

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞÜK HIZLI KABLOSUZ KİŞİSEL ALAN AĞLARINDA
GÜRÜLTÜLÜ SİNYALLERE YÖNELİK ADAPTİF
YAPIDA HABERLEŞME**

**Hazırlayan
Sibel ARSLAN**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÖKDEM**

Yüksek Lisans Tezi

**Haziran 2014
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞÜK HIZLI KABLOSUZ KİŞİSEL ALAN AĞLARINDA
GÜRÜLTÜLÜ SİNYALLERE YÖNELİK ADAPTİF
YAPIDA HABERLEŞME**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Sibel ARSLAN**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÖKDEM**

**Haziran 2014
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

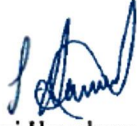
Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Sibel ARSLAN

YÖNERGEYE UYGUNLUK

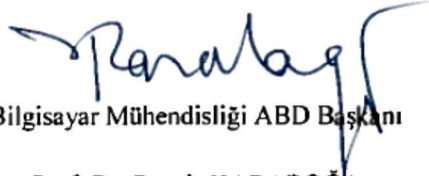
Düşük Hızlı Kablosuz Kişisel Alan Ağlarında Gürültülü Sinyallere Yönelik Adaptif Yapıda Haberleşme adlı Yüksek Lisans, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi ' ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan
Sibel ARSLAN



Danışman
Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÖKDEM



Bilgisayar Mühendisliği ABD Başkanı
Prof. Dr. Derviş KARABOĞA

KABUL VE ONAY

Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÖKDEM danışmanlığında Sibel ARSLAN tarafından hazırlanan “Düşük Hızlı Kablosuz Kişisel Alan Ağlarında Gürültülü Sinyallere Yönelik Adaptif Yapıda Haberleşme” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

16/05/2014

JÜRİ:

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÖKDEM

Üye : Doç. Dr. İbrahim DEVELİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Serkan ÖZTÜRK

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 17/06/2014 tarih ve 2014/27-02 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Kazım KEŞLİOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÖKDEM' e teşekkürü bir borç bilirim.

Tezin birçok aşamasında hiç tereddüt etmeden yardımlarını esirgemeyen tüm mesai arkadaşlarıma özellikle Engin ZAMAN' a çok teşekkür ediyorum.

Son olarak hayatım boyunca desteğini benden hiç esirgemedi hep yanımda olan biricik annem Songül ARSLAN' a, her zaman olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan bilgisi ile aydınlatıp varlığı ile güç veren babam Üngör ARSLAN' a ve her an beni güçlü kılan canım ağabeyim Uğur ARSLAN' a sonsuz kere teşekkür ediyorum.

Sibel ARSLAN

Kayseri, Haziran 2014

İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL VE ONAY	iii
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiv
SİMGE LİSTESİ	xvi
KISALTMA LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
ABSTRACT.....	xxi

1. BÖLÜM

GİRİŞ

2. BÖLÜM

ADAPTİF YAYILIM FAKTÖRLÜ HABERLEŞME PROBLEMİNİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Problem Tanımı.....	3
2.2 İlgili Yayın ve Araştırmalar	6

3. BÖLÜM

DÜŞÜK HIZLI KABLOSUZ KİŞİSEL ALAN AĞLARI (DH-KKA) VE IEEE 802.15.4 PROTOKOLÜ

3.1 Kablosuz Ağlar	18
3.1.1 Kısa Mesafeli Kablosuz Ağlar.....	19
3.1.2 IEEE 802.15.4 Standardı Çalışma Grubu	20

3.1.3 IEEE 802.15.4 ve ZigBee	21
3.1.4 ZigBee ve Bluetooth Karşılaştırması	22
3.2 IEEE 802.15.4 LR-WPAN	22
3.2.1 IEEE 802.15.4 LR-WPAN Bileşenleri	23
3.2.1.1 Tam Fonksiyonlu Cihazlar (FFD – Full Function Device).....	23
3.2.1.2 İndirgenmiş Fonksiyonlu Cihazlar (RFD – Reduced Function Device)	23
3.2.2 Ağ Topolojileri.....	24
3.2.2.1 Yıldız Ağ Topolojisi	25
3.2.2.2 Noktadan Noktaya Ağ Topolojisi	25
3.2.3 LR-WPAN Mimarisi.....	26
3.2.4 Veri Aktarım Modelleri.....	27
3.2.4.1 Koordinatöre Veri Aktarımı	27
3.2.4.2 Koordinatörden Veri Aktarımı.....	28
3.2.4.3 Noktadan Noktaya Veri Aktarımı	30
3.2.5 İlkel Kavramı.....	31
3.3 IEEE 802.15.4 FİZİKSEL KATMANI ÖZELLİKLERİ	32
3.3.1 Genel Gereksinimler ve Tanımlamalar.....	33
3.3.1.1 İşletim Frekansı.....	33
3.3.1.2 Kanal Atama ve Numaralandırma	33
3.3.2 PHY Hizmet Özellikleri.....	34
3.3.2.1 PHY Veri Hizmeti	34
3.3.2.1.1 PD-DATA.request	35
3.3.2.1.2 PD-DATA.confirm	35
3.3.2.1.3 PD-DATA.indication.....	35
3.3.2.2 PHY Yönetim Hizmeti	35
3.3.2.2.1 PLME-CCA.request.....	35
3.3.2.2.2 PLME-CCA.confirm.....	35

3.3.2.2.3 PLME-ED.request.....	36
3.3.2.2.4 PLME-ED.confirm.....	36
3.3.2.2.5 PLME-GET.request.....	36
3.3.2.2.6 PLME-GET.confirm.....	37
3.3.2.2.7 PLME- SET-TRX-STATE.request	37
3.3.2.2.8 PLME- SET-TRX-STATE.confirm	38
3.3.2.2.9 PLME- SET.request.....	38
3.3.2.2.10 PLME- SET.confirm.....	38
3.3.2.3 PHY Numaralandırma Tanımlamaları.....	39
3.3.3 PPDU Formatı	39
3.3.3.1 Başlangıç Alanı (Preamble Field)	40
3.3.3.2 SFD Alanı (SFD Field).....	40
3.3.3.3 Çerçeve Uzunluğu Alanı (Frame Length Field)	40
3.3.3.4 PSDU Alanı (PSDU Field)	41
3.3.4 PHY Sabitleri ve PIB Özellikleri	41
3.3.4.1 PHY Sabitleri.....	41
3.3.4.2 PHY PIB Nitelikleri	42
3.3.5 2450 MHz PHY Tanımlamaları.....	42
3.3.5.1 Veri Hızı	42
3.3.5.2 Modülasyon ve Yayılma	42
3.3.5.2.1 Referans Modülatör Diyagramı.....	43
3.3.5.2.2 Bit – Sembol Eşlenmesi.....	43
3.3.5.2.3 Sembol – Chip Eşlemesi.....	44
3.3.5.2.4 O-QPSK Modülasyonu ve Darbe Şekli	47
3.3.5.3 2450 MHz Bandı Radyo Tanımlamaları.....	48
3.3.5.3.1 İzgesel Güç Yoğunluğu	48
3.3.5.3.2 Alıcı Duyarlılığı	49
3.3.5.3.3 Alıcı Frekans Bozulma Direnci.....	49

