzasının bir parçası olarak dahil etmek veya ölçümü farklı yönelim ve ortalama ölçülen sinyal gücü ile tekrarlamak mümkündür. Yer belirleme sistemi uygulandıktan sonra, parmak izi alınmasına dayanan yer tahmininin doğruluğu zaman içinde ölçülen ilave veri noktaları toplanarak ve eğitim aşaması için oluşturulan veritabanına eklenerek iyileştirilebilir.

Eğitim aşamasının tamamlanmasından sonra, Şekil 3.30'daki izlenen düğüm, alma moduna girerek, her bir sabit düğümden iletilen sinyalleri alırarak, kendi konumunu belirler.

Alma modunda alınan her sinyal için, sinyal gücü hesaplanarak, izlenen düğümün mevcut lokasyonu ile ilişkili (3.11)'de belirtilen bir dizi oluşturulur:

$$SS_{current} = [SS_{current1}\ SS_{current2} \ldots\ SS_{current9}] \quad \textbf{(3.11)}$$

burada $SS_{current\ i}$ terimi, izlenen düğümün o andaki i.indekli sabit düğümünden alınan sinyalin gücüdür. Öklid mesafe, gerçek zamanlı faz sırasında ölçülen mevcut sinyal gücü dizisi ile bilinen her bir yer ile ilişkili sinyal gücü dizisi arasında fark yardımı ile mesafeyi belirlemek için kullanılabilir. Örneğin, SS_{L1} ve $SS_{current}$ arasındaki Öklid mesafesi, denklem (3.12) ile hesaplanabilir:

$$\boldsymbol{d}(SS_{current}, SS_{LI}) = \sqrt{(SS_{current1} - SS_{LI\,1})^2 + (SS_{current2} - SS_{LI\,2})^2 \ldots + (SS_{current2} - SS_{LI\,2})^2}$$

$$d(SS_{current}, SS_{LI}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{9} (SS_{current\,i} - SS_{LI\,i})^2} \quad \textbf{(3.12)}$$

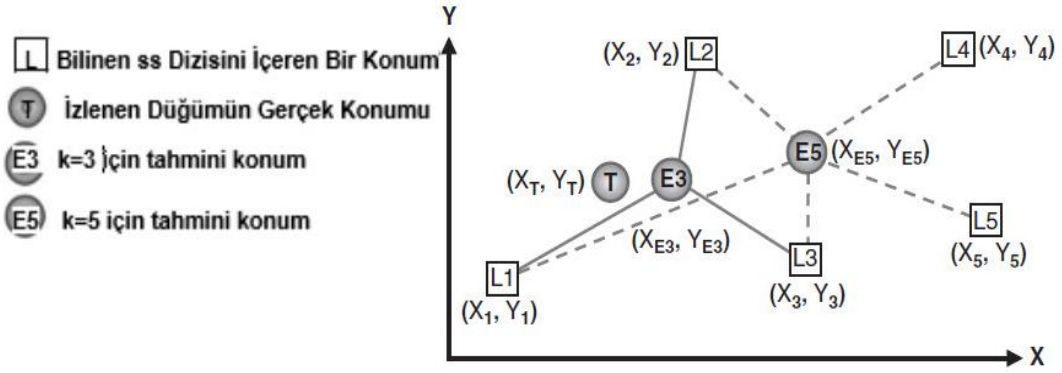
$d(SS_{L1}, SS_{current})$ terimi, diziler arasındaki mesafeyi ifade eder. İzlenen düğümün geçerli konumu L1 konumunda ise teoride, SS_{L1} ve $SS_{current}$ dizileri aynıdır ve mesafeleri sıfırdır (d=0). Bununla birlikte, pratikte çevre dinamiktir ve bu nedenle bu vektörler aynı olmayacaktır. Başka bir deyişle, L1 konumunda, SS_{L1} ve $SS_{current}$ arasındaki mesafe küçüktür, ancak sıfır değildir. Bu mesafe fiziksel bir mesafe değildir ve sadece SS_{L1} ile $SS_{current}$ sinyal gücü dizilerinin benzerliğinin bir göstergesidir.

Gerçek zamanlı fazda, izlenen düğümün konumunu belirlemek için en basit yöntem, en yakın tek komşu tekniğidir. Bu yöntemde izlenen düğüm, gerçek zamanlı ölçülen sinyal gücü dizisi ($SS_{current}$) ile L1 ile L6 konumlarıyla ilişkili sinyal gücü dizisi (SS) arasındaki Öklid mesafesini hesaplar. İzlenen düğümün konumunun basitçe L1 ile L6 bilinen konumlardan birine eşit olduğu tahmin edilmektedir, burada $SS_{L1\ i}$ dizisi, $SS_{current}$ dizisine minimum mesafedir. En yakın tek komşu yönteminin avantajı basitliğidir. Dezevantajı ise konum tahmin doğruluğunu iyileştirmek için bilinen konumların geri kalanıyla ilişkili olan mevcut dizilerden yararlanmamasıdır.

En yakın tek komşu konum tahmini metodunun doğruluğunu iyileştirmek için Şekil 3.31'de gösterilen en yakın k komşu (K- Nearest Neighbor, KNN) yöntemi kullanılır. Bu yöntemde izlenen düğüm; SS dizisi, izlenen düğümün $SS_{current}$ dizisine en düşük mesafeye sahip olan, k sayıda lokayon belirler. KNN tekniğinde, izlenen düğümün tahmini konumu bu bilinen k konumların ortalaması alınarak hesaplanır:

$$\begin{cases} X_E = \frac{1}{k}X_1 + \frac{1}{k}X_2 + \cdots + \frac{1}{k}X_k = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} X_i \\ Y_E = \frac{1}{k}Y_1 + \frac{1}{k}Y_2 + \cdots + \frac{1}{k}Y_k = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} Y_i \end{cases} \quad (\mathbf{3.13})$$

(X_E, Y_E), izlenen düğümün tahmini konumu ve (X_1, Y_1) ile (X_k, Y_k), en yakın komşuların koordinatlarıdır. Başka bir deyişle, izlenen düğümün tahmini konum, en yakın komşulara olan toplam Öklid mesafesini en aza indiren konumdur. Örneğin, Şekil 3.31'deki L1 konumunun $SS_{current}$ dizisine en küçük mesafeye sahip SS dizisine sahip olduğunu ve L2 ve L3'ün sonraki en yakın iki diziye sahip olduğunu varsayalım:



Şekil 3.31 k-En Yakın Komşu (KNN) Metodunda K Artışının Etkisi

$$d(ss_{current}, ss_{L1}) < d(ss_{current}, ss_{L2}) < d(ss_{current}, ss_{L3}) \quad (\mathbf{3.14})$$

En yakın komşu yönteminde, L1 izlenen düğümün tahmini konumu olacaktır. k=3'e sahip k-en yakın komşularında, izlenen düğümün tahmini konumu Şekil 3.31'deki E3 olur. Bu konum, izlenen düğümün gerçek konumuna en yakın komşu yöntemi tarafından sağlanan tahminle karşılaştırıldığında daha yakındır. K değerini arttırmak, konum tahmin doğruluğunu gerektiği gibi iyileştirmeyecektir. Örneğin, Şekil 3.31'de k'nin 3'e eşit olduğu tahmin edilen konum, k'nin 5'e

eşit durumdan daha iyi bir tahminde bulunur. Bunun nedeni, k'nin değerini artmasının sonucu olarak, uzaktaki düğümlerin hesaba katılması ve tahmin hatasının artmasıdır.

Ağırlıklandırılmış en yakın komşu yöntem, KNN tekniğinin konum tahmin doğruluğunu daha da iyileştirir. KNN yaklaşımında, seçilen tüm k komşular ($SS_{current}$ dizisinden ilişkili SS dizilerinin mesafelerine bakılmaksızın) tahmini konumun belirlenmesinde eşit ağırlıkta ele alınır. Bu komşular arasındaki farkları göz ardı etmek bir hata kaynağı olabilir çünkü izlenen düğüm bazı komşulara diğerlerinden daha yakın olabilir ve bu bilgi izlenen düğümün konumunu tahmin etmek için en yakın tüm komşuların konumlarının ortalaması alınarak kaybolacaktır. Ağırlıklı k en yakın komşuluk yönteminde, izlenen düğümün konumunu tahmin ederken, $SS_{current}$'den en yakın her k ile ilişkili SS dizisinin mesafesi dikkate alınır:

Bazı durumlarda, iki vektör arasındaki Öklid mesafesinin sıfır olması mümkündür. Denklem 3.16'da sıfıra bölünmeyi önlemek için, tüm paydalara küçük (önemsiz) bir d_0 değeri eklenir

$$\begin{cases} X_E = \frac{1}{D}\left(\frac{1}{d(ss_{L1}, ss_{current}) + d_0} X_1 + \frac{1}{d(ss_{L2}, ss_{current}) + d_0} X_2 + \cdots + \frac{1}{d(ss_{Lk}, ss_{current}) + d_0} X_k\right) \\ Y_E = \frac{1}{D}\left(\frac{1}{d(ss_{L1}, ss_{current}) + d_0} Y_1 + \frac{1}{d(ss_{L2}, ss_{current}) + d_0} Y_2 + \cdots + \frac{1}{d(ss_{Lk}, ss_{current}) + d_0} Y_k\right) \end{cases}$$

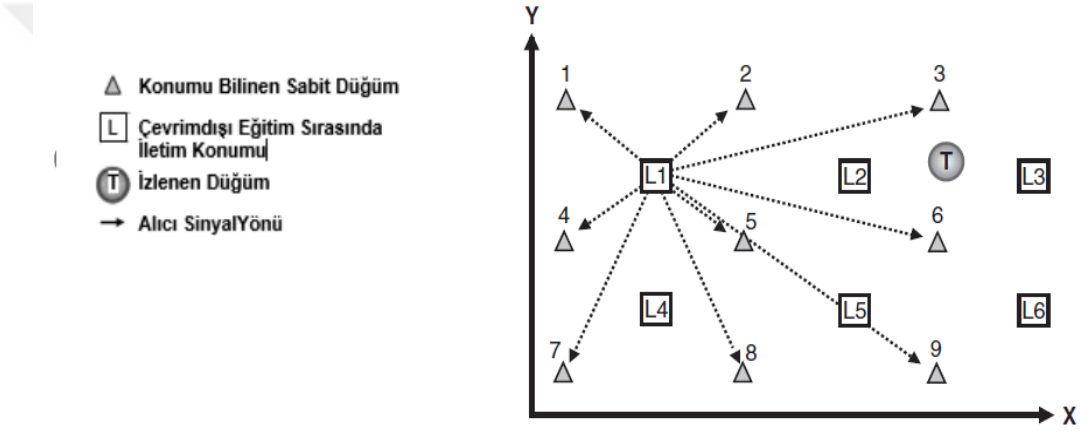
$$\begin{cases} X_E = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{d(ss_{Lk}, ss_{current}) + d_0} X_i \\ Y_E = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{d(ss_{Lk}, ss_{current}) + d_0} Y_i \end{cases} \quad \textbf{(3.15)}$$

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{d(ss_{Li}, ss_{current}) + d_0} \quad \textbf{(3.16)}$$

Şimdiye kadar tarif edilen konum tahmin yönteminde, izlenen düğümün yeri her güncellendiğinde, izlenen düğüm alma moduna girerek, sabit düğümlerden aldığı sinyallerin, sinyal gücünü hesaplayıp elde ettiği değerleri, mevcut konumuyla ilişkili sinyal gücü (SS) dizisini oluşturmak için kullanıyordu. Bu yönteme alternatif,izlenen düğümün verici, diğer tüm sabit düğümlerin ise alıcı olduğu yöntemdir.Şekil 3.32'de gösterilen bu alternatif yöntemde, çevrimdışı eğitim sırasında verici L1 konumuna yerleştirilir. Bu konumdan gönderilen sinyal bilinen konumlara sahip sabit düğümler tarafından alınır. Her bir sabit düğüm, alınan sinyal gücünü ölçer ve L1 konumu ile ilişkili sinyal gücü (SS) dizisi oluşturur (SS_{L1}). Bu işlem L2'den L6'ya seçilen

konumların geri kalanı için tekrarlanır. İkinci aşamada (gerçek zamanlı mod), izlenen düğümün konumunu tahmin etmeye her ihtiyaç duyulduğunda, izlenen düğüm, tüm sabit düğümler (1den 9 'a) tarafından alınacak bir sinyal iletir. Sabit düğümlere ulaşan sinyallerin ölçülen sinyal gücü ile izlenen düğümün konumu tahmininde kullanılan, (SS) dizisi oluşturulur.

Çoğu ortamda, RF yayılma özelliklerinin simetrik olduğu gerçeği göz önüne alındığında, bu alternatif yaklaşımın doğruluğunun, izlenen düğümün bir verici yerine bir alıcı olarak hareket ettiği önceki senaryo ile aynı olması beklenir. Parmak izi tekniklerinin doğruluğunu arttırmak için istatistiksel yöntemler kullanılabilir. Örneğin Bayesian filtre yöntemi, gürültülü gözlemlerden bir yeri olasılıkla tahmin etmenin bir yoludur. Bayesian filtresinin bir değişkeni olan Kalman filtresi, hesaplama etkinliği nedeniyle konum tahmini ve izlemede yaygın olarak kullanılır.

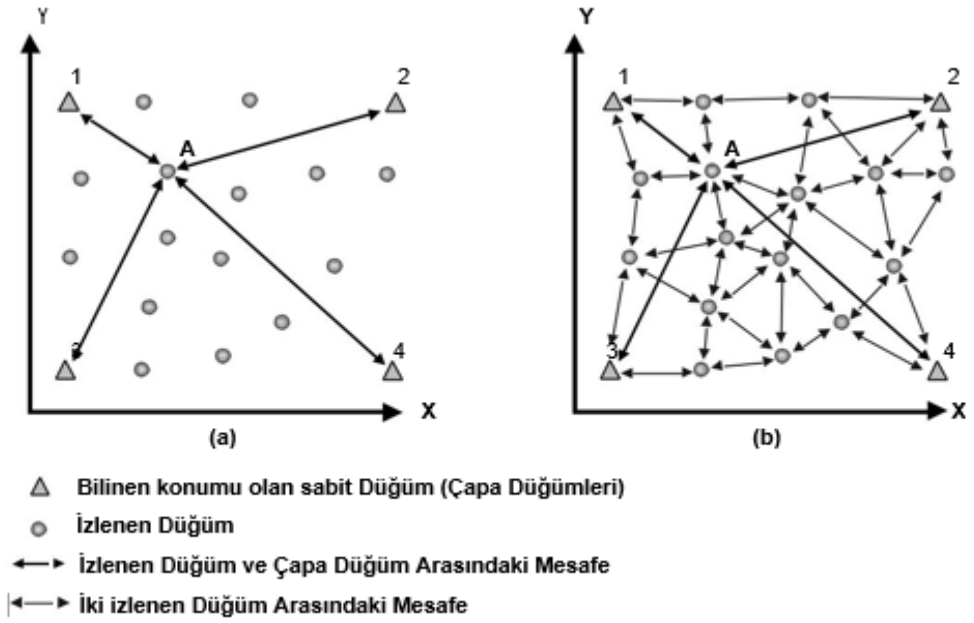


Şekil 3.32 Parmak İzine Dayalı Konum Tahmininde Alternatif Bir Yaklaşım Çevrimdışı Eğitim Sırasında Sabit Düğümler Alıcı Olarak Çalışıyor

Burada tartışılan en yakın komşu mekanizmalarında; alınan sinyal gücü ile oluşturulan dizileri veri tabanına yazıp, bu bilgiyi lokasyon tahmin hesaplamasında kullanmak yegane yaklaşım değildir.Dizileri kullanıp lokasyon hesaplaması için veri tabanı kullanmak dışında alternatifler de mevcuttur. Parmak izi kullanarak yapılan temel konum tahmini kavramı, sisteme bilinen bilgilerin bir veri tabanını sağlamak ve sistemin RSSI bilgilerini belirli bir fiziksel konumla nasıl ilişkilendireceğini öğrenmesini beklemek olarak görülebilir. Bu nedenle, makine öğrenmesi, sinir ağları ve örüntü tanıma gibi diğer disiplinler için geliştirilen algoritmalar parmak izi tabanlı yer tahmini için de kullanılabilir. Ancak bu algoritmaların birçoğu, sadece düşük maliyetli ZigBee ağlarında yaygın olan, kaynak sınırlı düğümler için geliştirilmemiştir. Bu algoritmaların bazıları, düzgün bir şekilde öğrenmek için geniş bir veri tabanına ihtiyaç duyar.

3.6.5 İşbirlikçi Yer Tahmini

İşbirlikçi konum tahmininde, sadece izlenen düğümden ölçülen bağlantı düğümlerine olan mesafeler değil, izlenen düğümlerin birbirine olan bağıl mesafeleri de konum tahmininin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.33'de, temel trilaterasyon yöntemi ve işbirlikçi teknik arasındaki fark gösterilmiştir. Şekil 3.33a'da, izlenen düğümün A konumu, düğümA ile bağlantı düğümleri 1-4 arasındaki aralık tahmini kullanılarak belirlenir. Bilinmeyen konumlara sahip diğer izlenen düğümler, izlenen düğümA'nın konumunun belirlenmesinde yer almazlar. Bir düğümün trilatrasyon kullanarak kendi konumunu belirlemesi için gerekenler, yalnızca izlenen düğümün kendisi ve yakındaki bağlantı düğümleridir.



Şekil 3.33 (a) Temel Trilatrasyon Yöntemi ve (b) Kooperatif Yer Tahmini

Şekil 3.33b'de gösterilen işbirlikçi yöntemde ise trilatrasyon yönteminin aksine, birkaç izlenen düğümün yeri bir yinelemeli yöntem kullanılarak aynı anda belirlenebilir. İlk olarak, bağlantı düğümlerindeki RSSI ölçümleri, işbirliğine dayalı konumlamaya katılan izlenen düğümlerin konumu için bir tahmin sağlar. Sonra izlenen her düğüm, RSSI kullanarak komşu izlenen düğümlere olan yaklaşık mesafesini belirler. İzlenen düğümler arasındaki yaklaşık mesafe, işbirlikçi yöntemde mevcut olan ek bilgidir. Bu bilgi konum tahmini doğruluğunu, temel bir trilasyon yönteminde ulaşılabilir doğruluğun ötesinde düzeltmeye yardımcı olur. İşbirlikçi konum kestirimi doğrusal olmayan optimizasyonu içerir ve hesaplama açısından yoğun olabilir. İşbirlikçi yönteminde, izlenen düğümlerin tahmini konumları, optimum sonuç elde edilinceye kadar tekrarlı bir şekilde ayarlanır.

Bir trilaterasyon yönteminde, belirli bir bölgedeki bağlantı düğümlerinin sayısının arttırılması, konum doğruluğunda bir iyileşme sağlar. Ancak, takip edilen düğümlerin sayısının arttırılması, trilatrasyon tekniğinin doğruluğu üzerinde herhangi bir olumlu etki oluşturmaz. İşbirlikçi yönteminde ise bağlantı düğümlerinin sayısının veya izlenen düğümlerin sayısının arttırılması, yer belirleme doğruluğunu iyileştirir.

3.6.6 Varış Açısı Bazlı Algoritmalar

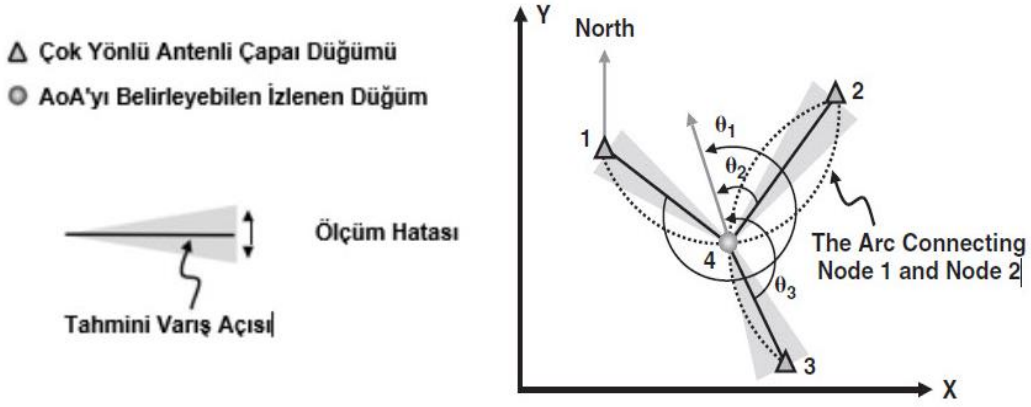
Çeyrek dalga monopol anten gibi basit bir antenle donatılmış bir alıcı-vericiye bir sinyal ulaştığında, sinyal gücünü ölçebilir, ancak alıcı-verici sinyalin geldiği yönü belirleyemez. Ek karmaşıklık ve maliyet pahasına, alınan bir sinyal açısını (AoA) belirleyebilecek bir düğümü değiştirmek mümkündür. Kablosuz düğüm bir anten dizisi kullanıyorsa, konum tahmini için RSSI yerine AoA kullanılabilir.

İzlenen düğümün alınan sinyal AoA'yı belirleyebildiğini varsayarak, izlenen düğümün konumunu tahmin etmek için basit bir algoritma kullanılır. Şekil 3.34'de, AoA'ya dayanan temel konum tahmini seneryosu gösterilmiştir. Bilinen konumlara sahip bağlantı düğümleri, çok yönlü antenler kullanarak sinyalleri iletirler. İzlenen düğüm, yakındaki bağlantı düğümlerinden gelen sinyalleri alır ve alınan AoA sinyalini tahmin eder. İzlenen düğüm kendi yönünü biliyorsa, konumunu belirlemek için yalnızca iki bağlantı düğümü gerekir. Bir düğüm, kuzey yönünün veya çapa düğümleri ve izlenen düğüm tarafından yaygın olarak bilinen bir yönün farkındaysa yönünü bilir. Şekil 3.34'de, izlenen düğümün kendi yönünü bilmediği, bu nedenle kendi konumunu belirleyebilmek için en az üç bağlantı düğümünden sinyal alması gereken bir senaryoyu göstermektedir. Alınan sinyalin AoA'nın belirsizliği, Şekil 3.34'de gri bir gölgeyle gösterilmiştir. İzlenen düğüm yönünü bilmese de; 1, 4 ve 2 düğümleri arasındaki açıyı derece olarak hesaplayabilir:

$$1\hat{4}2 = 360° - (\theta_1 - \theta_2) \qquad \textbf{(3.17)}$$

İzlenen düğüm, AoA'yı sadece 1 ve 2 düğümleri için tanıyorsa, izlenen düğümün konumu, 1 ve 2 numaralı düğümün oluşturduğu yayın herhangi bir yerinde olabilir. 3 nolu bağlantı düğümünden alınan sinyalin AoA'sını ölçerek izlenen düğüm düğüm 2, 4 ve 3 arasındaki açıyıda da hesaplayabilir.

$$2\hat{4}3 = \ (\theta_3 - \theta_2) \qquad (\mathbf{3.18})$$



Şekil 3.34 Varış Açısı (AoA) ile Konum Tahmini

Bağlantı düğümlerinin konumları bilindiğinden, düğüm 4 (izlenen düğüm), 1, 2 ve 3 düğümleri ile arasındaki açıya karşılık gelen yayları belirleyebilir. 4. düğüm konumu Şekil 3.34'de gösterilen iki yayın kesiştiği yerdir.

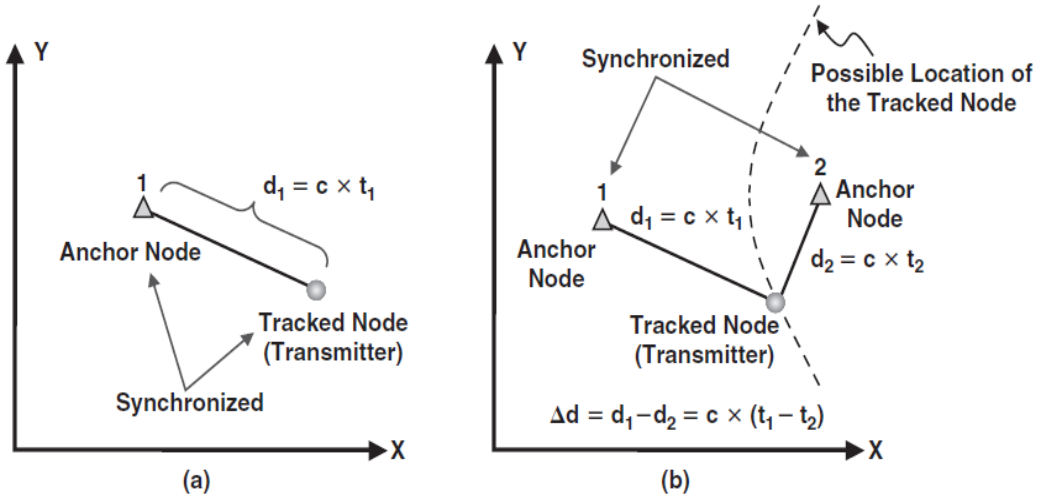
AoA tabanlı konumlandırmada, izlenen düğümlerin veya bağlantı düğümlerinin AoA'yı belirleyebilmesi gerekir. AoA tabanlı konum tahmini, RSSI tabanlı konumlandırma ile karşılaştırıldığında, bazı dezavantajlara sahiptir. AoA'yı tespit etmek için özel bir donanıma ihtiyaç duymasının yanı sıra, AoA konumlandırmasında izlenen düğüm ve çapa düğümleri arasında büyük bir engel olmamalıdır. Bazı AoA algoritmaları, izlenen düğüm ile bağlantı düğümleri arasında bir LoS olduğunu varsayar. Bu varsayım, bazı iç mekan uygulama senaryolarında AoA tabanlı konumlandırmanın kullanımını sınırlar.

3.6.7 Zamana Dayalı Algoritmalar (ToA ve TdoA)

Zaman tabanlı ve RSSI tabanlı konumlandırma algoritmalarının ortak özelliği, alınan sinyalin özelliklerine ile düğümler arasındaki mesafenin belirlenmesidir. RSSI tabanlı yöntemde, alınan sinyal gücü ile düğümler arasındaki mesafe belirlenirken, zaman bazlı konumlandırma algoritmalarında, sinyalin tahmini yayılma hızı ve sinyalin vericiden alıcıya gitmesi için geçen süre ile düğümler arasındaki mesafe belirlenir. GPS, zamana dayalı konumlandırma sistemidir.

Zamana dayalı bir yer tahmini, alınan varış zamanı (ToA) veya varış farkı zamanını (TDoA) ile yapılır. Şekil 3.35a'da gösterilen ToA ile konum tahmin durumu için alıcı ile verici arasında senkronizasyon olmak zorundadır. ToA, sinyalinin vericiden alıcıya ulaşmasına kadar geçen mutlak değeridir. İzlenen düğümden bağlantı düğümüne (d1) olan mesafe, ToA'dan (t1) ve yayılma hızından elde edilir. Şekil 3.35b'de gösterilen TdoA ile konum tahmini durumunda yalnızca alıcı düğümlerin senkronizasyonu gerekir. Bağlantı düğümleri, izlenen düğüm tarafından

iletilen sinyali alıp, arasındaki fark olan Δd yi hesaplamak için iki bağlantı düğümündeki sinyal varış zamanları (d1 ve d2) kullanılır. TdoA için izlenen düğümün konumunu bulmak için en az üç bağlantı düğümü gerekir. Şekil 3.35b'de gösterilen düğümler için denklem (3.19)-(3.21) ifadeleri yazılabilir:



Şekil 3.35 (a) ToA Kullanarak Mesafeyi Tahmin Etme ve (b) TDoA'ya Göre d Belirleme

$$d_1 = \sqrt{(X_1 - X_E)^2 + (Y_1 - Y_E)^2} \quad \textbf{(3.19)}$$

$$d_2 = \sqrt{(X_2 - X_E)^2 + (Y_2 - Y_E)^2} \quad \textbf{(3.20)}$$

$$\sqrt{(X_1 - X_E)^2 + (Y_1 - Y_E)^2} - \sqrt{(X_2 - X_E)^2 + (Y_2 - Y_E)^2} = \Delta d \quad \textbf{(3.21)}$$

(X_1, Y_1), (X_2, Y_2) ve (X_E, Y_E) sırasıyla bağlantı düğümü1, bağlantı düğümü2'nin koordinatları ve izlenen düğümün tahmini konumunu ifade eder. TDoA konumlandırmasına yalnızca iki bağlantı düğümü katılırsa, denklem 3.21'den elde edilebilecek tek sonuç, izlenen düğümün, Şekil 3.35b'de kesikli bir çizgi olarak gösterilen, hiperbolik bir eğri üzerine yerleştiğidir. Üçüncü bir bağlantı düğümü eklendiğinde, izlenen düğümün tahmini konumuna karşılık gelen hiperbolik eğrilerin kesişimi olacaktır.

Senkronizasyon, zamana dayalı konum tahmininde kritik öneme sahiptir. Sinyal havada ne kadar hızlı hareket ederse, oluşacak zamanlama hatasının etkiside aynı oranda artar. RF sinyali ultrason'a tercih edildiğinde saat senkronizasyon, faktörü daha kritik bir faktör olur. İç mekan ortamında; çoklu yolun etkisi, tahmin hatasını önemli ölçüde artırır. UWB sinyali gibi çok yüksek bant genişliğine sahip sinyalin kullanıldığı sistemler, IEEE 802.15.4 sinyali kullanan sistemlere

nazaran, yüksek doğruluklu yer tahmin sonuçları verir. UWB kullanan sistemlerde zaman tabanlı konum tahmini ile elde edilen değerler birkaç inç kadar düşük bir çözünürlüğe ulaşırlar. Genel olarak, kullanılan dalganın bant genişliği arttıkça, yer belirleme doğruluğu da artar.

3.6.8 Hesaplamalı Karmaşıklık

Bir algoritma seçerken, dikkat edilmesi gereken noktalardan biri onun hesaplama karmaşıklığıdır. Hesaplamalı karmaşıklık, bir görevi tamamlamak veya bir görevi belirli bir şekilde gerçekleştirmek için gereken kaynak miktarının incelenmesidir. Bir çalışmada girdi sayısı (ör. İzlenen düğüm sayısı) arttığı zaman algoritmanın karmaşıklığı da artar. Genellikle, girişin boyutu n ile temsil edilir. Bir algoritmada, görevi tamamlamak için gereken adım sayısı, giriş sayısı arttıkça n^2 oranıyla artarsa, algoritmanın n^2 karmaşıklığına sahip olduğu kabul edilir. Başka bir deyişle, bu algoritmada, nihai sonucu elde etmek için gereken adım sayısı, giriş sayısı iki katına çıktığında dört kat artar. Büyük O notasyonu bir algoritmanın hesaplamalı karmaşıklığını tanımlamak için kullanılır. Bir n^2 karmaşıklığı algoritması durumunda, örneğin, hesaplama karmaşıklığı, n'nin giriş sayısı olduğu $O(n^2)$ ile gösterilmektedir.Hesaplamalı karmaşıklık şu şekilde tanımlanmıştır: f(n) işlevi, eğer sadece (M'den bağımsız) sabit bir M varsa, O(g(n))'nin hesaplama karmaşıklığına sahiptir:

$$|\boldsymbol{f(n)}| \leq \boldsymbol{M}\ |\boldsymbol{g(n)}|$$
$$tüm \quad n \quad \geq n_0$$
$$bazı\ sabit\ n_0 \quad > 0$$

f (n) = O(g(n))'nin özelliklerinden biri aşağıdaki gibidir:

$$O(\log(n)) < O(n) < O(n \log(n)) < O(n^2) < O(n^3) < O(n^4)$$

$O(n^2)$ algoritmasının hesaplama karmaşıklığının $O(n^3)$ algoritmasından daha az, O(nlog(n)) algoritmasından daha fazladır.

3.7 ZigBee ile Birlikteliği Olan Diğer Ağlar

Lisanssız bir frekans bandında çalışma, aynı frekans bandını diğer kablosuz ağlar ile paylaşma zorluğunu da beraberinde getirir. Genellikle kablosuz ağlar arasında işbiliği olmadığından dolayı, bir ağın çalışması diğerlerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu bölümde, IEEE 802.15.4 kablosuz ağda kullanılan ve ağın enterferansa karşı sağlamlığını artıran yöntemler

gözden incelenmiştir. IEEE 802.11b/g, Bluetooth, kablosuz telefonlar ve mikrodalga fırınlar, bir IEEE 802.15.4 ağının olası enterferans kaynaklarıdır.

ZigBee düğümleri, diğer kablosuz standartlar tarafından da yaygın olarak kullanılan frekans bantlarında çalışır. Konut ve ticari binalarda kablosuz internet erişimi, 2.4GHz ISM bandında çalışan IEEE 802.11b/g (kablosuz LAN) tabanlı sistemler tarafından sağlanır. Bluetooth ve bazı telsiz telefonlar da 2.4GHz ISM frekans bandını kullanır. Bu kablosuz cihazların aynı anda birbirlerine yakın olarak çalışması muhtemeldir. ZigBee, IEEE 802.11, Bluetooth ve diğer kablosuz ağ ekipmanlar, bir birlerine yakın lokasyonlarda aynı frakans bandın da çalışırken birbirlerinin varlığına karşı bir miktar tolerans seviyesine sahip olması beklenir. Bu tolerans seviyesine sahip olma durumuna, birlikte bulunma özelliği denir (Coexistence) (IEEE 2006).

Bir ZigBee ağın bir arada bulunma performansını analiz ederken, sadece ZigBee ağın diğer kablosuz ağlardan etkilenmesi değil, ZigBee ağın diğer ağlar üzerindeki etkisi de incelenir. Düşük RF aktarım gücü, düşük görev döngüsü ve CSMA/CA kanal erişim mekanizması gibi ZigBee ağlarda kullanılan temel özellikler, ZigBee kablosuz ağların etraftaki diğer sistemler üzerindeki etkisini azaltmaya yardımcı olur.

Bir ZigBee düğümü için olası bir girişim kaynağı, aynı veya bitişik frekans kanallarında aynı anda iletim yapan diğer ZigBee düğümleridir. Her ZigBee düğümü, kanal tahsisi için bir gönderim başlatmadan önce, CCA (Clear Channel Assessment) diye adlandırılan, kanal erişim prosedürü uygular. CCA prosedürü uygulandıktan sonra kanal doluysa iletimden kaçınır. IEEE 802.11b/g düğümleri, IEEE 802.15.4 düğümlerine benzer şekilde, her iletimden önce CCA prosedürü uygulararak, diğer IEEE 802.11b/g düğümlerinden gelen sinyallerin varlığını fark eder. ZigBee sinyalleri, tipik IEEE 802.11b/g sinyallerine kıyasla daha düşük bant genişliğine ve enerjiye sahiptir. Bundan dolayı, bir IEEE 802.11b/g düğümü tarafından gerçekleştirilen CCA prosedürü sonucu, kanal hala bir ZigBee sinyali tarafından işgal edilirken kullanılabilir bir frekans kanalı ilan edebilir. İşaret etkin bir ZigBee ağda, koordinatör garantili zaman aralığı GTS (Guaranteed Time Slot) tahsis ederek, paketlerin çarpışma ihtimalini azaltacak şekilde, paket akışını yönetir. ZigBee ağlar, ZigBee dışındaki bir standarta dayanan kapsama alanındaki ağların karekteristikleri ve aktif zaman periyodu hakkında herhangi bir bilgiye sahip değildir.

Performans düşüklüğüne sebep olan, enterferans oluşturan sinyal her zaman ZigBee ağda, kullanılan sinyal ile aynı frekans kanalında olması gerekmez. 2.4 GHz ISM bandında çalışan ZigBee alıcı, 2400- 2483 MHz aralığı dışındaki frekansları filtrelemesine rağmen, alıcı gerçek

mesajı almadan, alıcıya enterferansa sebebiyet veren yeteri kadar güçlü bir filtre dışı frekans, alıcıyı olumsuz yönde etkiler ve alıcının mesajı tekrar alma teşebbüslerini olumsuz yönde etkiler.

Bir ZigBee sinyaliyle aynı frekans bandında bulunan bir enterferans sinyali, bant içi engelleme sinyali olarak adlandırılır. 2.4GHz ISM bandında, bant içi engelleme sinyali 2400 MHz ile 2483.5 MHz frekansına sahip olan bir sinyaldir. Bant içi engelleme sinyali, istenen sinyal ile aynı frekans kanalında olmayabilir. 2.4GHz ISM bandında, 2400 MHz ile 2483.5 MHz frekans bandının dışında bulunan bir enterferans sinyali, bant dışı engelleme sinyali olarak adlandırılır. Bant dışı engelleme sinyallerinin etkisi, bir bant seçim filtresi kullanılarak azaltılabilir. 2.4 GHz ISM bandında, bant seçme filtresi, 2400 MHz - 2483.5 MHz bandındaki sinyallerin filtreden minimum zayıflama ile geçmesine izin verir iken bant dışı sinyalleri oldukça zayıflatılır. Sezgisel olarak, bant seçimi filtresi bant içi engelleme sinyallerine yardımcı olmaz. Düşük maliyetli ZigBee uygulamalarında, bant seçimi filtresi kullanmak, maliyet veya düğüm boyutu sınırlamaları nedeniyle sık kullanılan bir seçenek değildir.

ZigBee ağlarının bir arada var olma performansını iyileştirmeye yönelik iki yaklaşım vardır: işbirlikçi ve işbirlikçi olmayan. İşbirlikçi yöntemlerde, ZigBee ağının ve diğer ağın (IEEE 802.11b/g ağı) belirli işlemleri birlikte yönetilir. Bir ZigBee ağı ve bir IEEE 802.11b/g ağının senkronize edildiği bir ağda, ağlardan biri etkin olduğunda, diğer ağ paket çakışmasını önlemek için etkin durumda kalmaz. İşbirlikçi bir yöntemde, işbirliğini uygulamak ve yönetmek için ZigBee ağı ile diğer ağ arasında bir iletişim bağlantısı bulunmalıdır. İşbirlikçi olmayan yöntemler de, ZigBee cihazlar, yakındaki enterfere edici kablosuz cihazların çalışma mekanizması hakkında hiçbir bilgi sahibi olmadan, bir arada bulunma performansını geliştirmek için bir takım prosedürler uygular. İşbirlikçi olmayan yöntemler, enterferansları algılamaya ve tahmin etmeye ve mümkün olduğunda bunlardan kaçınmaya dayanır. IEEE, IEEE 802 standartları için bir arada bulunma ile ilgili politikaları geliştirmek ve sürdürmek amacı ile IEEE 802.19 Teknik Danışma Grubu'nu (TAG) gurubunu oluşturmuştur (IEEE 2003). Bu çalışma gurubundan önce kurulan IEEE 802.15 Birlikte Bulunabilirlik Çalışma Gurubu 2 (TG2) tarafından, IEEE 802.11 (WLAN) ve IEEE 802.15.1 sistemlerinin bir arada bulunabilirliğine odaklanan, IEEE 802.15.2-2003 standartları yayınlamıştır (IEEE 2003).

Model tabanlı simülasyonlar veya ampirik yöntemler, iki kablosuz ağın eşzamanlı işlemlerinin farklı standartlarla karşılıklı etkilerini incelemek ve PER bozulmasını öngörmek için kullanılabilir (IEEE 2006).

3.7.1 ZigBee Performansında İşbirlikçi Olmayan Yaklaşım

Bu bölümde, ZigBee ağlarının bir arada var olma performansını iyileştirmeye yönelik iki yaklaşımdan biri olan, işbirlikçi olmayan yaklaşım incelenmiştir. Performansı iyileştirmeye dair işbirlikçi olmayan yaklaşımda, IEEE 802.15.4 fiziksel katmanının temel özelliklerinden olan, Çarpışma Önleme ile Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (CSMA/CA) gibi prosedürler, tüm ZigBee cihazlar tarafıdan, tüm senaryolar için standart olarak kullanılabilir. Ancak Dinamik RF çıkış gücü kontrolü gibi diğer işbirlikçi olmayan prosedürler, standart olmayan ilave özelliklerdir ve bunlara karşılık gelen algoritmalar sisteme üretici veya son kullanıcı tarafından eklenmelidir.