3.3.6 Genel Radyo Tanımlamaları.....	50
3.3.6.1 Bağlantı Kalite Bildirimi (LQI)	50
3.3.6.2 Temiz Kanal Ataması	50
3.4 IEEE 802.15.4 MAC ALT KATMANI ÖZELLİKLERİ	51
3.4.1 MAC Alt Katmanı Hizmet Özellikleri	51
3.4.1.1 MAC Veri Hizmeti	52
3.4.1.1.1 MCPS-DATA.request	53
3.4.1.1.2 MCPS-DATA.confirm	53
3.4.1.1.3 MCPS-DATA.indication.....	53
3.4.1.1.4 MCPS-PURGE.request	53
3.4.1.1.5 MCPS-PURGE.confirm	53
3.4.1.2 MAC Yönetim Hizmeti	54
3.4.1.2.1 Bağlanma ilkeleri (MLME-ASSOCIATE)	55
3.4.1.2.2 Ayrılma ilkeleri (MLME-DISASSOCIATE).....	55
3.4.1.2.3 Beacon bildirme ilkeli (MLME-BEACON-NOTIFY)	55
3.4.1.2.4 PIB Özelliklerinin Okunması İlkeleri (MLME-GET).....	55
3.4.1.2.5 GTS yönetim ilkeleri (MLME-GTS).....	56
3.4.1.2.6 Yetim bildirimi ilkeleri (MLME-ORPHAN).....	56
3.4.1.2.7 MAC alt katmanını yeniden başlatma ilkeleri (MLME-RESET)	56
3.4.1.2.8 Alıcı aktifleşme zamanı tanımlayan ilkeler (MLME-RX- ENABLE).....	57
3.4.1.2.9 Kanal tarama ilkeleri (MLME-SCAN).....	57
3.4.1.2.10 İletişim durumu ilkeli (MLME-COMM-STATUS)	57
3.4.1.2.11 PIB özelliklerinin yazılması ilkeleri (MLME-SET)	58
3.4.1.2.12 Süper çerçeve Konfigürasyonu Güncelleyen ilkeler (MLME- START)	58
3.4.1.2.13 Koordinatör ile Senkronizasyon Çalışma İlkeleri (MLME-SYNC, MLME-SYNC-LOSS).....	58

3.4.1.2.13 Koordinatörden Veri İsteme İlkeleri (MLME-POLL).....	59
3.4.2 MAC Çerçeve Yapıları	59
3.4.2.1 Genel MAC Çerçeve Yapısı	59
3.4.2.1.1 Çerçeve Kontrol Alanı	60
3.4.2.1.2 Dizi Numarası Alanı.....	60
3.4.2.1.3 Hedef PAN Belirteci Alanı.....	61
3.4.2.1.4 Hedef Adresi Alanı.....	61
3.4.2.1.5 Kaynak PAN Belirteci Alanı	61
3.4.2.1.6 Kaynak Adres Alanı.....	61
3.4.2.1.7 Çerçeve Veri Alanı	62
3.4.2.1.8 Çerçeve Kontrol Dizisi (Frame Control Sequence) Alanı	62
3.4.2.2 Beacon Çerçevesi Yapısı	64
3.4.2.3 Veri Çerçevesi Yapısı.....	66
4.2.4 Onaylama Çerçevesi Yapısı.....	67
3.4.2.5 MAC Komut Çerçevesi Yapısı.....	67
3.4.3 MAC Sabitleri ve PIB özellikleri	68
3.4.3.1 MAC sabitleri	68
3.4.3.2 MAC PIB Özellikleri.....	71
3.4.4 MAC İşlevsel Tanımı	74
3.4.4.1 Kanal Erişimi.....	74
3.4.4.1.1 Süper Çerçeve Yapısı.....	74
3.4.4.1.2 Çerçeveler Arası Bekleme Zamanı (IFS)	76
3.4.4.1.3 Slotsuz İletim Modunda CSMA-CA Algoritması.....	77
3.4.4.2 PAN Başlatılması ve İşletilmesi.....	79
3.4.4.2.1 Kanalları Tarama.....	79
3.4.4.2.2 PAN Başlatılması.....	79
3.4.4.2.5 Cihaz Tarama	80
3.4.4.3 Ağa Bağlanmak ve Ağdan Ayrılmak.....	80

3.4.4.3.1 Ağa Bağlanmak	80
3.4.4.3.2 Ağdan Ayrılmak	83
3.4.4.4 Senkronizasyon	83
3.4.4.5 İletme, Alma ve Onaylama	83
3.4.4.5.1 Çerçeve İletme	84
3.4.4.6.2 Çerçeve Alma ve Reddetme	84
3.4.4.6.3 Bekleyen Verinin Koordinatörden Çıkarılması	86
3.4.4.6.4 Onaylamaların Kullanılması	88
3.5 Düşük Hızlı Kablosuz Kişisel Alan Ağlarında Gürültü Sinyallerinin Etkisi	89
3.5.1 Alınan Sinyal Güç Göstergesi (RSSI)	89
3.5.2 Sinyal Güç Oranı (SNR)	90
3.5.2.1 Modülasyon Tekniklerine Göre SNR Hesaplanması	90
3.5.2.1.1 BPSK, QPSK ve OQPSK Modülasyonları İçin SER Hesaplanması	91

4. BÖLÜM

UYGULAMA YAZILIMI

4.1 Kullanılan Yöntem	92
4.2 Uygulama Mimarisi	93
4.2.1 Ana Fonksiyon	94
4.2.2 CSMA Konfigürasyonu	98
4.2.3 Paketin Oluşturulması	100
4.2.4 Paketin İletiminin Gerçekleştirilmesi	102
4.2.5 Paket Verisinin İşletilmesi	105
4.2.6 Adaptif PN Dizilerinin Eşleştirilmesi	110
4.2.7 Adaptif Çip Bitleri Dizisinin Bulunması	111
4.2.8 Adaptif Çip Dizi Sayısının Bulunması	113
4.2.9 Adaptif Çip Dizilerinin Sembollere Dönüştürülmesi	113

4.2.10 Paket Verisinin Kontrol Edilmesi.....	114
4.3. Uygulama Sonuçları.....	115
4.3.1 4/5 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri	
Karşılaştırması	124
4.3.2 4/12 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri	
Karşılaştırması	125
4.3.3 4/32 ve 4/39 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri	
Karşılaştırması	126
4.3.4 4/32 ve 4/58 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri	
Karşılaştırması	126
4.3.5 Hata Oranlarına Göre Adaptif Yayılım Faktörleri ve IEEE 802.15.4	
Protokolü Yayılım Faktörünün Karşılaştırması.....	127

5. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç ve Öneriler	130
KAYNAKÇA	132
ÖZGEÇMİŞ.....	136

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1:	Kablosuz İletimde Haberleşme Mesafesi [34]	3
Şekil 2.2:	SNR Değerine Bağlı Bit Hata Oranı Grafiği.....	4
Şekil 2.3:	DSSS Modülasyon Tekniği [35]	5
Şekil 2.4:	Protokol İle Adaptif PN Dizisi Üretme Mekanizması Karşılaştırması	6
Şekil 3.1:	Kablosuz Ağların Kapsama Alanlarına Göre Sınıflandırılması.....	18
Şekil 3.2:	Kısa Mesafeli Kablosuz Ağların Sınıflandırılması	19
Şekil 3.3:	Kısa Mesafeli Kablosuz Ağların Sınıflandırılması	20
Şekil 3.3:	Tam Fonksiyonlu Cihaz [2]	23
Şekil 3.4:	İndirgenmiş Fonksiyonlu Cihaz [2]	24
Şekil 3.5:	Yıldız ve Noktadan Noktaya Ağ Topoloji Örnekleri [4]	24
Şekil 3.6:	Küme Ağacı Ağı [4].....	25
Şekil 3.7:	LR-WPAN Cihaz Mimarisi [1]	26
Şekil 3.8:	Aktif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim	28
Şekil 3.9:	Pasif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim.....	28
Şekil 3.10:	Aktif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim	29
Şekil 3.11:	Pasif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim.....	30
Şekil 3.12:	Hizmet İlkeleri.....	31
Şekil 3.13:	PHY Referans Modeli [1]	34
Şekil 3.14:	Modülasyon ve Yayılma fonksiyonları	43
Şekil 3.15:	O-QPSK Chip Kaymaları.....	47
Şekil 3.16:	Darbe Şekli İle Temel Band Chip Dizisi [4].....	48
Şekil 3.17:	MAC Alt Katmanı Referans Modeli	52
Şekil 3.18:	MAC Veri Hizmeti İçin Mesaj Sırası.....	53
Şekil 3.19:	Tipik FCS Uygulaması.....	63
Şekil 3.20:	Uygulamada kullanılan FCS fonksiyonu	63
Şekil 3.21:	Uygulamada Kullanılan MAC Sabitleri.....	71
Şekil 3.22:	Süper Çerçeve Yapısına Bir Örnek [1,4]	75
Şekil 3.23:	IFS Şematik Gösterimi [1,4]	76
Şekil 3.24:	Slotsuz CSMA – CA Algoritması	78
Şekil 3.25:	Onaylama Olmaksızın Veri Aktarımı	88
Şekil 3.26:	Onaylama ile Veri Aktarımı [4]	89

Şekil 4.1: Ana fonksiyonda parametre değerleri	94
Şekil 4.2: Ana fonksiyon	95
Şekil 4.3: Ana fonksiyon Algoritma Şeması	96
Şekil 4.4: CSMA Konfigürasyonu.....	98
Şekil 4.5: Paket içeriğinin oluşturulması.....	100
Şekil 4.6: Paket Birimlerin Büyüklüğü (bayt cinsinden).....	102
Şekil 4.8: Paket İletimin Gerçekleştirilmesi Algoritma Şeması.....	104
Şekil 4.9: Paket Verisinin İşletilmesi	106
Şekil 4.10: Paket Verisinin İşletilmesi Algoritma Şeması	107
Şekil 4.9: Paket Verisinin İşletilmesi Algoritma Şeması (devamı).....	108
Şekil 4.10: Adaptif PN dizilerinin eşleştirilmesi.....	110
Şekil 4.11: İlk 28 komşuluk için Adaptif PN dizisi üretme mekanizması	111
Şekil 4.12: 29 ve 36 Komşuluklarında Adaptif PN dizisi üretme mekanizması	112
Şekil 4.13: PN dizilerinin sembollere dönüştürülmesi	113
Şekil 4.14: Paket Verisinin Kontrol Edilmesi	115
Şekil 4.15: Yuvarlatılmış ve Yuvarlatılmamış Değerlerde Çip Hata Oranı –Yayılım Faktörü Grafikleri.....	122
Şekil 4.16: Çip Hata Oranı – Veri Aktarım Oranı (Throuhput) Grafiği.....	124
Şekil 4.17: 4/5 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması .	125
Şekil 4.18: 4/5 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması .	125
Şekil 4.19: 4/32 ve 4/39 Yayılım faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması	126
Şekil 4.20: 4/32 ve 4/58 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması	127
Şekil 4.21: Her bir çip hata oranı için adaptif yayılım faktörleri ve DSSS(4/32) karşılaştırması.....	129