3.7.2 CSMA/CA Kanal Erişimi

Bir IEEE 802.15.4 düğümü, tahsis edilmiş garantili zaman aralığı (GTS) dışında herhangi bir iletimi başlatmadan önce CSMA/CA kanal erişimini. CCA'nın gerçekleştirilmesi, frekans kanalının şu anda başka bir cihaz tarafından kullanılıp kullanılmadığını belirleyecektir. CCA uygulamasına bağlı olarak, kanalı kullanan sinyalin başka bir IEEE 802.15.4 uyumlu cihazdan mı, yoksa farklı bir standarta dayanan bir cihazdan mı olduğunu belirlemek de mümkündür. CSMA/CA, farklı bir standartta çalışan yakındaki kablosuz düğümler, çalışma frekanslarını dinamik olarak değiştirmediğinde kullanışlıdır. Bir frekans kanalı ancak CCA prosedürü sonucu uygun ise IEEE 802.15.4 düğüm iletime başlar, aynı frekans kanalının eşzamanlı kullanımı her iki ağda da performansın düşmesine neden olabilir.

3.7.3 Çok Düşük Görev Döngüsü

ZigBee düğümlerinin çok uzun batarya ömrüne sahip olmasının temel nedenlerinden biri çok düşük görev döngüleridir. Her dakika uyanan, CCA gerçekleştiren ve ölçülen verilerini ileten bir sensör düğümü yaklaşık %0.01'lik bir görev döngüsüne sahip olur. Bu son derece düşük görev döngüsü, bir ZigBee düğümünün diğer düğümler üzerinde çok düşük enterferans etkisi oluşturabileceği anlamına gelir. Ayrıca, ZigBee düğümü CCA'yı gerçekleştirmek ve paketlerini iletmek için yalnızca birkaç milisaniyelik kanal kullanılabilirliğine ihtiyaç duyar. Bu nedenle, yakındaki ağın birkaç milisaniyelik etkin olmayan periyotlarında, ZigBee düğümler iletişim ve düğümler arası paket iletimini görevlerini gerçekleştirebilirler.

3.7.4 Sinyal Yayılımı

DSSS (Direct Squence Spread Spectrum) gibi bir yayma yöntemi, istenen sinyalin, aynı frekans bandında bulunan herhangi bir enterferans edici üzerinde işlem avantajına sahip olmasını sağlar. Bu nedenle, DSSS sinyal yayılması genellikle bir ağın enterferanslara karşı dayanıklılığını artırır. Öte yandan, sinyal yayılması, bir ZigBee ağının etraftaki diğer ağlar üzerinde neden olduğu

girişimi de azaltır. Toplam sinyal enerjisi yayılarak değişmez, ancak aynı sinyal enerjisi yayıldıktan sonra daha büyük bir bant genişliği üzerine dağıtıldığında, Hertz başına sinyal enerjisi azalır. Hertz başına enterferans enerjisini azaltmak, sinyal-enterferans oranını (SIR-Signal to Interference Ratio) arttırır ve hedef sistemdeki sinyal kurtarma şansını arttırır.

3.7.5 Dinamik RF Çıkış Gücü Seçimi

Birlikte çalışmayı geliştirmenin yöntemlerinden biri de, vericinin RF çıkış gücünü kanal durumuna ve düğümler arasındaki mesafeye göre ayarlamaktır. Tipik olarak, RF çıkış gücü, kabul edilebilir bir iletişim güvenilirliği seviyesine karşılık gelen en düşük seviyeye ayarlanır. Vericinin çıkış gücünün azaltılması, yakındaki diğer kablosuz cihazlarla enterferans etkisini azaltmasına karşın sinyal alıcısı enterferansa daha duyarlı hale gelir. Bir paket teslim etme girişimi başarısız olursa, verici RF çıkış gücünü (Signal to Interference Ratio, SIR), iyileştirmek için arttırılabilir. Sinyal gücünün artırılması, diğer paketlerle enterferans olma olasılığındaki potansiyel paket teslimatı şansını artırabilir.

3.7.6 Ağ İletişimi ve Konum Farkında Yönlendirme

Ağdaki belirli bir yönlendirici düğümü, sürekli olarak bir sonraki düğüme paket gönderiminde sık sık hataya neden olan güçlü enterferans varlığı ile karşılaşır ise mesajı son hedefe taşımak ve olumsuz enterferans etkisini önlemek için alternatif bir yol seçme seçeneğine sahiptir. Buna yol çeşitliliği denir. Yönlendirme mekanizması ve rota oluşturma metodları Bölüm 3.6'da tartışıldı.

Yüksek enterferans alanları biliniyor ise lokasyon bilinçli yönlendirmede, bağlantı maliyet fonksiyonunun hesaplanmasında bu bilgi dikkate alınır. Bu şekilde, paket trafik akışı mümkün olduğunda yüksek enterferans alanlarından uzağa yönlendirilir. Ancak, enterferans yüksek enterferans alanlarındaki düğümlerin başlattığı ya da hedeflediği yayınları etkilemeye devam eder.

Yönlendirme antenlerinin bir yönlendirme mekanizmasının parçası olarak uygulanması, yönlendirme enerji verimliliğini arttırmanın bir yolu olarak Bölüm 3.6 da tartışıldı. Yönlü antenler, bazı uygulama senaryolarında bir ağın bir arada var olma performansını da artırabilir. Yönlü bir anten ile donatılmış bir düğüm alma modunda ise anten kazancının düşük olduğu yönlerden gelen girişimler, istenen yönden gelen sinyallerden daha fazla zayıflatılacaktır. Bu durum, yönlü antene sahip bir düğüm üzerinde enterferansa etkisini zayıflatır.

3.7.7 Frekans Kanal Seçimi

İstenen kanaldaki enterferans sinyalinin enerjisi kabul edilemez düzeyde olduğunda, frekans kanalını değiştirmek, enterferans sorununu çözmenin basit bir yoludur. ZigBee Pro, düğümleri enterferans etkisi durumunda, tüm ağda kullanılan kanalların değiştirilmesini sağlayan frekans çevikliği yeteneğine sahiptir. ZigBee ağ, ZigBee Pro özelliğine sahip düğümleri içermiyor ise ağ frekans kanalını farklı dinamik yöntemler ile değiştirebilir.

Yakındaki şebekelerdeki enterferans sinyallerinin işlem frekansları ve bant genişlikleri biliniyorsa, ZigBee şebekesinin frekans kanalı enterferans sinyallerinin etkisini en aza indirecek şekilde seçilir. Bir IEEE 802.11b/g ağının varlığına rağmen, boş kalan belirli frekans bantları bulunabilir ve bu bantlar ortamdaki ZigBee ağı tarafından kullanılabilir. Buna kanal işbirliği denir.

3.7.8 Uyarlanabilir Paket Uzunluk Seçimi

ZigBee ağlarda kullanılabilecek işbirlikçi olmayan yöntemlere başka bir örnek, kanal durumuna göre uyarlanabilir paket uzunluğu seçimidir. Paketin boyutunun düşürülmesi normal olarak, enterferans etkisi altında PER (Packet Error Rate)'yi iyileştirmenin bir yolu olarak kabul edilir. Genel olarak, daha küçük bir paket aynı frekans kanalında bir enterferans belirmeden önce varış yerini alma şansına sahiptir. Bununla birlikte, bazı deneyler, paket uzunluğunun azaltılmasının her zaman daha iyi PER performansı ile sonuçlanmadığını göstermiştir (Golmie 2006).

3.7.9 IEEE 802.11b/g ile Birlikte Çalışma

IEEE 802.11 (WLAN) evlerde, ofislerde ve halka açık yerlerde yüksek hızlı Internet erişimi sağlamak için yaygın olarak kullanılır. IEEE 802.11b/g ağları 2.4GHz ISM bandında çalışır ve IEEE 802.15.4 ağları için olası enterferans kaynağıdır. Bir IEEE 802.11b/g düğüm verici çıkış gücü 30 dBm kadar yüksek olabilse de, tipik olarak 12-18dBm arasındadır (IEEE 2003). Bu değer ZigBee düğümü tipik 0dBm çıkış gücünden oldukça yüksektir.

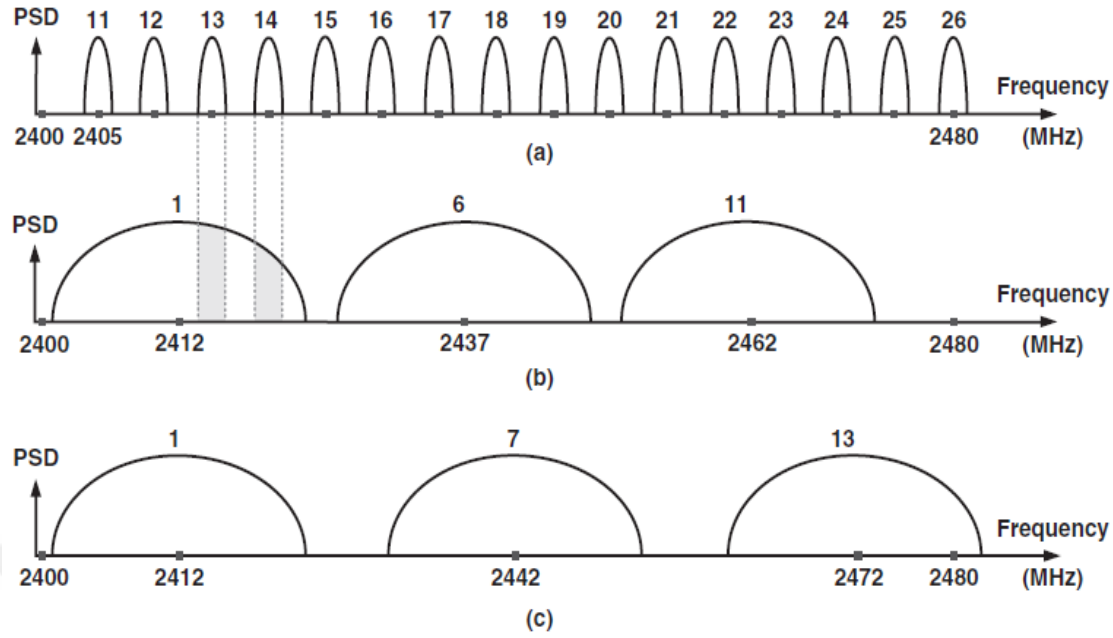
IEEE 802.11b sinyalleri, DSSS yayınım yöntemi kullandığında, 22 MHz bant genişliğine ulaşır. Bir IEEE 802.11b düğümünün maksimum veri hızı 11Mbps'dir. IEEE 802.11 g standardı, ortogonal frekans bölmeli çoğullama (OFDM) kullanarak 54Mbps'ye kadar bir veri hızını destekler, sinyalin frekans bant genişliği ise hala 22MHz'dir. IEEE 802.11 g, IEEE 802.11b ile geriye dönük uyumluluğa sahiptir.

Bir veya daha fazla IEEE 802.11b sinyalinin, bir IEEE 802.15.4 paket iletimini bozması olayına paket çarpışması denir. ZigBee düğümleri, IEEE 802.11b/g sistemlerine kıyasla daha düşük çıkış gücüne, görev döngüsüne ve sinyal frekans bant genişliğine sahiptir. Bu nedenle, bir ZigBee sistemi, bir IEEE 802.11b/g sisteminin çalışması üzerinde çok az olumsuz etkisinin olması beklenir. IEEE 802.11b/g standartları, 2.4 GHz ISM bandında 14 örtüşen çalışma kanalı tanımlar. Kanalların merkez frekansları (f_C) 5 MHz aralıklıdır ve her kanalın bant genişliği 22 MHz'dir:

$$f_C = 2412 + 5 \times (k-1)(MHz)$$
$$1 \leq k \leq 11 \text{ in North America (FCC)} \quad \textbf{(3.22)}$$
$$1 \leq k \leq 13 \text{ in Europe (ETSI)}$$
$$k: \text{Kanal Numarası}$$

Şekil 3.36'da birbiriyle örtüşmeyen üç adet IEEE 802.11b/g kanalı gösterilmiştir. Kuzey Amerika'da, örtüşmeyen kanallar 1,6 ve11 numaralı kanallardır. Avrupa'da örtüşmeyen kanallar 1, 7 ve 13 nolu kanallardır. Örtüşmeyen IEEE 802.11b/g kanalları arasındaki frekans bantları koruyucu bantlar olarak adlandırılır. ZigBee ağı yalnızca örtüşmeyen kanalları kullanan bir IEEE 802.11b/g ağına yakın ise kanal işbirliği mekanizmasını kullanarak, bir arada var olma performansını artırır. 15, 20, 25 ve 26 nolu ZigBee kanalları, IEEE 802.11b/g kanalları arasında yer almakta ve diğer ZigBee frekans kanallarına kıyasla en az Kuzey Amerika'daki IEEE 802.11b/g frekansları ile enterferans etkisi yaşarlar. IEEE 802.11b koruyucu bantlarında ZigBee kanalları, 802.11b/g sinyallerinin bant dışı emisyonları nedeniyle enterferanssız bir ortamda çalışmaları söz konusu değildir. Koruyucu bantlardaki enerji sıfır olmayabilir, ancak IEEE 802.11b/g kanallarındaki sinyal enerjisinden daha düşük olur. Enterferans sebebi olan ferekans, ZigBee sinyali ile aynı kanalda olmasa bile, bazı ZigBee düğümlerinin PER performansını düşürebilir.

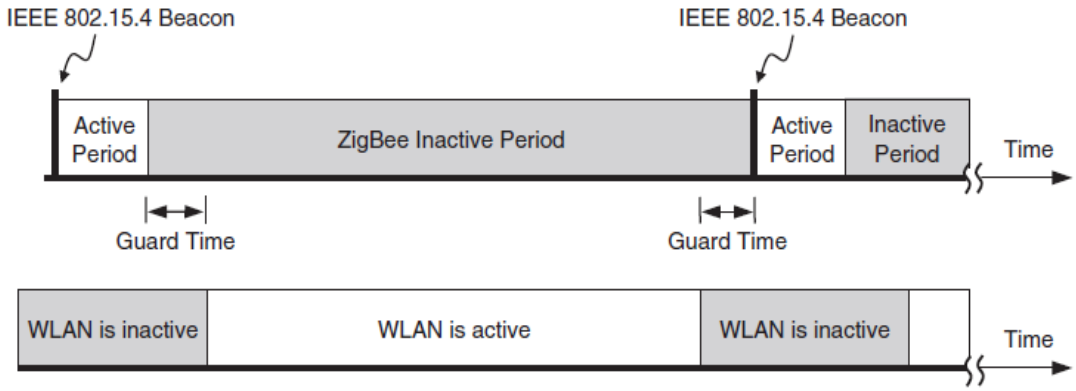
IEEE 802.11b'de, sinyal enerjisi kanalın merkezinde maksimum değerdedir. 13 nolu ZigBee kanalı, 14 nolu kanala kıyasla daha düşük bir SIR değerine sahiptir. Bununla birlikte, IEEE OFDM-bazlı 802.11 g'de, kanallar arası enerji dağılımı birbirine yakın değerdedir. IEEE 802.11 g, yüksek verim nedeni ile IEEE 802.11b'ye kıyasla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir ZigBee alıcısı için, yakındaki WLAN (Wide Area Local Network)'dan gelen DSSS modüle edilmiş sinyal, geniş bantlı bir gürültü iken ZigBee sinyali, bir WLAN alıcısı için dar bantlı enterferans sinyalidir.WLAN ağlarda, ZigaBee kaynaklı bu dar bant karışmasını gidermek için adaptif bir çentik filtresi kullanılır.



Şekil 3.36 (a) IEEE 802.15.4 Kanallar, (b) IEEE802.11b/g Örtüşmeyen Kanalla Kuzey Amerika'da ve (c) Avrupa'da IEEE802.11b/g Örtüşmeyen Kanallar

Hem IEEE 802.11b/g hem de IEEE 802.15.4, bir frekans kanalına erişmek için CSMA prosedürünü kullanır. Her iki standart da bir kanalın meşgul olup olmadığını belirlemek için CCA metodunu kullanır. Bir IEEE 802.15.4 düğümü, bir IEEE 802.11b/g sinyalinin varlığını tespit edebilir, ancak IEEE 802.11b/g düğümü, tipik olarak küçük bant genişliği ve düşük sinyal gücünden dolayı bir IEEE 802.15.4 sinyalinin varlığını fark etmeyebilir.

Bir IEEE 802.11 sistemindeki erişim noktası (AP-Access Point), ağlardaki düğümleri senkronize etmek için işaret çerçevelerini iletir. Hem IEEE 802.15.4 hem de IEEE 802.11 sistemleri işaret etkin modda çalışabildiğinden, bu iki sistem arasındaki enterferans olasılığını azaltmak için zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) yöntemi kullanılabilir. Bu işbirlikçi yöntemin temel kavramı Şekil 3.37'de gösterilmiştir. Bir IEEE 802.15.4 ağının işaret etkin çalışması, etkin ve etkin olmayan sürelere ayrılmıştır. Aktif süre, aktif olmayan süreden önemli ölçüde daha kısa olabilir. IEEE 802.15.4 sistemi etkin olsa da, IEEE 802.11 etkin değildir. IEEE 802.11 sistemi, IEEE 802.15.4 sistemi etkin değil moduna geçtikten sonra faaliyetlerine devam eder. Olası saat yanlışlıklarını hesaba katarak aktif dönemler arasında koruma süresi olmalıdır. Bu yöntem de, her iki sistemin de senkronize olmasını sağlamak için ZigBee ve WLAN sistemleri arasında bir iletişim bağlantısı gerektirir. Bu işbirliğini gerçekleştirmenin bir yolu, ağda hem IEEE 802.15.4 hem de IEEE 802.11b/g için alıcı vericileri içeren çift modlu bir cihaza sahip olmaktır. Bu cihaz TDMA işlemi için her bir şebekeye zaman tahsisini yönetecektir.



Şekil 3.37 İşbirlikçi TDMA Yöntemi Geliştirmek İçin Kullanılabilir ZigBee ve WLAN Birlikteliği

3.7.10 Bluetooth ile Birlikte Çalışma

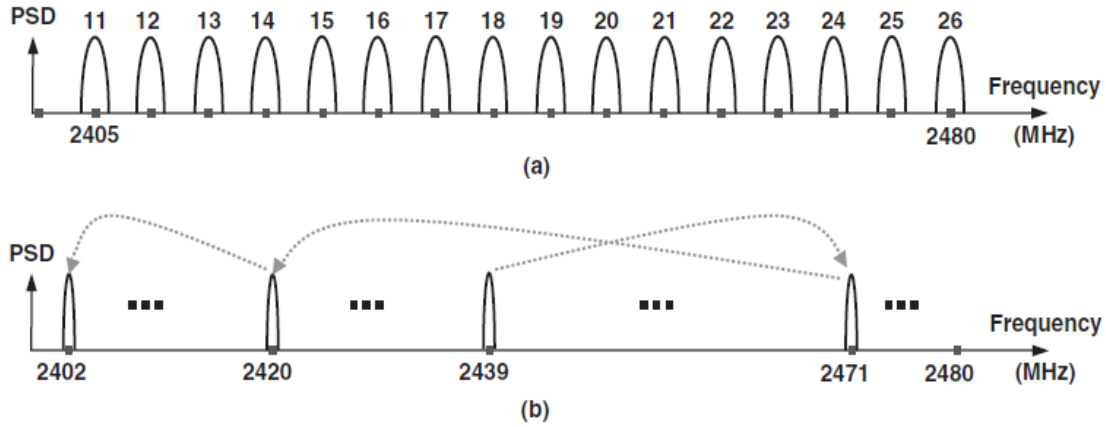
Bluetooth sistemleri 2.4 GHz ISM bandında çalışır ve sinyallerini yaymak için DSSS yayınım yöntemi yerine, frekans atlamalı yayınım yöntemini (FHSS-requency Hoping Spread Spectrum) kullanır. Şekil 3.38, Bluetooth temel çalışma mekanizmasını gösterilmiştir. İletilen sinyal bant genişliği 1 MHz'dir, ancak frekans kanalı bir pseudorandom dizisi kullanılarak değiştirilir. Bağlantı durumunda Bluetooth'daki maksimum atlama sayısı, saniyede 1600 atlamadır. Bluetooth sisteminde 1 MHz ile ayrılmış 79 frekans kanalı vardır:

$$\text{Bluetooth frekans kanalları} = 2402 + k \qquad 0 \leq k \leq 78 \qquad \textbf{(3.23)}$$

burada k kanal numarasını ifade eder.