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1: IEEE 802.15.4 Genel karakteristikleri-Modülasyon Parametreleri[32]	21
Tablo 3.2: ZigBee ve Bluetooth [32]	22
Tablo 3.3: Frekans Bantları ve Veri Hızları [4]	33
Tablo 3.4: PD-SAP ilkelleri	34
Tablo 3.5: PLME-SAP İlkelleri	35
Tablo 3.6: PLME-CCA.confirm parametreleri	36
Tablo 3.7: PLME-ED.confirm parametreleri	36
Tablo 3.8: PLME-GET.request parametreleri.....	36
Tablo 3.9: PLME-GET.confirm parametreleri.....	37
Tablo 3.10: PLME-SET-TRX-STATE.request parametreleri	37
Tablo 3.11: PLME-SET-TRX-STATE.confirm parametreleri	38
Tablo 3.12: PLME-SET.request parametreleri	38
Tablo 3.13: PLME-SET.confirm parametreleri	39
Tablo 3.14: PHY Numaralandırma Tanımlamaları.....	39
Tablo 3.15: PPDU Yapısı.....	40
Tablo 3.16: SFD Alanı Yapısı.....	40
Tablo 3.17: Çerçeve Uzunluğu Değerleri [4].....	41
Tablo 3.18: PHY sabitleri	41
Tablo 3.19: PHY PIB Nitelikleri.....	42
Tablo 3.20: Sembol – Chip eşlemesi [1].....	44
Tablo 3.21: 2^N-1 Uzunluğundaki PN Dizisinin Çalışma Durumları	46
Tablo 3.22: İzgesel Güç Yoğunluğu Sınırları	49
Tablo 3.23: Alıcı Duyarlılığı Tanımları	49
Tablo 3.24: 2450 MHz PHY’de en az alıcı frekans bozulma direnci gereksinimleri	50
Tablo 3.25: MCPS-SAP ilkelleri.....	52
Tablo 3.26: MLME-SAP üzerinden erişilebilen ilkeller [4].	54

Tablo 3.27: Genel MAC Çerçeve Yapısı [1].....	60
Tablo 3.28: Beacon Çerçeve Yapısı.....	64
Tablo 3.29: GTS bilgi alanının yapısı	64
Tablo 3.30: Bekleyen Adres Bilgi Alanının Yapısı	64
Tablo 3.31: Süper Çerçeve Tanımları Alanı Yapısı.....	65
Tablo 3.32: Veri Çerçevesi Yapısı [1]	66
Tablo 3.33: Onaylama Çerçevesi Yapısı [1]	67
Tablo 3.34: MAC Komut Çerçevesi Yapısı [1]	67
Tablo 3.35: MAC alt katmanı sabitleri [1,4].....	69
Tablo 3.36: MAC alt katmanı sabitleri (devamı)	70
Tablo 3.37: MAC PIB özellikleri [1,4]	72
Tablo 3.38: MAC PIB özellikleri (devamı)	73
Tablo 3.39: Kısa adresin kullanımı [1]	82
Tablo 3.38: SNR Hesaplanırken Kullanılan Notasyonlar [31]	90
Tablo 3.40: SNR Hesaplanırken Kullanılan Fonksiyonlar [31].....	91
Tablo 4.1: En İyi Veri Aktarım Oranına Sahip Yayılım Faktörleri	116
Tablo 4.1: En İyi Veri Aktarım Oranına Sahip Yayılım Faktörleri (Devam).....	117
Tablo 4.1: En İyi Veri Aktarım Oranına Sahip Yayılım Faktörleri (Devam).....	118
Tablo 4.2: Yayılım Faktörlerinin Standartla Karşılaştırılması.....	119
Tablo 4.2: Yayılım Faktörlerinin Standartla Karşılaştırılması (Devam).....	120
Tablo 4.2: Yayılım Faktörlerinin Standartla Karşılaştırılması (Devam).....	121
Tablo 4.3: Çip Hata Oranı Maksimum-Verimlilik Tablosu.....	123
Tablo 4.4: Her bir çip hata oranı için ortalama yayılım faktörü	128

SİMGE LİSTESİ

<i>BE</i>	backoff exponent
<i>BI</i>	beacon interval
<i>BO</i>	beacon order
<i>CW</i>	contention window (length)
<i>NB</i>	number of backoff (periods)
<i>SD</i>	superframe duration
<i>SO</i>	superframe order

KISALTMA LİSTESİ

BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BSN	Beacon Sequence Number
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention-Free Period
CID	Cluster Identifier
CL	Current Loop
CLH	Cluster Head
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
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full-Function Device
GTS	Guaranteed Time Slot
I/Q Phase	In-Phase / Quadrature-Phase
IFS	Interframe Space Or Spacing
ISM	Industrial, Scientific, And Medical
LLC	Logical Link Control
LQI	Link Quality Indication
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
MLME	Mac Sublayer Management Entity
MLME-SAP	Mac Sublayer Management Entity-Service Access Point
MPDU	Mac Protocol Data Unit

MSB	Most Significant Bit
MSDU	Mac Service Data Unit
O-QPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PD-SAP	Phy Data Service Access Point
PDU	Protocol Data Unit
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
PPDU	Phy Protocol Data Unit
PSDU	Phy Service Data Unit
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced-Function Device
RSSI	Received Signal Strength Indication
RX	Receive Or Receiver
SAP	Service Access Point
SDU	Service Data Unit
SFD	Start-Of-Frame Delimiter
SHR	Synchronization Header
SPI	Serial Peripheral Interface
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
TRX	Transceiver
TX	Transmit Or Transmitter
WPAN	Wireless Personal Area Network

DÜŞÜK HIZLI KABLOSUZ KİŞİSEL ALAN AĞLARINDA GÜRÜLTÜLÜ SİNYALLERE YÖNELİK ADAPTİF YAPIDA HABERLEŞME

Sibel ARSLAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2014

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Selçuk ÖKTEM

ÖZET

Kablosuz Kişisel Alan Ağları (PAN, Personal Area Networks), bilgisayarlar, telefonlar ve endüstriyel cihazlar arasında veri iletişiminde kullanılan bilgisayar ağlarıdır. Bu ağlar kısa iletişim mesafelerinde, düşük veri hızlarında, düşük güçte radyo sinyalleriyle çalışırlar.

Kablosuz ağlarda iletilen verilerin alıcıya minimum hata ile ulaşması önemlidir. Birim zamanda hatasız olarak gönderilen/alınan veri miktarı kablosuz haberleşmede önemli bir ölçüt olan “veri aktarım oranını” ifade eder. Veri aktarım oranı iletilen veriler içerisinde bozulan veri miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Verideki bozulma oranı ise “bit hata oranı” olarak isimlendirilen parametreye bağlıdır. Bit hata oranı gönderilen/alınan paketin yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bit hata oranının haberleşmedeki olumsuz etkilerinin azaltılması paket yapısının nasıl düzenleneceği önemlidir.