Bluetooth cihazların tipik çıkış gücü maksimum 20 dBm olabilir. Bluetooth sürüm 1.1 ve 1.2, IEEE 802.15.1 olarak onaylandı. Ancak, Bluetooth'un gelecekteki sürümleri herhangi bir IEEE standartı olarak onaylanmayacaktır. Bluetooth sürüm 2.0 ve daha üstü, 3 Mbps'ye kadar veri hızları sağlayabilir. Bluetooth'taki cihaz tipi ana veya bağımlı olmak üzere iki türdür. Bir ana cihaz yedi cihaza kadar cihaz ile iletişim kurabilir. Bağımlı cihazlar saatlerini periyodik olarakana cihaz ile senkronize ederler.

FHSS, DSSS'ye benzer şekilde, enterferans olduğunda başarılı paket teslimatı şansını artıran işlem kazancı sağlar. Bir IEEE 802.15.4 sinyali 2 MHz bant genişliğine sahiptir ve üç Bluetooth kanalında girişime neden olabilir. Bu nedenle, yakındaki Bluetooth cihazı 79 kanalın tümünü frekans atlamalı olarak kullanıyorsa, tek bir ZigBee düğümü ile bir Bluetooth düğümü arasındaki maksimum enterferans olasılığı, yaklaşık %4 tür.



Şekil 3.38 (a) IEEE 802.15.4 Kanallar ve (b) Bluetooth Kanalları

Bununla birlikte, Bluetooth cihazı, Uyarlamalı Frekans Atlamalı (Adaptive Frequency Hoping, AFH) tekniğini kullanarak bir ZigBee ağı veya başka bir ağ üzerindeki enterferans etkisini azaltabilir. AFH, enterferansların bulunduğu kanalları tanımlar ve bu kanalları "kötü kanallar" olarak işaretler. Ardından atlama dizisi, yüksek düzeyde enterferanslı frekans kanallarından kaçınılacak şekilde değiştirilir. Frekans atlama düzenindeki bozuk kanallar, arama tablosu aracılığıyla iyi kanallarla değiştirilir. Bluetooth ana cihazı periyodik olarak kötü bir kanalı dinlemeye devam eder, enterferans kalmadığındayerek kullanmaya devam eder. Bluetooth bağımlı cihazlar ana cihaza aralarındaki kanal kanal kalitesi ile ilgili rapor gönderme yeteneğine sahiptir. AFH yöntemi yalnızca Bluetooth ağının performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda Bluetooth ağının Bluetooth uyumlu olmayan diğer yakındaki ağlar üzerindeki etkisini de azaltır.

Bluetooth cihazları, ZigBee düğümlerinin tipik düşük görev döngüsü ve düşük gücü nedeniyle ZigBee ağının varlığını fark etmeyebilir. ZigBee ağı tarafından kullanılan frekans kanalı, Bluetooth tarafından kötü kanal olarak işaretlenmez ise Bluetooth ve ZigBee düğümleri arasındaki mesafeye bağlı olarak enterferans sebebi olabilir.

3.7.11 Mikrodalga Fırınlarla Birlikte Çalışma

Mikrodalga fırınlar, fırının içine yerleştirilen malzemelerde (örneğin yiyecek veya içecek) ısı üretmek için elektromanyetik sinyaller kullanır. Fırının içine yerleştirilen metal iç yapı, elektromanyetik sinyalin, fırının duvarlarından yansımasına ve yiyeceğe birçok kez nüfuz etmesine neden olur. Yiyecekler normal olarak, çok yüksek bir zayıflama sabitine sahip olan ve sinyal besinden geçerken sinyal gücünü önemli ölçüde azaltan yüksek bir su seviyesi içerir. Fırınlar 2.4 GHz veya daha alt GHz frekans bantlarını kullanır. Metal duvarlar, tavan ve fırının zemini, RF sinyal enerjisinin çoğunluğunun fırından ayrılmasını önler, ancak fırından gelen

elektromanyetik sızıntı, yakındaki diğer kablosuz ağlarda enterferansa neden olmak için yeterli olabilir. 2.4 GHz'de çalışan mikrodalga fırınların merkez frekansı normalde 2450 MHz'e ayarlanmıştır. Sinyal bant genişliği, mikrodalga fırın üreticisine bağlı olarak 20-80 MHz arasında olabilir. Genellikle, IEEE 802.15.4, ağlar 2450 MHz, mikrodalga fırınlardan gelen enterferans nedeniyle performansın düşmesini önlemede başarılıdırlar. Mikrodalga fırın markalarının, dışarı sızdırdıkları sinyal gücünü ölçmek için bir takım deneyler yapılmıştır (Gawtrhrop ve ark 1994). Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar ile her bir fırın için radyasyon paterni grafikleri oluşturulur. Fırın radyasyon paterni, fırının içindeki malzemenin türü ve büyüklüğüne, fırın imalatçısına, fırının nominal gücüne ve fırının yönüne bağlıdır. Fırının dışındaki kaçak sinyalin gücü,fırın kapağının ön kapaktan kaynaklanan sızıntı nedeni ile fırının önünde başka bir yöne kıyasla daha kuvvetlidir. Bir fırının dışındaki radyasyon, fırının merkezine yerleştirilmiş tek biçimli olmayan bir radyasyon düzenine sahip bir verici ile modellenir.

Bir fırının iletilen sinyal gücünün tepe noktası, 3 MHz bant genişliği ortalama alınarak, -5dBm ile 20dBm arasında değişebilir. Fırından gelen radyasyon yakındaki bir ZigBee kablosuz ağına enterferans kaynağı olacak kadar güçlüdür. Ticari mikrodalga fırınlar, çalışırken %100'e yakın görev döngülerine sahip olabilir. Ancak ev içi mutfaklarda bulunan tipik mikrodalga fırınlar %50 veya daha az görev döngüsüne sahiptir. Örneğin, bir mikrodalga fırın açıldığında, RF sinyali yalnızca her 20 ms'de 8 ms için mevcut olur. Bazı ZigBee uygulamalarında, bu 12 ms'lik fırın hareketsizliği, CCA'yı gerçekleştirmek ve paketleri hedefe iletmek için sadece birkaç milisaniyeye ihtiyaç duyan bir ZigBee düğümü için yeterli olur.

3.7.12 Telsiz Telefonlarla Birlikte Çalışma

Telsiz telefonlar, ZigBee cihazlarıyla paylaşılan 915 MHz ve 2.4 GHz frekans bantları dahil olmak üzere çeşitli frekanslarda çalışır. Telsiz telefonlar genellikle 5.8 GHz frekans bandında çalışır ve ZigBee ağları ile enterferansa sebep olmazlar. Telsiz telefonlar performanslarını artırmak için DSSS veya FHSS yayınım tekniklerini kullanırlar. Telsiz telefon sinyallerinin özellikleri, üreticiye göre değişir. Normalde birlikte çalışabilirlik telsiz telefonlar için bir sorun değildir. 2.4 GHz frekans bandında çalışan kablosuz bir telefondan iletilen sinyal gücü 30 dBm kadar yüksek olabilir ve her iki sistem tarafından kullanılan frekans kanalları aynı ise bu durum yakındaki bir ZigBee düğümünde enterferansa sebep olur. ZigBee ağının çalışma frekansını değiştirmek, DSSS yayınım yöntemi kullanan kablosuz telefonun sebep olduğu enterferans etkisini azaltmaya yardımcı olur. FHSS yayınım yöntemi kullanan telsiz telefonlar, Bluetooth'a benzer bir yayılım mekanizması kullanır ve tüm 2.4 GHz bandını kapsayabilir. Telsiz bir telefondan iletilen sinyaller normalde bir Bluetooth düğümünden daha güçlüdür. Bir FHSS

yayınım yöntemi kullanan telsiz telefon ile bir ZigBee ağ arasında paket çarpışması olması durumunda, ZigBee düğümleri çarpışan paketleri yeniden iletirler. Düşük güç ve düşük görev döngüsünden dolayı ZigBee şebekesi, kablosuz telefon üzerinde yalnızca küçük (veya önemsiz) bir etkiye sahip olabilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

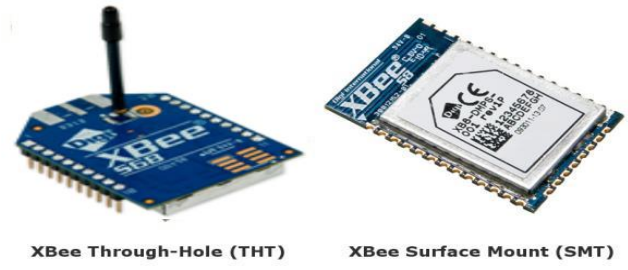
Bu tezin amacı, günümüz akıllı sistemlerinde kablosuz veri iletilimi kapsamında öncelikle tercih edilen ZigBee teknolojisinin araştırılması ve ZigBee tabanlı biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulamanın gerçeklenmesidir. Bu bölümde biyomedikal işaretlerin iletildiği temel bir uygulamanın donanımsal ve yazılımsal olarak gerçeklemesinin detayları açıklanmıştır.

Bu çalışmada insan vücudundan sensörler aracılığı ile alınan biyolojik işaretlerin XBee modüller ile oluşturulan düşük güçlü kablosuz kişisel alan ağı üzerinden uzaktaki bir merkeze aktarılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan donanımlar ve özellikleri aşağıda sunulmuştur.

4.1 XBee Modüller

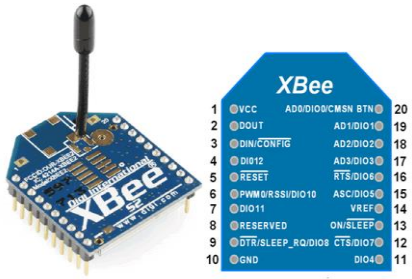
İsimler benzer olsa da, XBee ve ZigBee arasındakı farkı şöyle açıklanabilir: XBee, Digi firmasının ürettiği fiziksel ZigBee radyo modülüne verdiği isimdir. Digi, ZigBee iletişim protokollerini kullanan, XBee ve XBee-PRO ZB gibi farklı modeller sunmaktadır.

Xbee modüller iki donanım seçeneğine sahiptir: delikli (TH- through- hole) ve yüzeye montaj (SMT- surface mount). Şekil 4.1'de modellerin görüntüsü verilmiştir. Delikli seçeneğe sahip modüllerin 20 pinli bir başlığı vardır. Yüzeye montaj seçeneğine sahip modüllerin dış çevresinde 37 yüzey montaj pedi bulunur. Modüllerin küçük boyutu, XBeelerin yoğun ve mekan kısıtlı tasarımlara entegre edilmesini sağlar. Bu çalışmada delikli (TH- through- hole) model kullanılmıştır



Şekil 4.1 Delikli (Through Hole, TH) ve Yüzeye Montaj (SMT- surface mount) XBee modülü

XBee modüller üzerinde Şekil 4.2'de gösterildiği gibi 20 adet pin mevcuttur.



Şekil 4.2 XBee Modül Pin Yapısı

Çizelge 4.1'de XBee modüllerin pin isim ve fonksiyonları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 XBee Modül PIN İsim ve Fonksiyonları

Pin No.	Pin İsmi	Yön	Fonksiyon
1	VCC	-	Besleme Gerilimi
2	DOUT	Çıkış	UART veri çıkış
3	DIN/CONFIG	Giriş	UART veri giriş
4	DIO12	Çıkış	Dijital Çıkış 12
5	RESET	Giriş	Modül Reset
6	RSSI/DIO10	Çıkış	İşaret Şiddet indikatörü/Dijital Çıkış 10
7	DIO11	Çıkış	Dijital Çıkış 11
8	Reserved	-	Kullanımda değil
9	DTR/DIO8	Giriş	Veri terminal hazır indikatörü / Dijital Çıkış 8
10	GND	-	Toprak
11	DIO4	Giriş/Çıkış	Dijital Çıkış 4
12	CTS/DIO7	Giriş/Çıkış	Veri alımı hazır indikatörü/ Digital Çıkış 7
13	ON/SLEEP	Çıkış	Modül uyku indikatörü
14	VREF	Giriş	ADC için Referans gerilimi
15	ASC/DIO5	Giriş/Çıkış	Bağlantı indikatörü /Dijital Çıkış 5
16	RTS/DIO6	Giriş/Çıkış	Veri gönderimi hazır indikarörü /Dijital Çıkış 6
17	AD3/DIO3	Giriş/Çıkış	Analog veya Dijital Giriş/Çıkış 3
18	AD2/DIO2	Giriş/Çıkış	Analog veya Dijital Giriş/Çıkış 2
19	AD1/DIO1	Giriş/Çıkış	Analog veya Dijital Giriş/Çıkış 1
20	AD0/DIO0	Giriş/Çıkış	Analog veya Dijital Giriş/Çıkış 0

4.2 Arduino

Arduino, karmaşık elektronik prototipleri ve ürünlerini tasarlamak, geliştirmek ve test etmek için kullanılan açık kaynaklı bir platformdur. Arduino ilk olarak 2000 yılında Kuzey İtalya'nın Ivrea kasabasında, Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino ve David Mellis tarafından yürütülen bir mezuniyet araştırma projesi olarak ortaya çıktı. Projenin

odak noktası, elektronik donanım ve yazılım tasarlamadaki karmaşıklık yükünü azaltmaktı. Arduino ile bir program yazmak için IDE yazılımına birkaç satır kod yazmak ve ardından çıkışı görmek için programı onboard mikrodenetleyiciye yüklemek yeterlidir. Arduino, programlama dilini kolaylaştırmak için önceden tanımlanmış kütüphaneleri kullanır.

Arduino donanımı ile çok farklı işlevleri gören devreler tasarlamak mümkündür. Arduino yazılım dilinin sadeliği, elektronikle ilgilenen herkesin, karmaşık algoritmalar veya kodlar yazmadan, program yazmasını çok kolaylaştırır. Arduino'nun açık kaynaklı yapısı, hızlı büyümesinin temel nedeni olmuştur. Bir Açık Kaynak projesi olduğu için, donanım ve yazılım ile ilgili tüm dosyalar kişisel veya ticari kullanıma açıktır. Donanımın geliştirilme maliyeti, endüstriyel devlerin pahalıya mal ettiği benzer ürünlere karşı çok düşüktür. Açık kaynaklı yapısından dolayı, ürünün geliştirilmesi, kullanılması, yeniden dağıtılması için herhangi bir lisans gerektirmez. Ancak Arduino ismi ticari marka korumalıdır (Arduino ™). Tüm kaynak kod kütüphanesini içeren yazılım dosyaları da açık kaynaklardır. İsteyen kullanıcı, projesini çok yönlü hale getirmek ve yeteneklerini geliştirmek için bu kodları değiştirebilir. Bu özellik Arduino'ya güçlü bir çevrimiçi topluluk desteği sağlar.

Arduino donanımı, devrede ortaya çıkan karmaşıklıkları azaltmak için çok fonksiyonel bir şekilde tasarlandı. Arduino, kullanıcıların yazılımı mikrodenetleyiciyi devre dışı bırakmadan doğrudan yükleyebilmesini sağlayan, Sistem İçi Programcıya (ISS) sahiptir. Arduino anakartı, 5V lineer regülatör IC, 16MHZ kristal, seramik rezonatör, çıkış konnektörleri, doğrudan adaptör girişi ile 8 bitlik bir AVR mikrodenetleyiciden oluşur. Kartlardaki IO portları, kalkanlar olarak bilinen değiştirilebilir ilave modüller ile kolayca bağlanabilecek şekilde konumlandırılmıştır. Kalkanlar, kablonun kabiliyetlerini genişletmek için arduino panolarına harici olarak takılabilen kızak panolardır. Motorları çalıştırmak veya motorların hızını kontrol etmek için bir kolaylık sağlamak için Aurdino panelinin üstüne bir motor kontrol kalkanı takılabilir. Arduino bordu, harici sensörler, devreler veya diğer çevre birimleri ile kolayca arabirim oluşturabilir. Arduino bordların farklı yapılandırmaları için farklı AVR yongaları kullanır. Arduino anakartları, USB portu ile iletişim kurma kapasitesine sahip mikrodenetleyiciler ile birlikte sunulur.

Örnek uygulamamız için Şekil 4.3'de gösterilen Arduino UNO modeli kullanılmıştır. Bu model kodlamaya başlamak için en iyi başlangıç modelidir. USB kablosuyla bir bilgisayara bağlayıp veya AC-DC adaptörü veya bataryayla çalıştırılabilir. Uno kartı, bir dizi USB Arduino kartının ilki ve Arduino platformu için referans modeldir. Çizelge 4.1'de Arduino Uno Modelin Teknik Üzellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Arduino Uno

Çizelge 4.2 Arduino Uno kartına ilişkin teknik özellikler

Mikrokontroler	ATmega328P
Çalışma Gerilimi	5V
Giriş Gerilimi (Önerilen)	7-12 V
Giriş Gerilimi Aralığı	6-20 V
Digital I/O Pinleri	6
Anolog giriş Pinleri	6
Pin başı DC Akım Değeri	20 mA
3.3 pin için DC Akım Değeri	50 mA
Flash Hafıza	32 KB (ATmega328P)
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Saat Hızı	16 Mhz
LED	13
Uzunluk	68.6 mm
Genişlik	53.4 mm
Ağırlık	25g

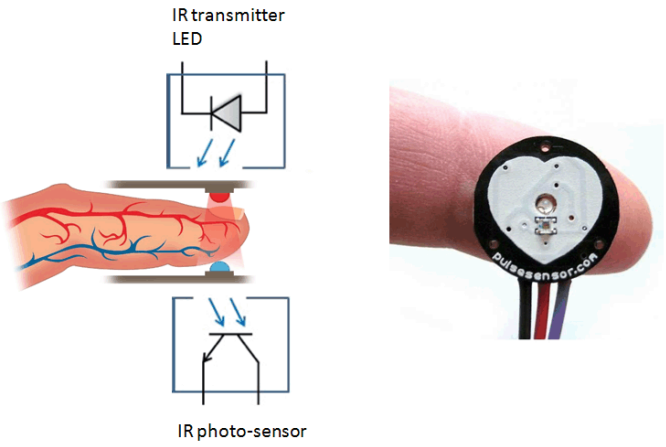
4.3 Kalp Hızı Nabız Sensörü

Mikrokontrolcü ve Arduino projelerinde kullanılan nabız sensörüdür. Şekil 4.4'de gösterilen sensör parmağın ucuna ya da kulağa sabitlenebilir. Sensörün beslenme gerilimi 3V veya 5V olabilir. Gürültü engelleme özellikli amfi devresi sayesinde kararlı nabız ölçümü gerçekleştirebilir. Nabız sensörü için belirtilebilecek özellikler aşağıda listelenmiştir.

1. ~60cm uzunluğunda erkek uçlu jumper kabloya sahiptir
2. Kulak veya parmak ucundan nabız ölçümü için kullanılabilir
3. Çap: 18,75mm

4. Kalınlık: 3,17mm
5. 3V vaya 5V besleme gerilimi
6. Akım Tüketimi: 4mA

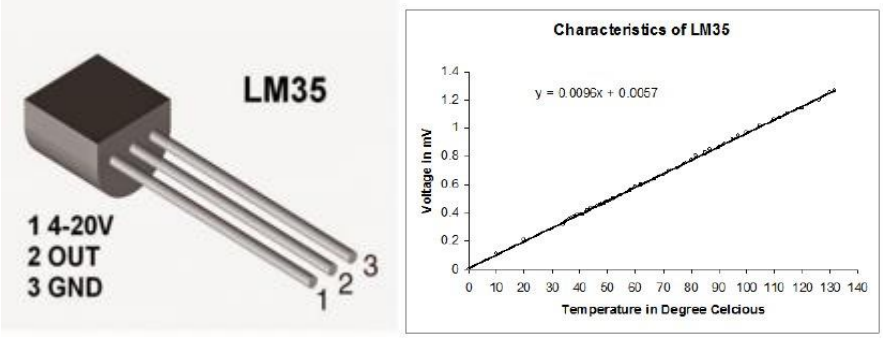
Nabız/Kalp atışı sensörünün basit bir çalışma yaklaşımı söz konusudur. Sensör iki katmandan oluşur. Ölçüm, parmağın veya kulak ucunun iki katman arasına konması ile yapılabilir. Sensörün birinci katmanında LED, ikinci ortamında ise ölçüm devresi yer alır. Bu devre, amplifikasyon ve gürültü önlemeden sorumludur. Sensörün ön tarafındaki LED vücudumuzdaki bir damarın üzerine yerleştirilir. Pratik ölçüm yerleri, parmak ucu veya kulak uçlarıdır. Ölçüm esnasında LED doğrudan damar üzerine düşecek bir ışık yayar. Damarlar yalnızca kalp pompalanırken içlerinde kan akışı olacağından, damardaki kan akışını izleyerek kalp atışları hesaplanabilir. Kan akışı sensördeki ledin yansıtacağı ışık yoğunluğunun, damardaki kan yoğunluğuna bağlı olarak değişmesinin sonucu olarak algılanır. Algılanan ışıktaki bu küçük değişim, kalp nabız atış sayısının hesaplanmasında kullanılır.



Şekil 4.4 Kalp Hızı Nabız Sensörü

4.4 LM35 Sıcaklık Sensörü

Şekil 4.5a'da gösterilen LM35 sıcaklık sensörü yarı iletken bir yapıya sahip olan bir sensörüdür. Hassas ve küçük değerli sıcaklık ölçümleri için ideal bir sensördür. -55°C ile 15°C arasında çalışabilen LM35 ısı sensörü çıkış geriliminin sıcaklık farkına göre değişmesi prensibi ile çalışır. Bir derece değişim çıkış gerilimini 10mV değiştirir. 4V ile 20V arasında giriş gerilimi uygulanabilen sensör, 0.5°C derece hassasiyete sahiptir. Sensörün karakteristiğini gösteren değişim, şekil 4.5b'de gösterilmiştir (Anonim.2019).



(a) (b)

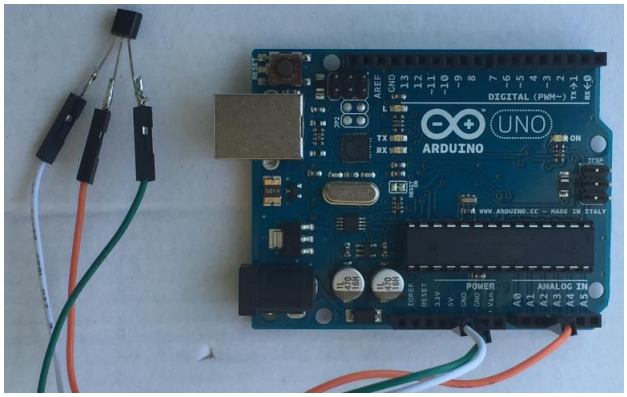
Şekil 4.5 LM35 Sıcaklık Sensörü (a) Fiziksel görüntüsü, (b) Karakteristik değişimi

Sensör hakkında belirtililebilecek özellikler aşağıda listelenmiştir.

- LM35 analog bir sensördür.
- LM35 hassas ve doğrusal bir sıcaklık sensörüdür.
- -55°C ile +150°C derece arasındaki sıcaklıkları ölçebilir.
- 1 °C derecelik sıcaklık artışında çıkışı 10mV artar.
- Giriş gerilimi olarak 4V- 30V arasında çalışabilir.
- 3 adet bacağı vardır,
- 1.bacak=besleme, 2.bacak=veri ve 3.bacak=toprak (GND)

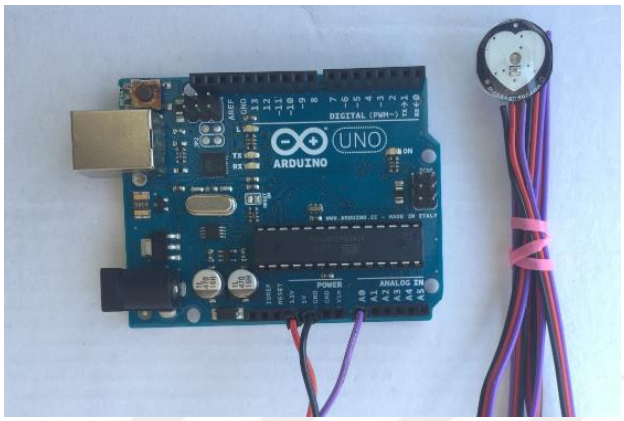
4.5 Ekipmanların Fiziksel Bağlantıları

Biyolojik işaretlerin elde edildiği devrenin alıcı tarafında LM35 sıcaklık sensörü Şekil 4.6'de gösterildiği gibi: 1 Nolu Besleme gerilimi bacağı Arduino bordun 5V gerilim pin girişine, 2 Nolu Veri bacağı Arduino bordun Anolog giriş pinine, 3 Nolu toprak bacağı Arduino bordun toprak bacağına bağlanır.



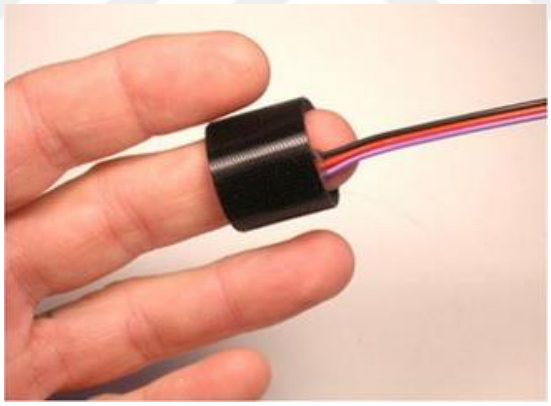
Şekil 4.6. LM35 Sıcaklık Sensörü Arduino Bağlantısı Diagramı

Nabız sensörü Şekil 4.7'de gösterildiği gibi; 2 Nolu Besleme gerilim bacağı Arduino bordun 5 V gerilim pinine, 3 Nolu Veri bacağı Arduino bordun Anolog giriş pinine ve 1 Nolu toprak bacağı Arduino bordun toprak bacağına bağlanır.



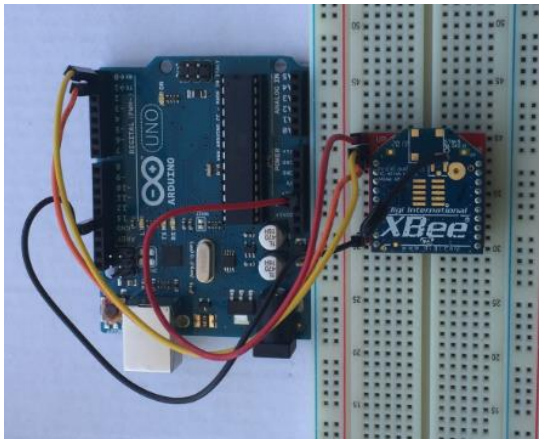
Şekil 4.7 Nabız Sensörü Arduino Bağlantı Diagramı

Sensör bağlantıları yapıldıktan sonra Nabız sensörü Şekil 4.8'de gösterildiği gibi parmaklardan birine özel aparatı ile tutturularak ölçme işlemi başlatılır.



Şekil 4.8 Nabız Sensörünün Ölçüm İçin Parmağa Takılması

Sensörler bağlandıktan sonra sensörlerden alınan ve arduino tarafından işlenen işaretlerin uzaktaki birime gönderilmesi görevini yerine getirmek üzere kablosuz ağın gönderici kısmını oluşturan XBee modülü, Şekil 4.9'daki gibi Arduino borduna bağlanır.

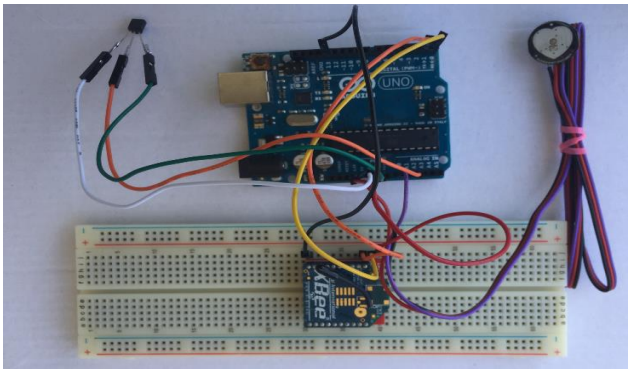


Şekil 4.9 Arduino XBee Bağlantısı

XBee moduller 3.3V beslenme gerilimi gerektirdiğinden beslenme kaynağı olarak arduinonun 3.3V çıkışı kullanıldı. XBee modül yönlendirici rolünde transparant çalışma modunda çalışacak şekilde tanıtılması gerekmektedir. Transparant mod kullanmamızın sebebi; bu ağda kullanılan XBee modülün görevi, Arduino dan aldığı sinyali uzak uçtaki koordinatör XBee'ye herhangi bir işlem yapmadan iletmesidir. Arduino bord ile XBee nin iletişimi için, Arduino bordun TX çıkışı XBee'nin RX çıkışına, Arduino bordun RX çıkışı ise XBee'nin TX çıkışına bağlandı.

XBee moduller 3.3 V beslenme gerilimi gerektirdiğinden beslenme kaynağı olarak arduinonun 3.3 V çıkışı kullanıldı. XBee modül yönlendirici rolünde transparant çalışma modunda çalışacak şekilde tanıtılması gerekmektedir. Transparant mod kullanmamızın sebebi, bu ağda kullanılan XBee modülün görevi Arduino dan aldığı sinyali uzak uçtaki koordinatör XBee'ye herhangi bir işlem yapmadan doğrudan iletmesidir. Arduino bord ile XBee nin iletişimi için, Arduino bordun TX çıkışı, XBee'nin RX çıkışına, Arduino bordun RX çıkışı, XBee'nin TX çıkışına bağlandı.

Şekil 4.10'da uygulamanın kapsamındaki sensörlerin bağlı olduğu iletim tarafının devre elemanlarının bağlatısı gösterilmiştir.



Şekil 4.10 İletim Tarafının Devre Elemanlarının Bağlantısı

Kablosuz ağın uzak uçu olan alıcı tarafı, koordinatör XBee modülü ile oluşturuldu. Koordinatör XBee modülü Şekil 4.11'de gösterilen şekilde USB çıkışı bulunan bir XBee Explorer'a takılarak bilgisayarın USB portundan beslenme gerilimi alacak şekilde bilgisayara bağlanır.



Şekil 4.11 XBee Modülün XBee Explorer ile Bilgisayara Bağlanması

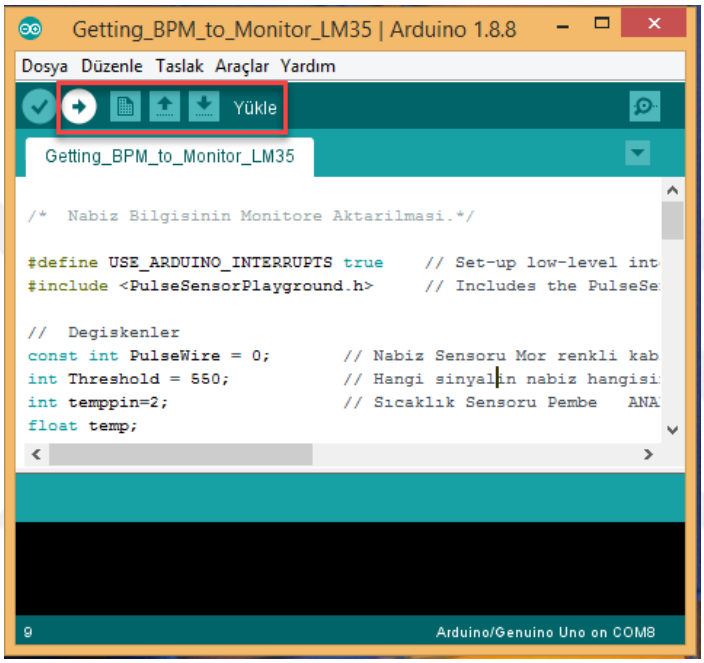
Bilgisayara bağlanan koordinatör rolüne sahip XBee bağlanması ile uygulamada sensör işaretlerini ileteceğimiz kablosuz ağın fiziksel bağlantıları tamamlanmış olur. Sensör ve ağ elemanlarının fiziksel bağlantıları gerlekleştirildikten sonra, devre elemanlarının konfigüre edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

4.6 Ekipmanların Konfigürasyonu

Bu bölümde yukarıda tanıtılan ve fiziksel bağlantıları yapılan devre elemanlarının lojik anlamda ağ oluşturması için gerekli olan konfigürasyon adımları tanıtılmıştır.

4.6.1 Arduino Konfigürasyonu

Arduino bordun A0 ve A2 fiziksel analog uçlarına bağlı sensörlerden işaretlerin alınması ve işlenmesi için Arduino borduna bu işleri yapmasını sağlayacak kodların yüklenmesi gerekmektedir. Konfigrasyon ve kod yükleme işlemlerini yapmak üzere üretici firma tarafından geliştirilen ve ücretsiz olarak internet sitesinden indirilebilen Arduino IDE adlı program kullanılmıştır. Sensörlerden bilgilerin alınması ve işlenmesi için hazırlalan program kodları Şekil 4.11'de gösterilen IDE arayüz üzerinden Arduino borda yüklenip program çalıştırılmıştır.



Şekil 4.12 Arduino IDE

Sensörleden ölçüm sonuçlarının alınıp işlenmesi için yazılan kod örneği aşağıda listelenmiştir.

/* Nabiz Bilgisinin Monitore Aktarilmasi.*/

#define USE_ARDUINO_INTERRUPTS true // Set-up low-level interrupts for most acurate BPM math.

#include <PulseSensorPlayground.h> // Includes the PulseSensorPlayground Library.

// Degiskenler

const int PulseWire = 0; // Nabiz Sensoru Mor renkli kablo ANALOG PIN 0 a bagli

int Threshold = 550; // Hangi sinyalin nabiz hangisinin olmadiginin tanimi.

int temppin=2; // Sıcaklık Sensoru Pembe ANALOG PIN 2 ye bagli

float temp;

```
PulseSensorPlayground pulseSensor;  // Creates an instance of the PulseSensorPlayground
object called "pulseSensor"

void setup() {
Serial.begin(9600);          // Seri Port Monitor icin
// Configure the PulseSensor object, by assigning our variables to it.
pulseSensor.analogInput(PulseWire);
pulseSensor.setThreshold(Threshold);

// Double-check the "pulseSensor" object was created and "began" seeing a signal.
if (pulseSensor.begin( )) {
   Serial.println("Nabız Sensör Ölçümü Başladi!");  //Bu bilgi Arduino resetlediginden veya
                                                      yeni acildiginda bir defaya mahsus yazilir.
   }
}
void loop() {
int myBPM = pulseSensor.getBeatsPerMinute();  // Calls function on our pulseSensor object
                                                 that returns BPM as an "int".
                                               // "myBPM" hold this BPM value now.

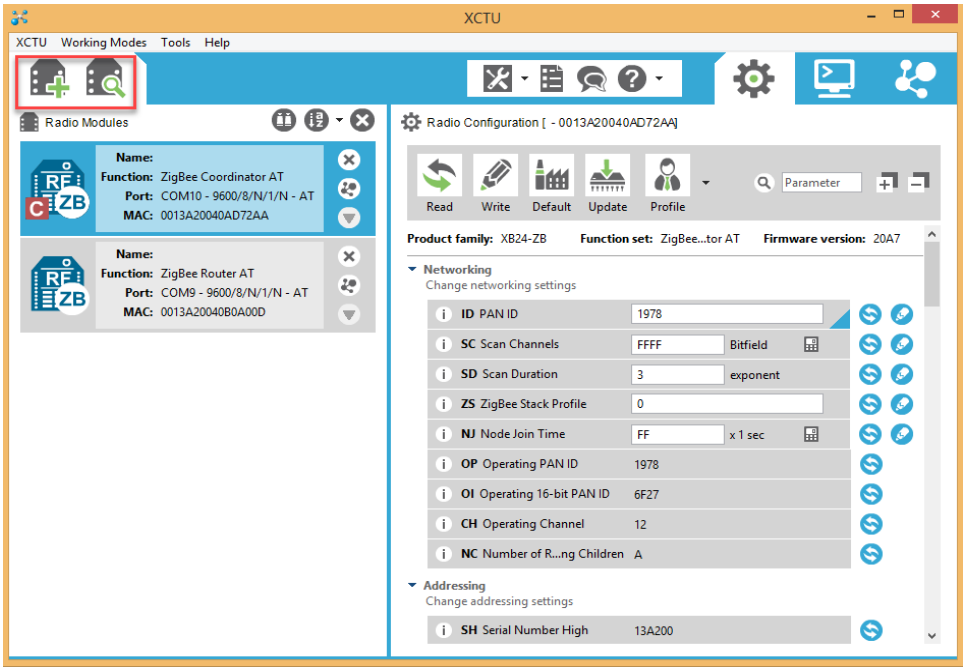
if (pulseSensor.sawStartOfBeat()) {           // Constantly test to see if "a beat happened".
temp=analogRead(temppin);     // Reading veri from the sensor.
                                  This voltage is stored as a 10bit number
temp=(5.0*temp*1000.0)/(1024*10);
Serial.print("NABIZ BILGISI"); // If test is "true", print a message "a heartbeat happened".
Serial.print("BPM: ");                  // Print phrase "BPM: "
Serial.print(myBPM);                   // Print the value inside of myBPM.
Serial.print("\t");
Serial.print("       SICAKLIK DEGERI:");
Serial.print(temp);
Serial.print(" C DERECE");
Serial.println();
    }
```

```
temp=analogRead(temppin); // Reading veri from the sensor. This voltage is stored as a 10bit
number
temp=(5.0*temp*1000.0)/(1024*10);

Serial.print("NABIZ BILGISI ALINAMIYOR");
Serial.print("\t");
Serial.print("SICAKLIK DEGERI:");
Serial.print(temp);
Serial.print(" C DERECE");
Serial.println();
delay(3000);// This is because we dont want a continuous stream of data
}
```

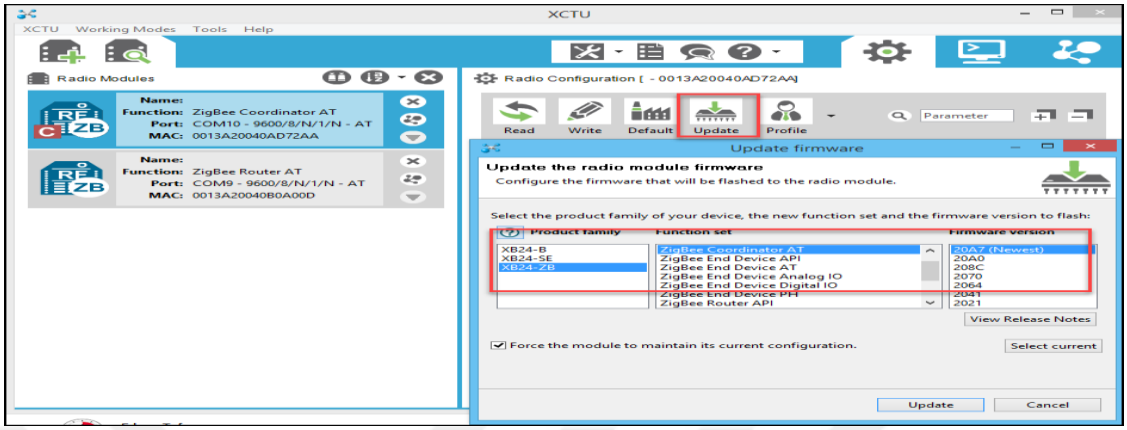
4.6.2 XBee Konfigürasyonu

XBee modüllerinin konfigrasyonu için üretici DIGI firması tarafından geliştirilen, firmanın internet adresinden ücretsiz olarak yüklenebilen, XCTU adlı program kullanılmıştır. XCTU ile XBee modüllerin konfigrasyonu için öncelikle Şekil 4.13'de gösterildiği gibi XCTU üst menülerinden Radyo Modül Ekle seçeneği tıklanarak bağlı XBee modüller programa eklenmiştir.