IEEE 802.15.4 protokolü Kablosuz Kişisel Alan Ağları’nda için yaygın olarak kullanılan bir standarttır. Standart, fiziksel katman (PHY) ve ortam erişim kontrolü (MAC) alt katmanı olarak adlandırılan iki OSI katmanını tanımlar. IEEE 802.15.4 PHY katmanı 250 Kb/s hızında O-QPSK (Ötelemeli – Dördün Faz Kaymalı Anahtarlama) tekniğini kullanarak veri aktarımı yapar. Fiziksel katmandaki her paket dört bitlik veri sembollerine ayrıştırılır ve her sembol otuz iki bitlik sözde rasgele gürültü dizisine (PN Chip Sequence) çevrilir.

Bu tezde farklı kablosuz kanal türleri için birim zamanda maksimum veri iletimini gerçekleştirebilecek en iyi veri dizilerin bulunması amaçlanmıştır. Bunu

gerçekleştirmek için adaptif bir veri dizisi üretme mekanizması önerilmiştir. IEEE 802.15.4 protokolünün mevcut ve nerilen PN dizilişleri ile MAC performans analizleri yapılmıştır. Önerinin başarısı, karşılaştırmalı performans sonuçlarını gösteren tablolar ve grafiklerle açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Kişisel Alan Ağları (PAN, Personal Area Networks), Ortam Erişim Kontrol (OEK) Performansı, Gürültü benzeri ip dizileri, Katmanlar arası Haberleşme

ADOPTIF COMMUNICATIONS FOR NOISE SIGNALS IN LOW RATE WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS

Sibel ARSLAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, June 2014

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Selçuk ÖKDEM

ABSTRACT

Wireless Personal Area Networks (WPANs) are computer networks used for data transmission among devices such as computers, telephones and industrial devices. These networks are operated in short ranges using low data rates and low-power radio signals.

In wireless networks, it is important to deliver data to the receiver with minimal error. It is referred as “data transfer rate” that gives amount of data transmitted/received without error in a time unit, which is an important measure in wireless communications. Data transfer rate is directly related to the amount of corrupted data in the transmitted data. The corruption on the data is dependent on the parameter of “bit error rate”. Bit error rate of sent/received packets varies depending on data format. It is important to decrease negative effects of bit error rate in communications, and decide how to organize the format of the frame.

Wireless Personal Area Networks for the IEEE 802.15.4 protocol is a used standard. IEEE 802.15.4 protocol defines two OSI layers called as Physical (PHY) layer and Media Access Control (MAC) layer. IEEE 802.15.4 PHY layer transfers data at 250 Kb/s using O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) modulation technique. Each packet is splitted into symbols including four data bits, and each of these symbols translated to thirty two bits Pseudo Noise(PN) chip sequences.

In this thesis, it is aimed to find the best data chip sequences to obtain maximum data transfer in a time unit for different wireless channel types. To accomplish this, an adaptive data sequence generator mechanism is proposed. Performance analyses of IEEE 802.15.4 protocol with traditional and proposed PN sequences are made. The

success of the proposal is illustrated in tables and graphs showing comparative performance results.

Key Words: Wireless Personal Area Networks (WPANs), Media Access Control Access (MAC) Performance, Pseudo Noise (PN) Chip Sequences, Cross-layer Communication

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Düşük Enerjili Düşük Hızlı Kablosuz Kişisel Alan Ağları (DH-KKA), Low Power Low Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN) kablosuz haberleşme teknolojisindeki gelişmeler sayesinde küçük boyutlarda daha az enerji ile çalışacak düzeyde üretilebilmektedir. Bu ağlar bina otomasyonu, sağlık durumu takibi, taşıt izleme sistemi, ev kontrol sistemleri, askeri gözlem ve deprem izleme uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kablosuz haberleşmede iletilen verilerin alıcıya minimum hata ile ulaşması önemlidir. Birim zamanda hatasız olarak gönderilen/alınan veri miktarı kablosuz haberleşmede önemli bir ölçüt olan “veri aktarım oranını” ifade eder. Veri aktarım oranı iletilen veriler içerisinde bozulan veri miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Verideki bozulma oranı ise “bit hata oranı” olarak isimlendirilen parametreye bağlıdır. Bit hata oranı gönderilen/alınan paketin yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Paket yapısı cihazın eş zamanlı çalışmasını sağlayan ve çerçeve uzunluk bilgisini içeren alanlar, paketteki veri miktarı vb. bilgilerden oluşmaktadır. Bit hata oranının haberleşmedeki olumsuz etkilerinin azaltılması paket yapısının nasıl düzenleneceği önemlidir.

DH-KKA’ da yaygın olarak kullanılan bir protokol olan IEEE 802.15.4 standardı 2003 yılında kullanıma sunulmuştur. Birçok endüstriyel üründe tercih edilen bu standart, düşük güçte ve küçük miktarda veri iletişimi gerçekleştiren uygulamalara yönelik olarak geliştirilmiştir. IEEE 802.15.4 standardı 2 katmandan oluşur. Fiziksel katman (PHY) kablosuz veri haberleşmesinin etkinleştirilmesi, uygun frekans bandı seçilmesi ve veri aktarımı vb. görevlerden sorumludur. Ortam erişim kontrolü (MAC) katmanı ağın kurulması, cihazların ağa bağlanması ve ayrılması vb. görevlerinden sorumludur.

IEEE 802.15.4 PHY 2450 MHz frekans bandında 250 Kb/s hızında O-QPSK (Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama) tekniğini kullanarak veri aktarımı yapar. Fiziksel katman protokol veri birimi (PPDU)'nun tüm baytları 4 LSB' si (b_0, b_1, b_2, b_3) bir veri sembolü ve 4 MSB' si (b_4, b_5, b_6, b_7) bir sonraki veri sembolü ile eşlenir. Her bir veri sembolü IEEE 802.15.4 standardında tanımlanan 32 bit çip sözde rasgele gürültü dizisi (PN Chip Sequences) ile eşlenerek chip dizileri elde edilir. Çip dizileri yarım dalga sinüs darbe şeklini içeren O-QPSK modülasyonu kullanılarak taşıyıcı üstüne modüle edilir.