Şekil 4.13 XBee Modüllerin XCTU Programına Eklenmesi

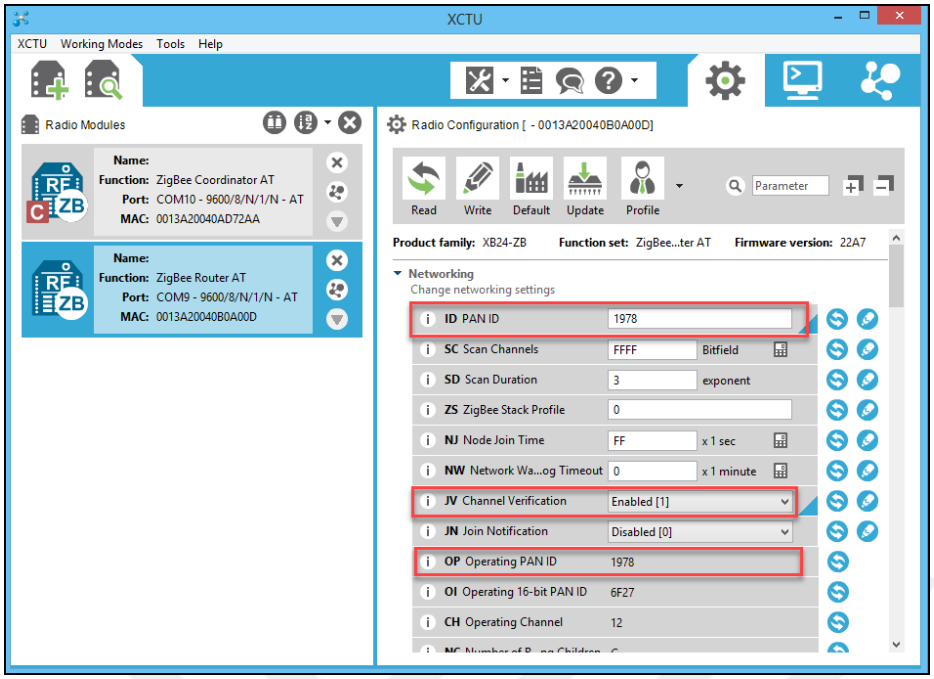
XBee modüller XCTU programına ilave edildikten sonra Şekil 4.14'de gösterilen Update üst menüsünden ilerleyerek, modüllerin ağda hangi rol ve mod ile çalışacağı bilgisi yüklenir.



Şekil 4.14 XBee Modülün Çalışma Mod ve Rollerinin Yüklenmesi

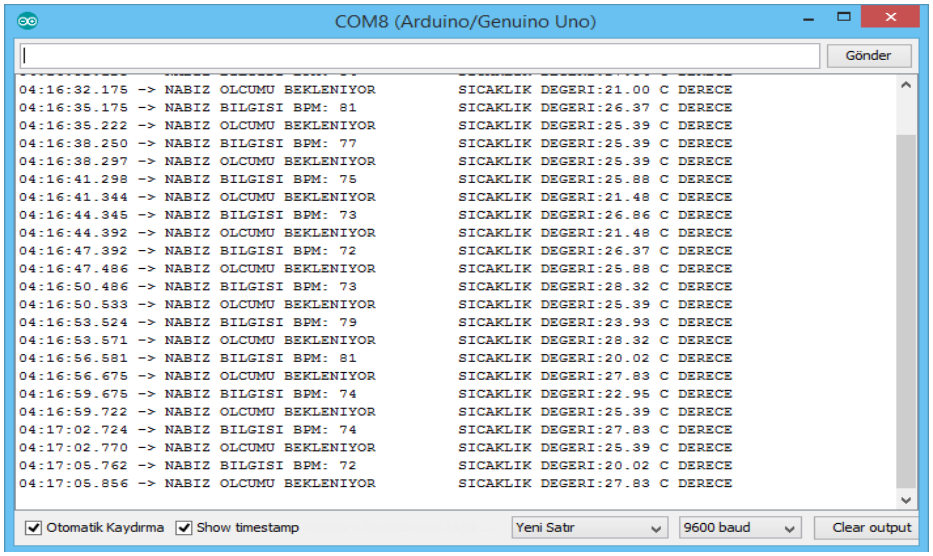
Bu çalışmada kullanılan XBee modüllerden verici uçtaki modül yönlendirici rolünde transparant (AT) modunda, alıcı tarafındaki modül ise koordinatör rolünde transparant (AT) modunda çalışacak şekilde konfigüre edilmiştir.

XBee modüllerin çalışma rol ve modları tanımlandıktan sonra son aşama olarak lojik ağ yapısı için gerekli olan PANID ve JV Channnel Verification adlı parametreler konfigüre edilmiştir. ZigBee ağlarda lojik ağ yapısını oluşturabilmek için bütün ağ elemanlarının, PANID değeri aynı olmak zorunda olduğundan, hem yönlendirici hem de koordinatör için 1978 değeri atanmıştır. PANID değerinin tanımlanmasından sonra yönlendirici modül tarafında JV parametresi *Enabled* olarak ayarlanmıştır. Bu parametrenin görevi yönlendirici çalışmaya başladığında ortamda ağ oluşturabilecek koordinatör olup olmadığını kendiliğinden kontrol etmesini sağlamaktır. Şekil 4.15'de PANID ve JV Channnel Verification parametrelerinin XCTU da nasıl ayarlanacağı gösterilmiştir.



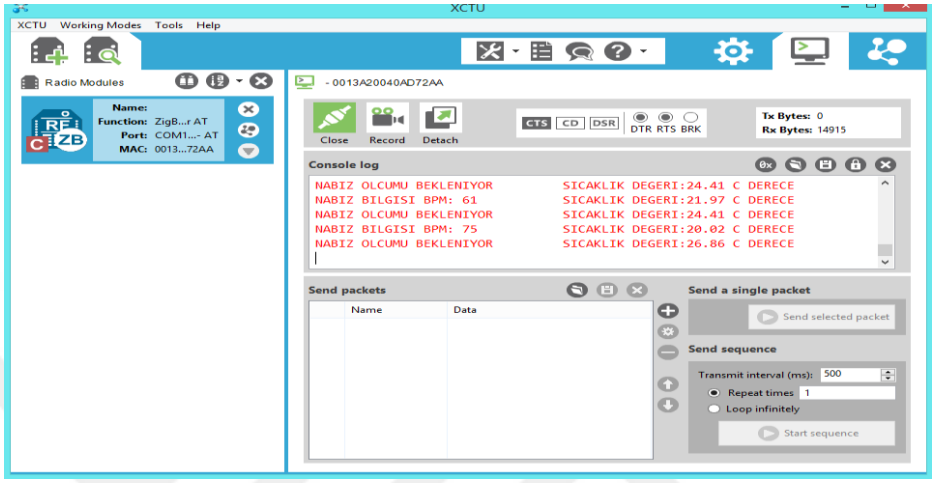
Şekil 4.15 PANID ve JV Channnel Verification Parametrelerinin Ayarlanması

Ekipmanların konfigürasyonu yapılması ile sensör ve kablosuz ağımız çalışmaya hazır duruma gelmiştir. Ağ üzerindeki bilgi akışını gözlemlemek amacı ile öncelikle ağın alıcı tarafında arduinonun sensörlerden bilgiyi alıp almadığı kontrol edilir. Bilgi akışı Şekil 4.16'da gösterildiği gibi arduino seri port ekranından gözlemlenmiştir. Gözlem sonucunda bilgi akışı mevcut, anlamlı ve kesintisiz olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.16 Sıcaklık ve Nabız Bilgisinin Arduino Seri Porttan Görüntülenmesi

Alıcı uç tarafında arduinonun sensörlerden bilgi akışı kontrol edilip doğrulandıktan sonra; bu bilginin verici konumundaki XBee modülü tarafından alınıp, kablosuz ağ üzerinden uzak uçtaki alıcı konumundaki koordinatör XBee modülene iletilip iletilmediği kontrol edilmiştir. Yapılan test sonucu, Koordinatör XBee modülün terminal çıkışında gözlemlenen değerler Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 Kondinatör XBee Tarafından Alıcı Uç İşaretlerin Alınması

Arduino seri port ekranından alınan sıcaklık ve nabız işaretleri herhangi bir bozulma ve kesintiye uğramadan uzak uctaki koordinatör XBee modül terminalinden alındığı gözlemlenmiştir. Böylece fiziksel bağlantıları yapılıp gerekli konfigürasyon bilgileri yüklenen kablosuz sensör ağı, tasarlandığı gibi ölçme işlemini yapıp, ölçülen işaretleri kablosuz ağ üzerinden uzak bir birime sorunsuz olarak başarıyla iletebildiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, ZigBee konusunda Türkçe kaynak sıkıntısını gidermek ve temel düzeyde bir ZigBee uygulaması gerçekleyerek, basit bir kablosuz ağın oluşumu hakkında temel bilgi verebilmektir. Bu temel çalışmanın ardından, profesyonel düzeyde ağ tasarlayıp uygulama yapmanın kolaylığını göstermek açısından, bir sonraki bölümde XBee modüllerin konfigürasyonu için kullanılan XCTU program menülerinin detayları anlatılmıştır.

4.7 XCTU Menüleri

Meteryal ve metot bölümünde ZigBee/IEEE 802.15.4 ağ örnekleri kısmında farklı ZigBee uygulamaları incelenmişti. Bu bölümde ise XCTU konfigürasyon arayüz program menüleri ve XBee modüllerin farklı konfigürasyon parametreleri incelenmiştir. Konfigürasyon parametrelerini tanımak, ihtiyaca göre farklı ağ yapılarını tasarlama esnekliği kazandırır.

4.7.1 XCTU Çalışma Modları

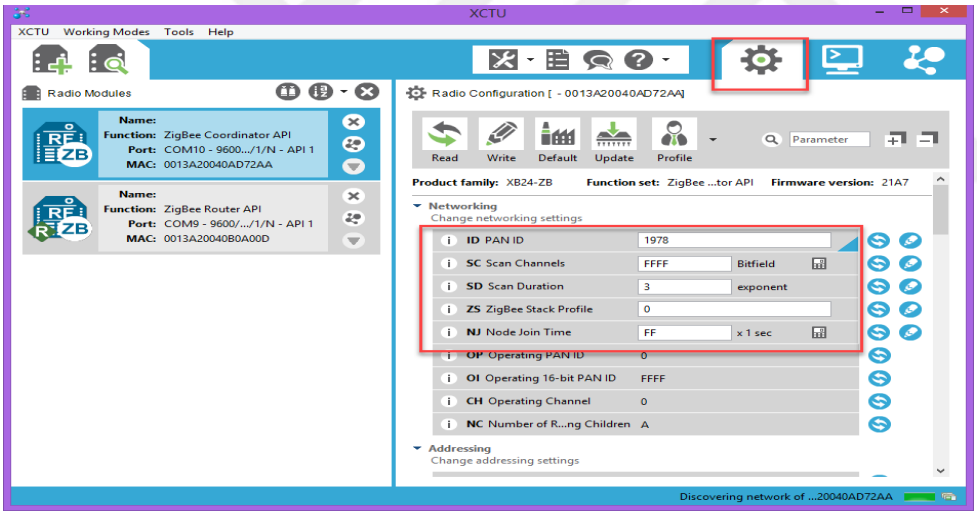
XCTU çalışma modları, Şekil 4.18'de gösterilen üç çalışma modunda gruplandırılır.



Şekil 4.18 XCTU Çalısma Modları 1.Konfigürasyon, 2. Konsollar ve 3. Ağ

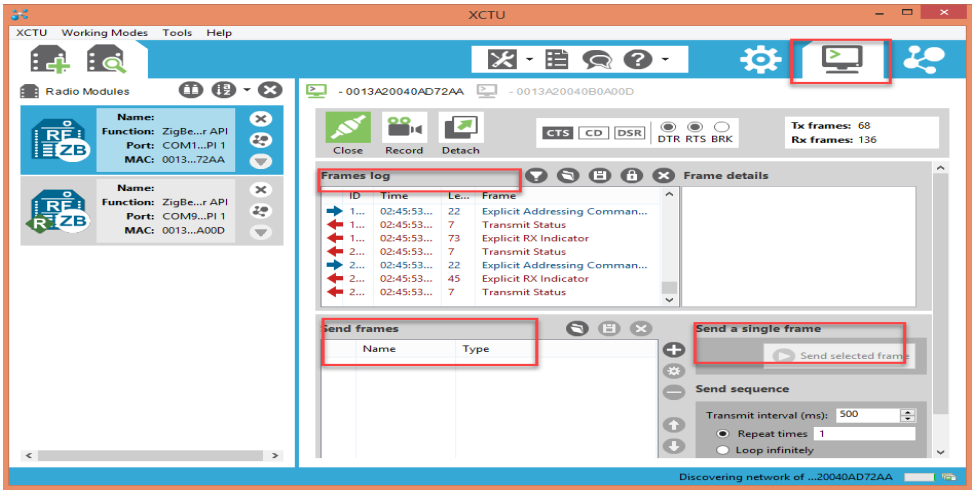
Her bir çalışma modu, bir radyo modülüyle yapılabilecek farklı işlemler içermektedir. Aynı anda birden fazla çalışma modu seçilemez ve XBee modülleri operasyonel olarak aynı anda yalnız bir mod ile çalışır. XCTU programı açıldığında, varsayılan olarak Konfigürasyon modunda açılır.

1) Konfigürasyon Modu: XBee modullerinin konfigüre edilebilecek parametrelerinin grafik arayüz üzerinden kolaylıkla atanması işlemleri yürütülür. Şekil 4.19'da Konfigürasyon çalışma modu gösterilmiştir.



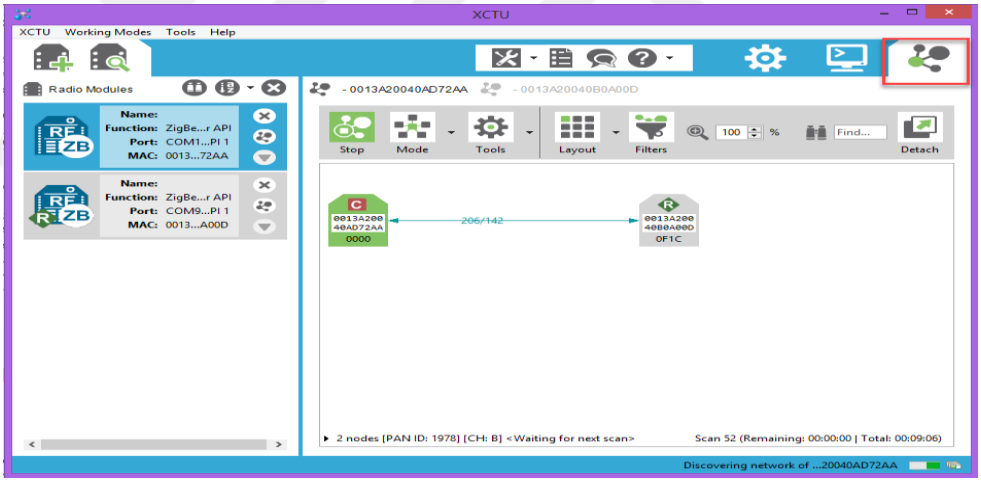
Şekil 4.19 XCTU Konfigrasyon Çalışma Modu

2) Konsol Modu: Konfigürasyon modunda grafik arayüz ile yapılan tüm parametrik değişiklikler komut arayüzü ile yapılabilir. Buna ilaveten ağdaki diğer elemanlardan gelen ve giden bilgi akışı gözlemlenebilir. Ayrıca komut bilgisi (çerçevesi) gönderilebilir. Şekil 4.20'de Konsol çalışma modu gösterilmiştir.



Şekil 4.20 XCTU Konsol Çalışma Modu

3) Ağ Modu: Ortam taranıp XBee modüllerine ilişkin ağ yapısının tablo veya grafik olarak gözlemlenmesi amacı ile kullanılır. Şekil 4.21'de Ağ çalışma modu gösterilmiştir.



Şekil 4.21 XCTU Ağ Çalışma Modu

4.7.2 XCTU Radyo Modüllerin Çalışma modları

Bir XBee modülünün çalışma modu, bağlı olduğu diğer modüller ve mikro işlemciler ile nasıl haberleşme yapacağını belirler. Bu haberleşme türleri; Evrensel Asenkron Alıcı / Verici (UART, Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) veya seri arayüz olabilmektedir. Firmware yapılandırmasına bağlı olarak, radyo modülleri iki farklı çalışma modunda çalışabilir. Çalışma modları:

1. Uygulama Şeffaf (AT, Application Transparent) İşletim modu: Bu modda radyo tarafından alınan tüm veriler, RF iletimi için sıraya alınır ve seri ara yüz üzerinden gönderilir.
2. Uygulama Programlama Arabirimi (API, Application Programming Interface): API çalışma modu, AT moduna bir alternatiftir. API modda yapılandırılmış arayüz üzerinden API çerçeveleri ile bilgiler iletilir. API çalışma modu ile şunlar yapılabilir:

    - XBee modülünün kendisini yapılandırma
    - Ağdaki uzak modülleri yapılandırma
    - Birden fazla hedefe veri iletimini yönetme
    - İletilen her RF paketinin başarı/başarısızlık durumunu alma
    - Alınan her paketin kaynak adresini tanımlama.

Bir API çerçevesi Şekil 4.22'de gösterilen yapıya sahiptir:



Şekil 4.22 API Çerçece yapısı

Start Delimiter: Bir çerçevenin ilk baytı, onu gösteren özel bir bit dizisinden oluşur. Veri çerçevesinin başlangıc değeri her zaman 0x7E'dir.

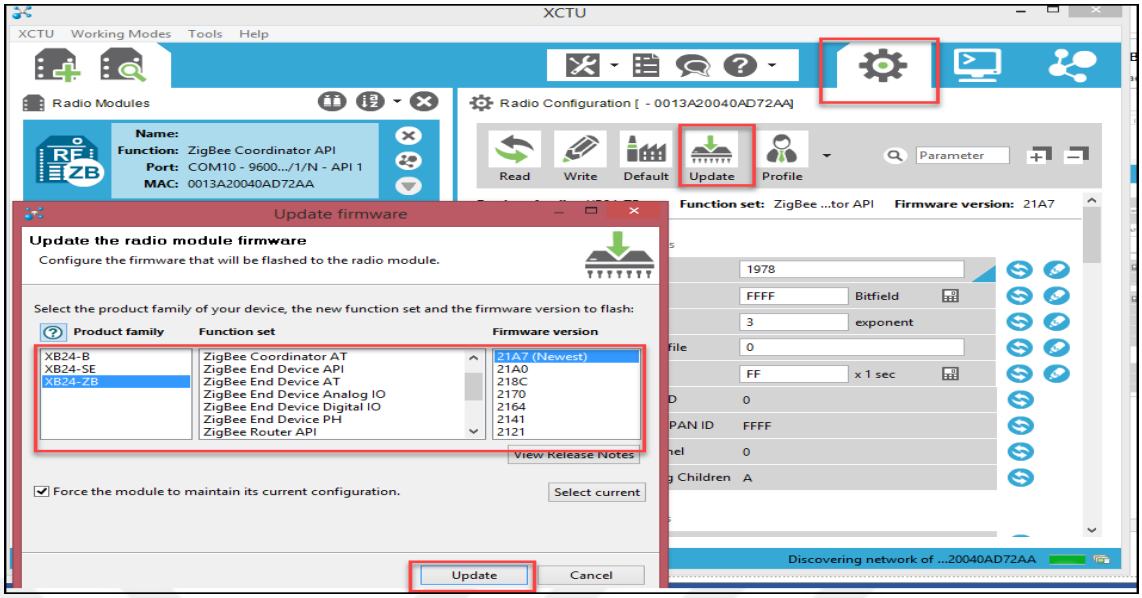
Length: Çerçeve veri alanına dahil edilen toplam bayt sayısını belirtir. İki baytlık değeri, başlangıç sınırlayıcıyı, uzunluğu ve sağlama toplamını hariç tutar.

Frame Veri: API tanımlayıcısı ve API tanımlayıcıya özgü verilerden oluşur. Belirli verilerin içeriği, API tanımlayıcısına (ayrıca API çerçeve türü olarak da adlandırılır) bağlıdır.

Checksum: Çerçevenin son baytı. Veri bütünlüğünün test edilmesine yardımcı olur ve ilk üç baytı (başlangıç sınırlayıcı ve uzunluk) hariç önce gelen tüm API çerçeve baytlarının toplamını alarak hesaplanır.

4.7.3 XCTU Firmware Güncelleme

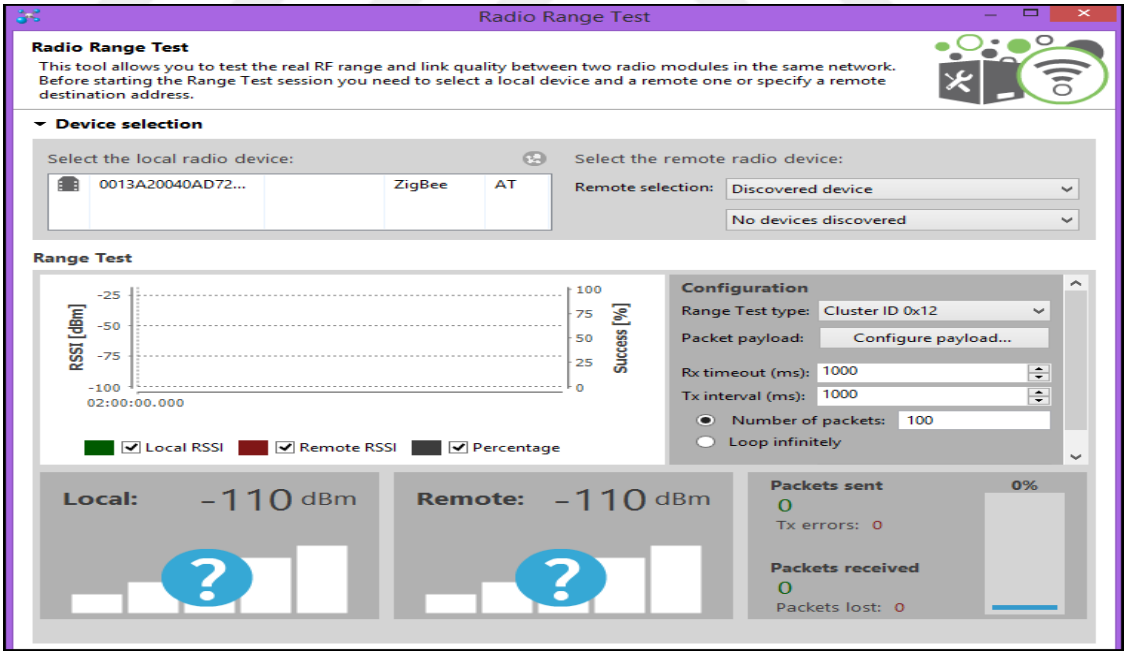
Aynı XBee modüllerine XCTU üzerinden firmware güncelleme ile farklı roller yüklenebilir. Şekil 4.23'de gösterilen Update menüsü ile modüllerin firmware güncellemesi yapılır.



Şekil 4.23 XBee Modüllerin Firmware Güncellenmesi

4.7.4 XCTU Radyo Kapsama Testi

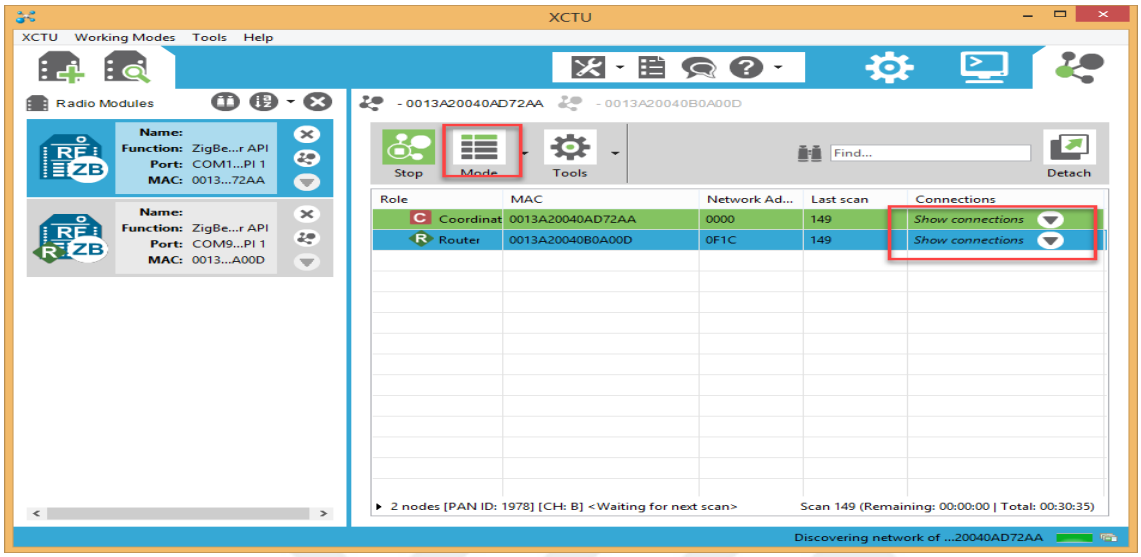
Şekil 4.24'de gösterilen Tools/Range Test menüsünden XBee modüllerin Radyo Kapsama testi yapılır.



Şekil 4.24 XBee Modüllerin Radyo Kapsama Testi

4.7.5 XCTU Ağ Yapısını Görüntüleme

Aşağıda Şekil 4.25'de gösterilen Mode müst menüsünden XBee modüllerin oluşturduğu ağa ait genel durum tablo formatında gözlemlenir.

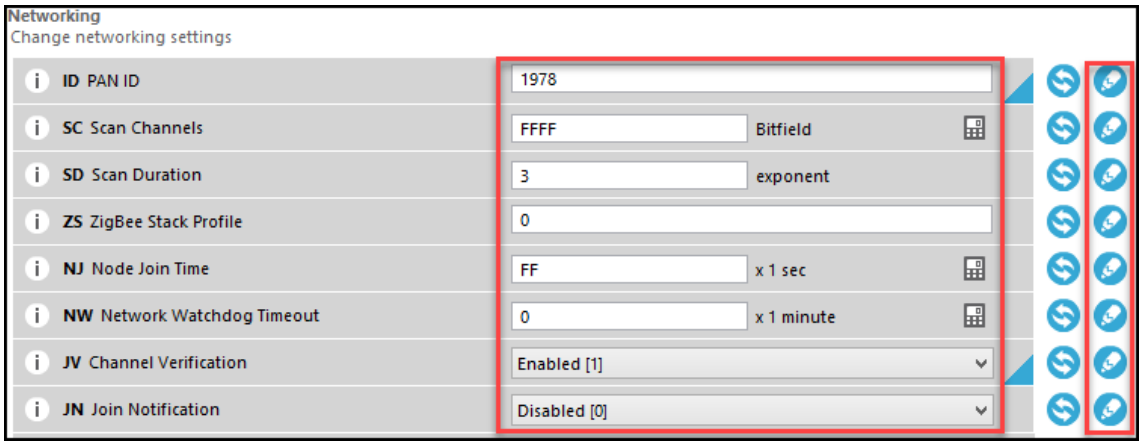


Şekil 4.25 XBee Ağ Elemanlarının Tablo Görüntüsü

4.7.6 XCTU ile Konfigüre Edilebilen XBee Parametreleri

XCTU üzerinden XBee modülleri için tüm tanımlı parametreler tanıtılıp güncellenebilmektedir. Farklı guruplara ait çok sayıda parametre üzerinde değişiklik yapılabildiğinden dolayı XBee modülleri ile her türlü kablosuz ağ yapısı kolaylıkla hayata geçirilebilmektedir.

Şekil 4.26'de Ağ ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir



Şekil 4.26 XBee Modüllerin Ağ ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

Ağ ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

ID PAN ID:PAN kimliğini belirler. 0 (varsayılan) olarak ayarlanmış ise cihaz rastgele bir PAN ID seçer.

SC Scan Channels: Taranacak kanal listesini belirlemek için kullanılır. Koordinatör tarafında bu değer ile ağ başlamadan önce seçilecek kanalların bilgisi koordinatöre bildirilir. Yönlendirici ve uc cihazlarda ise bu değer, ağa dahil olmak için dinlenecek kanal bilgilerini belirler.

SD Scan Duration: Verilen kanalda koordinatörün ne kadar süre ile enerji veya aktif tarama yapacağını ayarlar.

ZS ZigBee Stack Profile: ZigBee yığın profili değeridir. Bu, aynı ağa katılacak tüm cihazlarda aynı olmalıdır. Yığın profili değişirtirilirken, seri girişi önlemek için CTS'nin kullanılması istenir.

NJ Node Join Time: Bir koordinatör veya yönlendiricinin düğümlerin birleşmesine izin verdiği süredir. Bu değer çalışma zamanında bir koordinatör veya yönlendiricinin yeniden başlatılmasını gerektirmeden değiştirebilir. Koordinatör veya yönlendirici başladıktan sonra zaman başlar ve zamanlayıcı güç döngüsünde veya NJ değiştiğinde sıfırlanır. NJ < 0xFF ise cihaz ağın bağlanmasına izin vermediğini varsayar ve ilk önce birleştirmeyi kullanarak bir ağa katılmaya çalışır. Birden fazla birleştirme denemesi başarısız olursa veya NJ = 0xFF ise cihaz birleşme prosedürünü kullanarak katılmaya çalışır.

NW Network Watchdog Timeout: Ağ gözcü zaman aşım değeri olarak adlandırılır. NW> 0 olarak ayarlanırsa, yönlendirici koordinatörden (veya veri toplayıcıdan) iletişimi izler ve koordinatörle 3 NW dönemi boyunca iletişim kuramıyorsa ağı terk eder. Cihaz, her bir koordinatörden veri aldığında veya gönderdiğinde zamanlayıcıyı sıfırlar.

JV Channel Verification: Açılışta birleştirme doğrulama kontrolünü sağlar. Etkinleştirilir ise XBee modülü, bir ağa ilk bağlandığında koordinatörün 64 bit adresini keşfetmeye çalışır. Bir kez katıldıktan sonra, bir kopma yaşanırsa koordinatörün 64 bit adresini yeniden keşfetmeye çalışır. 3 keşif denemesi başarısız olursa, yönlendirici ağdan ayrılır ve yeni bir ağa katılmaya çalışır. Açılışta JV varsayılan olarak 0'dır.

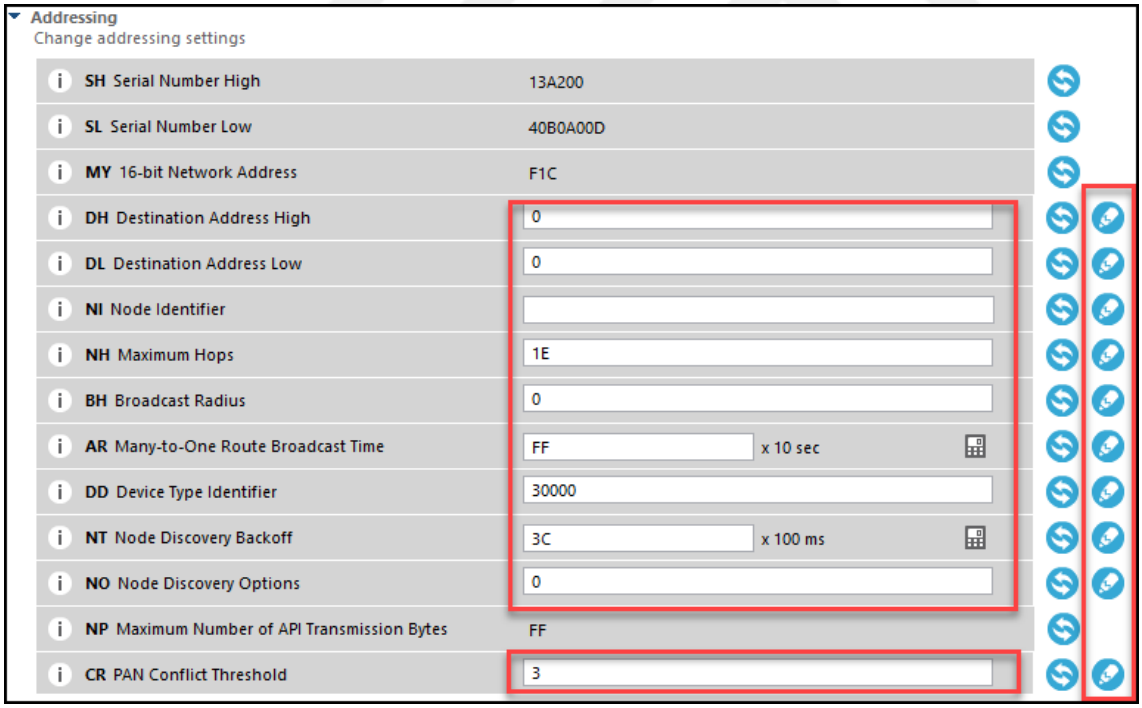
JN Join Notification: Katılım bildirme bilgisi. Etkin ise cihaz açıldığında ve ağa dahil olduğunda yayın paketi iletir. Bu işlem, iletimi alan tüm cihazlarda Associate LED'i hızlı bir şekilde yanıp söner ve API cihazlarının seri portundan bir API çerçevesi gönderir. DİGİ aşırı yayınları önlemek için büyük ağlar da bu özelliğin devre dışı bırakılmasını önerir.

Şekil 4.27'de Adresleme ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir. Adresleme ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

DH Destination Address High: Verilerin aktarılacağı hedef adresi tanımlar. Bu parametrenin değeri, diğer modülün yüksek seri numarası (SH) olmalıdır.

DH Destination Address Low: Verilerin aktarılacağı hedef adresi tanımlar. Bu parametrenin değeri, diğer modülün düşük seri numarası (SL) olmalıdır.

NI (Node Identifier):Düğüm tanımlayıcı parametresidir. Cihaza kullanıcı tarafından tanımlanan bir ad veya açıklamadir En fazla 20 ASCII karakter olabilir.



Şekil 4.27 Xbee Modüllerin Adresleme ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

NH Maximum Hops: Bir ağ yolunda görülmesi beklenen maksimum atlama sayısı. Bu değer, bir rota keşfinde kullanılan atlama sayısını sınırlar. Böylece, tek noktaya yayın içinde izin verilen atlama sayısını sınırlar. Ek olarak, NH bir ağ onayı için zaman aşımını hesaplamak için kullanılır.

BH Broadcast Radius: Yayın veri iletimi için maksimum iletim atlama sayısı. BH, NH'den daha büyük bir değere ayarlarlanır ise cihaz NH değerini kullanır.

AR Many to One Route Broadcast Time: Çoktan bire rota yayını zaman aşımı (AR) parametresi, bir XBee modülünde çoktan bire bir bir yayın yapılmasına olanak sağlar. AR parametresi, çoktan bire bir yayın iletimini göndermek için bir zaman belirler. AR değerini 0xFF olarak ayarlamak, cihazda çoktan bire bit yayınını engeller.

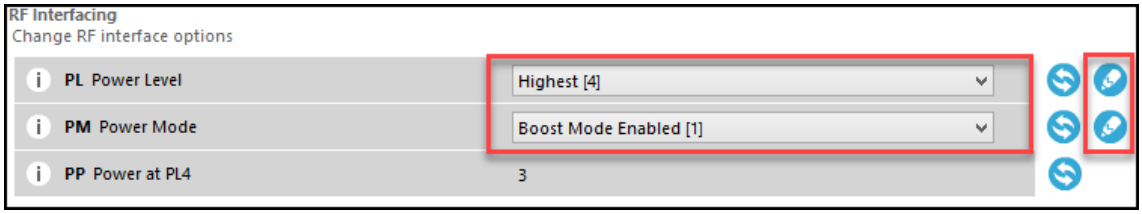
DD Device Type Identifier: DIGI cihaz tipi tanımlayıcı değerini saklar. Birden fazla XBee cihazı arasında ayrım yapmak için bu değeri kullanılır.

NT Network Discovery Backoff: Bu değer, cihazın ağ bulma yanıtları göndermekte kullandığı rasgele gecikme için maksimum değeri belirler.

NO Network Discovery Options: Seçenekler bit alanı değeri, ND komutunun davranışını değiştirir ve bir ND komutu veya API Düğüm Tanımlama Göstergesi (0x95) çerçevesi aldığında yerel cihazın döndürdüğü, isteğe bağlı değerleri değiştirir. NO bit 1 = 1 olduğunda, Node Discover gerçekleştiren bir aygıt kendisi için bir yanıt girişi içerir.

CR PAN Conflict Threshold:PAN ID değişikliğini tetiklemek için bir dakika içinde şebeke yöneticisi tarafından alınması gereken PAN ID çakışma raporlarının sayısı. Bozuk bir işaret, yanlış bir PAN ID çakışması raporuna neden olabilir. Daha yüksek bir değer, hatalı bir PAN ID değişikliği olasılığını azaltır.

Şekil 4.28'de RF arayüz ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir. RF arayüz ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.28 XBee Modüllerin RF Arayüz ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

PL Power Level: Cihazın yürütülen gücü ilettiği güç seviyesini ayarlar. Güç seviyeleri yaklaşık değerlerdir. XBee için PL=4, PM=1 üretim sırasında test edilir. Diğer güç seviyeleri yaklaşık değerlerdir.

PM Power Mode: Cihazın güç modunu ayarlamak için kullanılır. Takviye modunu etkinleştirmek alma hassasiyetini 2dB arttırır ve iletim gücünü 3dB arttırır.

Şekil 4.29'da XBee modüllerin güvenlik ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir. Güvenlik ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.29 XBee Modüllerin Güvenlik ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

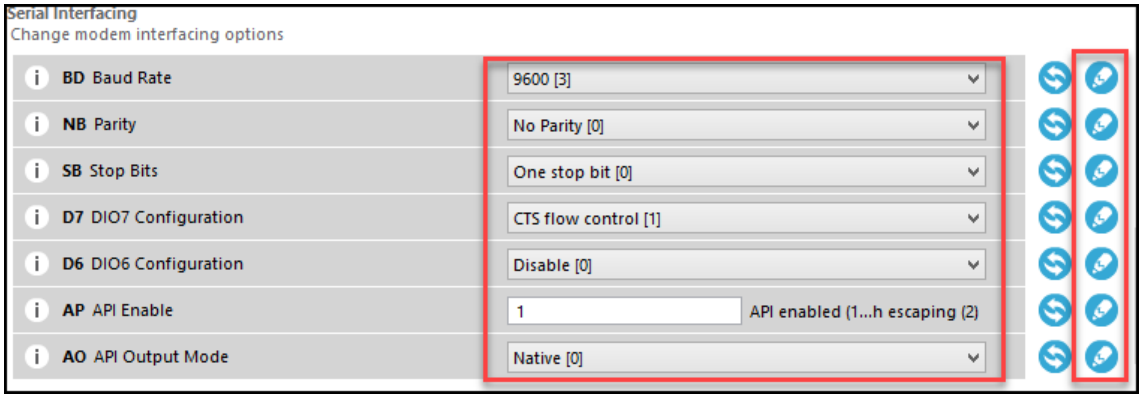
EE Encryption Enable: 256-bit Gelişmiş Şifreleme Standardı (AES) şifrelemesini etkinleştirir veya devre dışı bırakır. Bir cihazda güvenliği etkinleştirmek için, Şifreleme Etkin (EE) parametresi 1 olarak ayarlanmalıdır. Parametre değeri değiştiğinde, XBee modülü çalıştığı ağı terk eder. EE 1 olarak ayarlandığında, tüm veri iletimleri ağ anahtarıyla şifrelenir.

EO Encryption Options: Koordinatörü güvenlik merkezi olarak tanımlar Koordinatör güvenlik merkezi olarak tanımlanmış ise ağdaki tüm katılımlarda uyarı mesajı alır. Güven merkezi, ağdaki ağ anahtarını güncelleme veya değiştirme özelliğine de sahiptir.

KY Encryp116tion Key: Cihazın şifreleme ve şifre çözme için kullandığı 256 bit ağ güvenlik anahtarı değerini ayarlar. Bu değer bir ağdaki tüm cihazlarda aynı değer atanmalıdır.

.

Şekil 4.30'da XBee modüllerin seri arayüz ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir. Seri arayüz ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.30 XBee Modüllerin Seri Arayüz ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

BD Baud Rate: Cihaz ve ana bilgisayar arasında seri arabirim veri hızını (baud hızı) ayarlar. Baud hızı, sunucunun cihaza seri veri gönderme hızıdır.