Tez konusu, IEEE 802.15.4 standardında sabit uzunlukta tanımlanmış (32 bit) çip sözde rasgele gürültü dizilerine komşu bitlerin üzerine eklenmesi/çıkarılması ile alternatif sözde rasgele gürültü dizileri geliştirilmesi, DH-KKA' ın yapısındaki diğer sınırlamalar dikkate alınarak verilerin iletiminin sağlanması, veri aktarım oranının artırılması ve elde edilen sonuçlarla diğer tekniklerin performans karşılaştırmasını içermektedir.

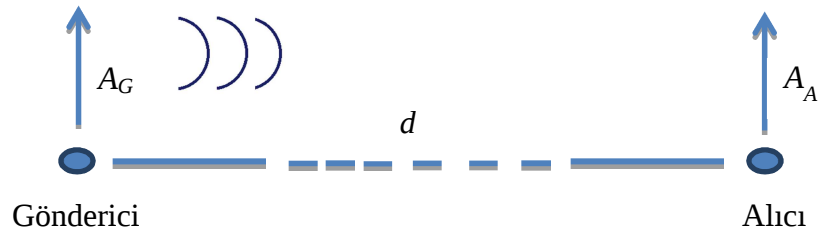
2. BÖLÜM

ADAPTİF YAYILIM FAKTÖRLÜ HABERLEŞME PROBLEMİNİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Farklı kablosuz kanal türleri için ortamdaki gürültü seviyesine göre birim zamanda maksimum veri iletimini gerçekleştirebilecek adaptif PN dizilerinin üretilmesi gerekmektedir. Bu bölümde, önerilecek adaptif PN dizilerinin üretilme nedenleri açıklanmıştır. Ayrıca LR-WPAN ağlarda arttırmaya yönelik çalışmalar da sunulmuştur.

2.1 Problem Tanımı

Kablosuz iletimde haberleşme mesafesi arttıkça alıcıya ulaşacak sinyal zayıflar. Zayıflayan sinyale iletim ortamındaki gürültü eklenir. SNR eklenen gürültünün sinyale etkisini ölçmek için kullanılır. SNR taşıyıcı sinyal şiddetinin gürültü sinyali şiddetine oranından elde edilir. Ortamdaki belirli bir gürültü düzeyinde haberleşme mesafesi arttırıldığında alıcıya ulaşabilecek sinyal azalacağından SNR değeri düşer. Belirli bir haberleşme mesafesi için ise SNR ortamdaki gürültü seviyesi arttırıldığı oranda düşer. Şekil 2.1 kablosuz iletimde haberleşme mesafesini tanımlar.



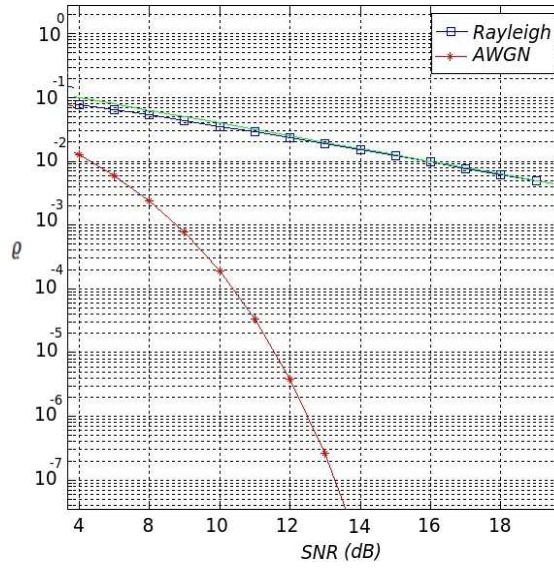
Şekil 2.1: Kablosuz İletimde Haberleşme Mesafesi [34]

Kablosuz ortamda iletilen veri gönderilirken bit hata oranı (ρ) ölçüsünde bozulmaya uğrar. SNR kullanarak ρ ' nun eldesi Eşitlik (2.1) ve (2.2)' de verilmiştir. Eşitlik (2.1), Toplanır Beyaz Gauss Gürültü (Additive White Gaussian Noise, AWGN), Eşitlik (2.2)

ise Rayleigh dağılımlı gürültü altında ρ değerini verir (BPSK/QPSK modülasyonda). SNR değerine bağlı ρ değişimi Şekil 2.2' de verilmiştir. [34]

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{\eta}}^{\infty} e^{-t^2} dt = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta}) \quad (2.1)$$

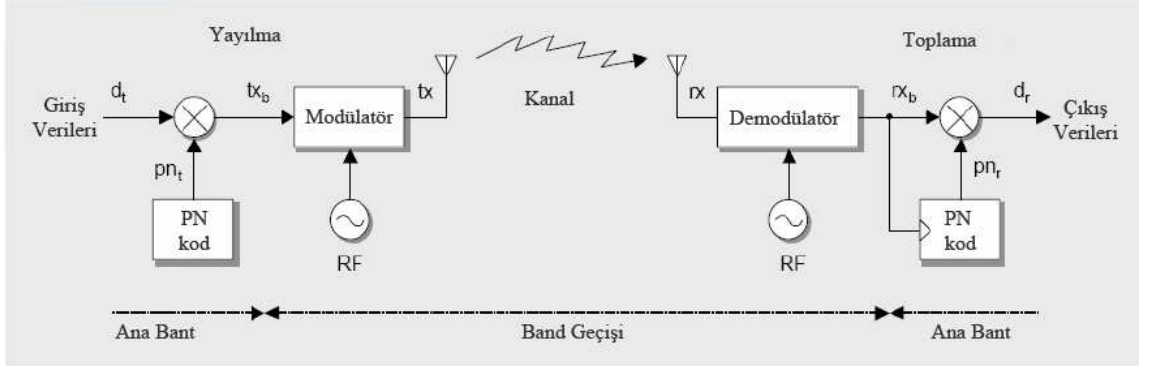
$$\rho = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\eta}{1+\eta}} \right) \quad (2.2)$$



Şekil 2.2: SNR Değerine Bağlı Bit Hata Oranı Grafiği

İletilen bir veri paketi ρ değerine bağlı olarak bit hatası/hataları içerebilir. En az bir bit hatası içeren bir paket “hatalı veri paketi” olarak adlandırılır. Hatalı paketler alıcı tarafından dikkate alınmaz. Böyle bir durumda veri aktarım oranını arttırmak için bu paket tekrar gönderilir.

IEEE 802.15.4 standardı 2.4 GHz frekans bandında yarım dalga sinüs şeklini içeren O-QPSK modülasyonu ile birlikte alıcıdan gelen sinyal güç oranından bit hata oranı elde eden Doğrudan Dizi Yayılı Spektrum (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum) modülasyon şemasını kullanır. DSSS yayılma tekniklerini kullanarak güvenli iletişim kurma, ortamdaki parazitlere ve gürültüye karşı direnci arttırmayı hedefler. Şekil 2.3' de IEEE 802.15.4' de DSSS modülasyon şeması gösterilmiştir.



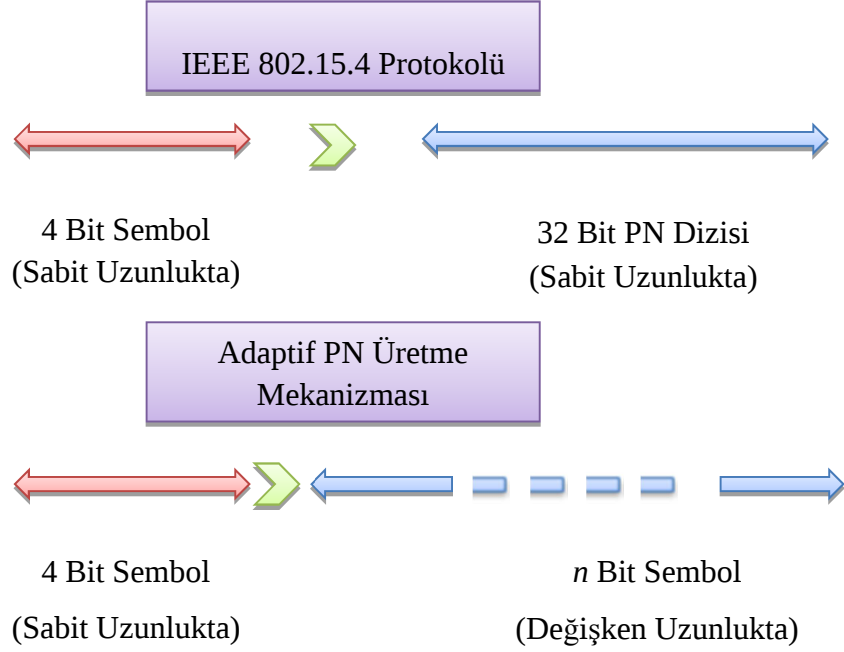
Şekil 2.3: DSSS Modülasyon Tekniği [35]

PHY Protokol Veri Birimi'nin tüm ikili bitleri bir veri sembolü ile eşlenir. Daha sonra her bir veri sembolü, 32 – çip sözde-rasgele gürültü dizisi (PN sequences) ile eşlenerek alıcıya gönderilir.

İletim ortamındaki çok sayıda etken sinyalde değişikliğe yol açar. Bu değişiklikler belirli bir düzeyin üzerine çıkarsa sinyal üzerinde gönderilen veri alıcıda doğru bir şekilde algılanamaz. Bu bozulmaların en önemlisi gönderilen sinyalin şeklinde değişikliğe neden olan gürültü faktörüdür. Gürültü, iletim ortamındaki ortalama gürültü seviyesini ifade eder. Sonuçta gürültü seviyesi arttıkça sinyal kalitesini dolayısıyla iletişimin kalitesini önemli oranda etkilemektedir.

İletim ortamındaki belirli bir süre devam eden gürültü bir veya daha fazla bitin bozulmasına neden olur. Bitin bozulması gönderilen bir bitin alıcı tarafından 1 iken 0 veya 0 iken 1 olarak algılanmasıdır.

IEEE 802.15.4 protokolü DSSS(32,4) modülasyon tekniğini kullanır. Bir diğer ifadeyle 4 bitlik sembolü 32 bitlik sözde rasgele gürültü dizisine dönüştürür. 32 bitlik sözde rasgele gürültü dizisi IEEE 802.15.4 (2003 versiyonu) protokolünde tanımlanmıştır. DSSS(32,4) modülasyon mekanizması $4/32=1/8$ yayılım faktöründe belirli bir gürültü seviyesi için oldukça dirençlidir. Ancak kullanılan $1/8$ yayılım faktörü gürültüsüz ortamda daha fazla çip dizi biti kullanıldığından dolayı veri iletim hızını düşürmektedir. Ortamdaki gürültü seviyesine göre birim zamanda maksimum veri iletimini gerçekleştirebilecek farklı bit uzunluklarında en iyi PN dizilerin bulunması problemin içeriğini oluşturur. Bu durum Şekil 2.4' de gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Protokol İle Adaptif PN Dizisi Üretme Mekanizması Karşılaştırması

Ortamdaki gürültü seviyesi; düşükse daha az bit uzunluğuna sahip PN chip sequence, yüksekse daha fazla bit uzunluğuna sahip PN chip sequence üretilerek veri iletim hızında artış sağlanması ise problemin çözümünü ifade eder.

2.2 İlgili Yayın ve Araştırmalar

Bu alt bölümde veri aktarım hızı ile bağlantılı olarak yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur.

Sinyal Gürültü Oranı (SNR, Signal Noise to Radio) pasif beacon IEEE 802.15.4 ağlarda iletim kalitesini belirleyen önemli bir etkidir. Gürültü sinyalleri kanal boyunca iletilen çerçevelerde bit hatalarına neden olabilir. Böylece verinin dağıtım oranına bağlı olarak tekrar iletim gerekebilir. Örneğin bir kanal yüksek gürültü düzeyine sahipse bit hataları küçük çerçevelere göre büyük çerçevelerde daha fazla görülür. Yeniden iletim sürecini azaltmak için büyük boyutlu çerçeveleri küçük hale getirilebilir. Küçük çerçeveler halinde dönüştürülmesi çerçeve uzunluğunun gürültülü kanallarda anahtar rol oynamasıdır.

S.Ci ve H.Sharif yapmış olduğu çalışmalarında IEEE 802.11 kablosuz ağ performansı analiz edilmiş ve çarpışma faktörleri, protokol ek yükleri, çerçeve hataları ile ilgili

matematik tanım yapılmaya çalışılmıştır. Araştırmada maksimum işe göre optimum çerçeve boyutu tahmin edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen uygulamalarda kanal alanı ölçümünde kapalı kanal modeli temel alınmıştır [7].