NB Parity: UART iletişimleri için seri eşik ayarlarını ayarlamak için kullanılır.

SB Stop Bits: UART iletişimleri için durma bitlerinin sayısını ayarlar.

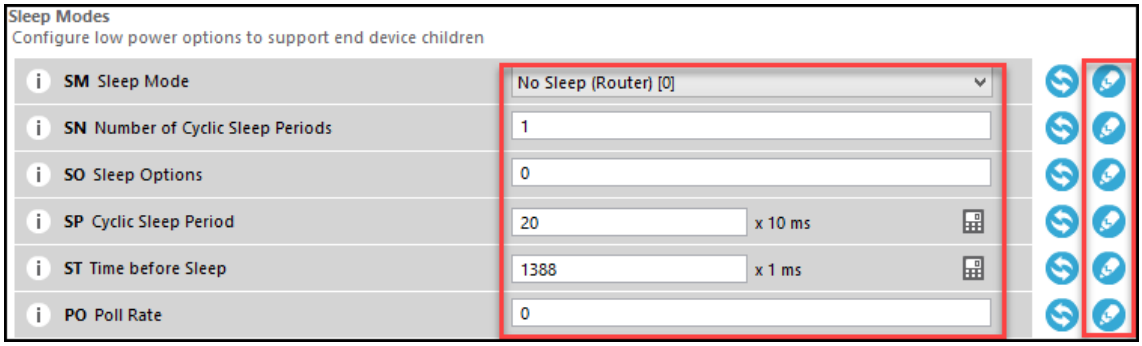
D7 DIO7 Configration: 7 nolu pinin nasıl konfigre edileceğine karar vermek için kullanılır.

D6 DIO6 Configration: 6 nolu pinin nasıl konfigre edileceğine karar vermek için kullanılır.

AP API Enable: API modu aktif hale getirir. API mod aktif olduğunda, cihaz aldığı RF paketlerini API çerçevelerine biçimlendirebilir ve seri porttan gönderebilir.

AO API Output Mode:API çerçeve seçeneklerini yapılandırır API'yi etkinleştirdiğinizde, seri çalışma verilerini API çerçeveleri olarak biçimlendirilir. Alınan RF paketlerinde API veri çerçevesi çıktı formatını belirlemek için AO parametresi kullanılır.

Şekil 4.31'de XBee modüllerin uyku modu ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir. Uyku modu ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.31 XBee Modüllerin Uyku Modu ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

SM Sleep Mode: Cihazların varsayılan çalışma modu sürekli uyanık moddur. SM parametresi ile uyku modu aktif edilir. Böylece cihazlar sinyal olmadıkça uyku moduna geçip batarya tüketimini minimum düzeyde tutarlar.

SN Number of Cyclic Sleep Periods: Uyku periyodu değerini ayarlamak için kullanılır.

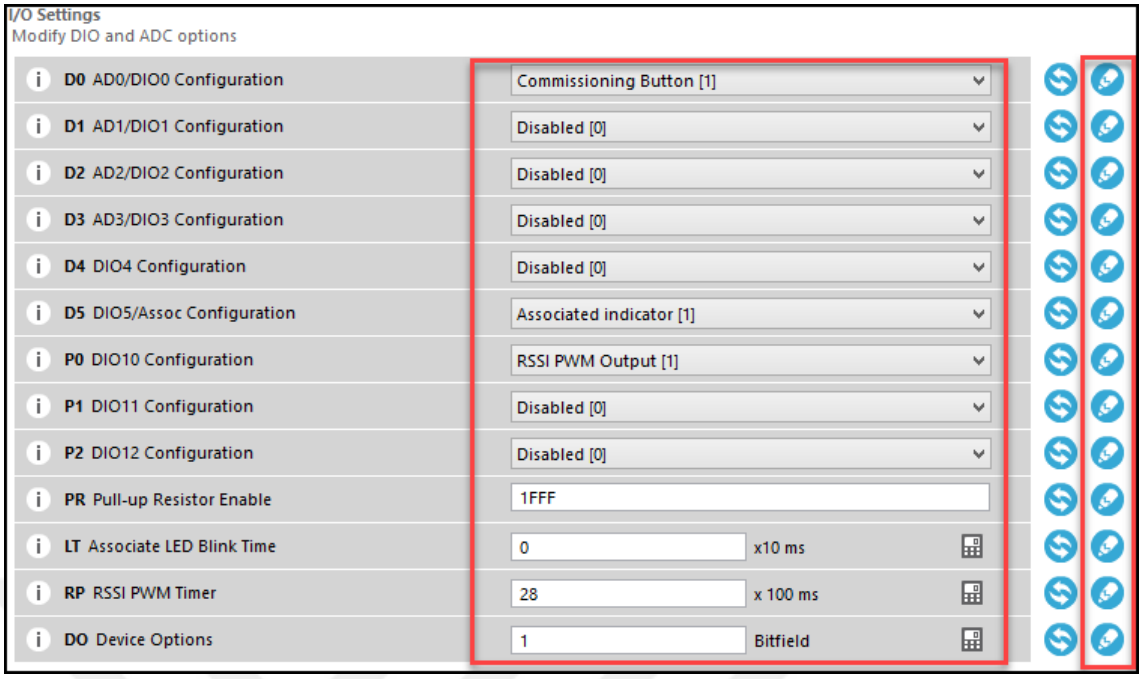
SO Sleep Options: Mevcut uyku seçeneği bitleri değiştirmek veya yenisini seçmek için kullandığımız parametredir. Bit 0 ve bit 1 aynı anda ayarlayanamaz.

SP Cyclic Sleep Period: Cihazın uyku süresini ayarlarmak için kullanılır. Bu komut, cihazın döngü başına ne kadar uyuyacağını belirler.

ST Time Before Sleep: Cihazın uyanma süresini ayarlamak için kullanılır. Eşzamansız uyku modunda olan cihazlar için ST, bir cihazın RF veya seri veri aldıktan sonra uyanık kalma süresini belirler. Senkron uykudaki cihazlar için ST, döngüsel uyku modunda çalışırken bir cihazın uyanık kalma süresini belirler.

PO Poll Rate: Uc cihaz yoklama oranını ayarlamak için kullanılır. Varsayılan değeri sıfırdır

Şekil 4.32'de XBee modüllerin Giriş/Çıkış ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir. Giriş/Çıkış ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.32 XBee Modüllerin Giriş/Çıkış ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

DO ADO/DIO0 Configuration:XBee modül 1. PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler**.**

D1 ADO/DIO1 Configuration: XBee modül 2. PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler.

D2 ADO/DIO2 Configuration: XBee modül 3. PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler.

D3 ADO/DIO3 Configuration: XBee modül 4. PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler.

D4 DIO4 Configuration: XBee modül 5 nolu PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler.

D5 DIO5/Assoc Configuration: XBee modül 6 nolu PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler

P0 DIO10 Configuration: XBee modül 7. PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler.

P1 DIO11 Configuration: XBee modül 8. PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler.

P2 DIO12 Configuration: XBee modül 9. PIN'in nasıl konfigre edileceğini belirler.

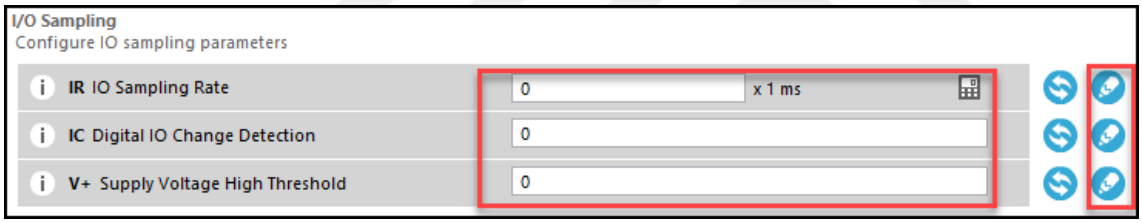
PR Pull up Resistor Enable: PR ve PD sadece dijital giriş olarak yapılandırılmış veya devre dışı bırakılmış hatları etkiler. G/Ç hatları için dahili Yukarı/Aşağı dirençlerinin durumunu yapılandıran bit alanı. Bir PR biti 1 olarak ayarlanır ise, dahili Yukarı/Aşağı direncini etkinleştirir, 0 hiçbir dahili Yukarı/Aşağı olmadığını belirtir.

LT Associate LED Blink Time: İlişkilendirme LED'in yanıp sönme süresini ayarlamak için kullanılır. İlişkilendirme LED'in işlevini (DIO5/İlişkilendirme pimi) etkinleştirmek için D5 komutunu kullanılır. Bu değer, aygıt ağa katıldığında LED'in açık ve kapalı yanıp sönme sürelerini belirler. LT = 0 ise cihaz varsayılan yanıp sönme oranını kullanır. Bu değer koordinatör için 500 ms, diğer tüm düğümler için 250 ms dir.

RP RSSI PWM Timer: RP, RSSI pini darbe genişliği modülasyonu (PWM) sinyal çıkışının süresini ayarlamak için kullanılır. Sinyalin görevi, alınan her paketle birlikte güncellenir ve süre sona erdiğinde kapanır.

DO Device Options: XBee Hücresel Modemdeki özel özellikleri etkinleştirmek veya devre dışı bırakmak için kullanılır.

Şekil 4.33'de XBee modüllerin Giriş/Çıkış örnekleme ile ilgili güncellenebilen parametreler gösterilmiştir. Giriş/Çıkış örnekleme ile ilgili güncellenebilen parametrelerin açıklamaları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.33 XBee Modüllerin Giriş/Çıkış Örnekleme ile İlgili Tanımlanabilen Parametreler

IR IO Sampling Rate: Periyodik örneklemeyi etkinleştirmek için G/Ç örnekleme hızını ayarlamak için kullanılır. Ayarlandığında, bu parametre cihazın tüm etkin DIO ve ADC'yi belirli bir aralıkta örneklemesine neden olur. Periyodik örneklemeyi etkinleştirmek için IR sıfır olmayan bir değere ayarlanır. En az bir cihaz pininin analog veya dijital I/O işlevselliğinin etkin olması gerekir.

IC Digital IO Change Detection: Dijital G/Ç pinlerinin G/Ç durumundaki değişikliklerini izlemek için kullanılır. IC, bireysel pin konfigürasyon komutlarıyla çalışır (D0 - D9, P0 - P4). Bir pin dijital bir G/Ç olarak etkinleştirildiğinde, DIO durumu değiştiğinde anında bir G/Ç örnek iletimini zorlamak için IC komutu kullanılır. IC, tek tek kanallarda kenar algılamayı etkinleştirmek veya devre dışı bırakmak için kullanabileceğiniz bir bit maskesidir.

V+ Supply Voltage High Threshold: Gerilim besleme eşiğini ayarlamak için kullanılır.

Birimi mV'dir.

4.8 Tartışma

Uygulama örneği için tesis ettiğimiz devre çalıştırılıp sensör işaretlerinin kablosuz ağ üzerinten iletimi gerçekleştirildi. Sensör ve XBee modüllerin bağlantıları yapılıp gerekli konfigrasyon yüklendikten sonra çalıştırılan devre ile ilgili aşağıda belirtilen bulgulara ulaşıldı:

Yönlendirici XBee modülü, ağda tanımlı koordinatör XBee modülünü tarayarak ağa dahil olma isteğini iletti.

Koordinatör XBee yönlendirici XBee nin ağa dahil olma talebini Ağ id sini kontrol ederek kabul etti.

Yönlendirici ve Koordinatör XBee modüllerinden oluşan ağımız teorik olarak tanımlandığı gibi gerçektede başarı ile tesis edildi ağ üzerinde terafik gözlendi.

Her iki sensörden ölçüm sonuçlarının tutarlı ve sürekli bir şekilde alındığı arduino seri porttn gözlemlendi.

Sensör bağlantılarından biri koparıldığında ölçüm sonuçlarının gelmediği gözlemlendi.

Arduino işlemcisinden alınan çıktılar ağdaki verici eleman olarak tanımlanan yönlendirici XBee modülüne gönderildiği gözlemlendi.

Yönlendirici XBee modülünün Arduino seri porttan aldığı sensör bilgilerini, uzak uçtaki koordinatöre kablosuz olarak ilettiği gözlemlendi.

Koordinatör XBee modülüne XCTU arayüz programı ile bağlanılıp ağdaki trafik kontrol edildi.

Yönlendirici XBee modülden gönderilen sonuçlar, koordinatör XBee modülüne başarılı başarılı bir şekilde ulaştığı gözlemlendi.

Koordinatör XBee modülü, yönlendirici sabit tutulacak şekilde, uzaklaştırıldığında ağ iletişimin devam edip ettiği gözlemlendi.

Koordinatör XBee modülü, yönlendirici sabit tutulacak şekilde, uzaklaştırılarak kablosuz ağ kapsama mesafesi belirlendi.

Yönlendirici ve Koordinatör modüller arası mesafe yaklaşık 90 m'ye ulaştığında, XBee modüllerin ağ iletişimine devam ettiği gözlemlendi.

Yönlendirici ve Koordinatör modüller arası mesafe 90-100 m mesafesinin üzerine çıktığında, ağ iletişimin sağlıklı olmadığı gözlemlendi.

Farklı kalınlıkta duvarların arkasından modüllerin kablosuz ağ iletişimini devam ettirip ettiremediği test edildi.

Yönlendirici ve Koordinatör modüller arasına engel olarak bir duvar konulduğunda ağ iletişimi devam etti. Ancak birden fazla duvar konulduğunda iletişimin zayıfladığı veya kesildiği gözlemlendi.

XBee modüllerin enerji tüketimi üretici firma tarafından belirtildiği gibi çok etkin olduğu gözlemlendi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Zigbee Teknolojisi detaylı bir şekilde incelenip, biyomedikal işaretlerin Zigbee tabanlı bir ağ ile iletilmesi örnek uygulaması gerçekleştirildi. Bu çalışma sonucunda vardığımız sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Tezin giriş aşamasında belirtildiği gibi ZigBee kısa mesafe düşük hızlı uygulamalar için geliştirilen bir ağ protokolüdür. Bu kapsama giren:

- Ev otomasyonu,
- Hastana otomasyonu,
- Sayaç okuma uygulamaları,
- Sulama sistemleri,
- Tarım arazilerinin nem gibi önemli değerlerinin monitör edilmesi uygulamaları,
- Endüdtriyel otomasyon uygulamarı,

gibi uygulamalar için ideal çözümlerden biridir.

Kurulum maliyetleri çok düşük, örgü, yıldız ve ağaç tipi basit ve karmaşık ağ toplojilerini desteklediğinden dolayı, tasarım ve çalışma esnekliği sağlar.

ZigBee modüller uyku modunda çalışabildiğinden dolayı, batarya ömrünün kritik olduğu uygulamalar için ideal bir çözümdür.

Bilgi hava arayüzünde iletilirken 128-bit gelişmiş şifreleme standardı AES kullanıldığından bilgi güvenliğinin önemli olduğu uygulamalar için ideal bir çözümdür

XBee modüller XCTU grafik tabanlı ara yüz programı üzerinden basit bir şekilde konfigre edilebilir olduğundan operasyon kolaylığı sunar.

6. KAYNAKLAR

Gawthrop, P. E., et al., 1994 "Radio Spectrum Measurements of Individual Microwave Ovens," NTIA Report 94-303-1, March 1994.

ISO/IEC, 1994 Open Systems Interconnection Basic Reference Model: The Basic Model, ISO/IEC7498-1:1994.

Fuller, T. F., Doyle, M. and Newman, J. 1994 "Relaxation Phenomena in Lithium-Ion Insertion Cells", J. Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 4, April 1994, pp. 982 – 990.

Bahl, P and Padlaman, V. N., 2000 "RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System", IEEE INFOCOM, March 2000, pp. 775 – 784.

USDOC, 2001 Advanced Encryption Standart (AES), Federal Information Processing Standarts Publication 197, U.S. Department of Commerce/N.I.S.T, Springfi eld, Virginia, Nov. 26, 2001. Erişim: http://csrc.nist.gov/.

IEEE, 2003 IEEE 802.15.3-2003: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for High-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).

IEEE, 2003 (IEEE 802.19 Coexistence Technical Advisory Group (TAG), Erişim:www. ieee802.org/19/.

IEEE, 2003. " IEEE 802.15.2 IEEE Recommended Practice for Information Technology Part15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands", Aug. 2003.

IEEE, 2005 IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications. Sept. 2005

Lee, J. D., et al., 2006 "Development of ZigBee-Based Street Light Control System", Proceedings of IEEE Power System Symposium and Exposition, pp. 2236–2240.

IEEE, 2006 IEEE 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Sept. 2006.

Golmie, N.,2006. "Coexistence in Wireless Networks, Challenges and System-Level Solutions in the Unlicensed Bands", University Press, Cambridge, 2006.

IEEE, 2006 "IEEE Std 802.15.4-2006: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifi cations for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", Sept. 2006.

Adams, J., et al., 2006 "Busy as a Bee",IEEESpectrum, Oct. 2006, Erişim:http://spectrum.ieee.org.

Gutierrez, J., et al. 2007 " Low-Rate Wireless Personal Area Networks", IEEE Press, 2007.

Dagtas, S, et al, 2007 " Multi-stage Real Time Health Monitoring via ZigBee in Smart Homes, "Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW)", pp. 782–786.

Anonim, 2008 ZigBee Specification,(2008), 053474r17, Jan. 2008; Erişim: www.ZigBee.org.

Anonim, 2017 European Radiocommunications Committee (ERC)/CEPT Report 98, Erişim:www.learnZigBee.com.

Anonim 2018 Freescale Semiconductor, Erişim: www.freescale.com/ZigBee.

Anonim, 2019 ZigBee Alliance, Erişim: www.ZigBee.org.

Anonim 2019 Graph-for-the-characteristics, Erişim: www.researchgate.net/figure/Graph-for-the-characteristics-of-the-LM35_fig5_229066236

EATON, 2019 Home Heartbeat (EATON) ZigBee-Based Security System; Erişim:www.homeheartbeat.com

AMRA, 2019 Automatic Meter Reading Association (AMRA); Erişim: www.amra-intl.org.

NAIS, 2019National Animal Identifi cation System (NAIS); Erişim: www.usda.gov/nais.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aziz ERTEN

Doğum Yeri : DİYARBAKIR

Doğum Tarihi : 1972

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dil : İngilizce

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik Haberleşme Mühendisliği

Çalışma Deneyimi :

ICTNet –Telekom Servisleri Uzmanı /Temmuz 2018 –Devam Ediyor/London

Suudi Telekom - Danışman /Aralık 2014 – Mart 2017 / Suudi Arabistan

Oooredo - RNO Uzman / Mart 2014 - Eylül 2014 / Cezayir

Dicle Üniversitesi- Ö. Görevlisi / Nisan 2012 – Şubat 2014 /Diyarbakır

Turkcell -Operasyonlar Müdürü / Ocak 2010 – Mart 2012 /Diyarbakır

DIGI - RNO Destek Uzmanı / Aralık 2008 - Eylül 2009 /Malezya

Suudi Telekom - RNO Uzmanı / Şubat 2007 – Aralık 2008 /Suudi Arabistan

Turkcell - Bölge Müdürü / Şubat 2006 – Şubat 2007/Diyarbakır

Suudi Telekom -BSS Destek Uzmanı / Hazıran 2003 – Aralık 2005 /Suudi Arabistan

Turkcell - Santral Sorumlusu / Nisan 1999 – Haziran 2003/Diyarbakır

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Aziz ERTEN
ÖĞRENCİ NO	12805007
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2018-2019
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	Elektrik Elektronik Mühendisliği
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	ZigBee teknolojisinin araştırılması ve biyomedikal işaretlerin iletimine ilişkin örnek bir uygulama
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	136
BENZERLİK ORANI	%4
RAPORLAMA TARİHİ	19/07/ 201009

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 136 sayfalık kısmına ilişkin, 19/07/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin. adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %4 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Aziz ERTEN
19/07/2019

Prof. Dr. Mehmet Siraç ÖZERDEM **Tez Danışmanı** 19/07/2019	Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ **Anabilim Dalı Başkanı** 19 /07/2019

Formdaki bilgiler bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersiz sayılmaktadır.