B.S.Kim, Y.Fang ve T.F.Wong yapmış olduğu çalışmalarında kanal bilgisi ve değişken boyutta çerçeve iletimi temel alınarak dinamik çerçevelemeye uyumlu protokol geliştirilmesi amaçlanmıştır. IEEE 802.11 standardında tek çerçeve kullanımının aksine çalışmada farklı veri büyüklükleri içeren çerçeveler kullanılmıştır. Böylece kanalın iletim durumuna göre daha büyük boyutlu verilerin yüksek veri oranlarıyla iletimi sağlanmıştır. Kanaldaki bir önceki çerçeve iletim bilgisi temel alınarak yeni iletimde çerçeve büyüklüğü belirlenir. Böylece kanal durumu gönderilecek bit sayısını belirlemede etkin kullanılmaktadır [8].

J.Tourrihes yapmış olduğu çalışmasında birçok kablosuz ağlarda temel parametre olan dwell büyüklüğünün CSMA/CA trafik yoğunluğunu azaltma etkisi araştırılmıştır. Dwell büyüklüğünü azaltarak dwell'in özellikle çerçevelemedeki ek yükünün etkisi düşürmeye çalışılmıştır. Kısa dwell büyüklüğü etkisi ve türevleri ile ilgili uygulamalara çalışmada yer verilmiştir [9].

Optimum çerçeve boyutunu bulmak için bir başka alternatif olarak her başarısız iletim sonrasında çerçeve boyutunu yarıya indirmek ve her başarılı iletim sonrasında çerçeve boyutunu ikiye katmak olarak gösterilebilir. S.Ci ve H.Sharif yapmış olduğu çalışmalarında çerçeve boyutunu ikiye bölme/katlama yoluyla en uygun çerçeve boyutunu bulmak için yapılan çalışma listelenmiştir. Bu çalışmada IEEE 802.11 kablosuz ağlarda kullanılabilecek iki basit parçalama tabanlı geri çekme algoritması tasarlanmıştır. Uygulama sonuçları kanal verimliliğinin arttığını ve sistemde uçtan uca gecikmenin azaldığını göstermektedir. Aynı zamanda sonuçlarda, kanal çok gürültülü olduğunda önerilen parçalama algoritmalarının iyi performans göstermediği görülmektedir. Bu yaklaşım kolay olmasına rağmen, hedeflenen değere yakınsaması için biraz yatışma süresi (settling time) gerekmektedir [10].

D.Qiao ve S.Choi yapmış olduğu çalışmalarında kanal özelliklerini kullanarak optimum çerçeve boyutu bulmaya çalışmışlardır. Bu çalışmada IEEE 802.11 a protokolü fiziksel katmanı (PHY)' de Dik Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) ve sekiz farklı PHY oranı yanı sıra IEEE 802.11MAC alt katmanında Dağıtımli Koordinasyon Fonksiyonu (DCF)

incelenmiştir. Noktadan noktaya iletişimde Dağıtımli Koordinasyon Fonksiyonu altında analitik olarak verimli paket gönderimi sağlanmıştır. Alıcı ve verici arasındaki kablosuz kanal durumuna bağlı olarak PHY oranı seçimi ve dinamik parçalanma(fragmentation) sağlanmasına bağlantı adaptasyonu olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada bahsedilen bağlantı adaptasyonu uygun sistem mimarisi oluşturulmuştur [11].

D.Qiao, S.Choi ve K.G.Shin yapmış olduğu çalışmalarında kanal özelliklerini kullanarak optimum çerçeve boyutu bulmaya çalışmışlardır. Bu çalışmalarında IEEE 802.11.a standardı üzerinde Dağıtık Koordinasyon Fonksiyonu (DCF) ile belirli bir zamanda ağda iletilen kullanılabilir veri miktarı analiz eden bir method geliştirmişlerdir. Bu methodla, veri ek yükü uzunluğunda kapalı form fonksiyonu olarak beklenen başarılı iletimi sağlanmış veri miktarı, çerçevenin iletiminin başarısız olduğu durumda yeniden gönderilme sayısı, kablosuz kanal durumu, seçilen veri iletim hızını ifade edilmiştir. Daha sonra çalışma, teorik analizine dayalı, 802.11a sistemleri için yeni bir MPDU (MAC Protokolü Veri Birimi) tabanlı bağlantı adaptasyon şeması önermektedir. Basit bir tablo odaklı yaklaşım ve temel fikir dinamik programlama tekniği uygulanarak en iyi PHY modu tablo yeniden kurulmuştur. En iyi PHY modu tablosu veri yükü uzunluğu, kablosuz kanal durumu ve çerçevenin yeniden gönderme sayısından oluşan sistem durumu üçlüsü ile ifade edilmiştir. Çalışma zamanında, bir kablosuz istasyon gösterge olarak up-to-date sistem durumunu kullanarak, basit bir tablo sorgusundan sonraki iletim girişimi için en uygun PHY modu belirlenmiştir. Elde edilen uygulama sonuçlarına göre önerilen MPDU-tabanlı bağlantı adaptasyonu şeması, tek modlu şemalar ve AutoRate Fallback (ARF) şemalarından daha üstün olduğu görülmüştür [12].

D.Qiao ve S.Choi ve D.Qiao, S.Choi ve K.G.Shin (2002) yapmış olduğu çalışmalar IEEE 802.11 a standartlarına uygundur. IEEE 802.15.4 PHY ve MAC alt katman tanımlamaları IEEE 802.11 a standardındaki tanımlamalardan farklı olduğundan dolayı bu çalışmalar IEEE 802.15.4 uyumlu değildir.

L.Yang ve M.S. Alouini kablosuz iletişim sistemlerinde kanal karışması (cochannel interference) durumunda ortalama kesinti oranı (veya ortalama düzey kesinti oranı, LCR) ve ortalama kesinti süresi (AOD) konuları üzerinde çalışma yapmışlardır. Özellikle, minimum istenen sinyal gücü gereksiniminin yeterli alımında LCR ve AOD için kapalı form ifadeleri sunulmuştur. Sonuçlar oldukça genel elde edilmiştir ve Sistem hesapları bağımsız eş dağıtılmış Rician ve / veya Nakagami zayıflayan ortamları

üzerinden yönetilmiştir. Uygulandığında, elde edilen yeni ifadeler LCR ve AOD ile ilgili daha önceden yapılan araştırmalarla karşılaştırıldığında;

1. Girişim sınırlı sistemlerde istenen ve girişen sinyalleri zayıflayan Rayleigh türünü konu edinmiştir.
2. Rician ve Nakagami zayıflayan kanallar üzerinde güç sınırlı sistemler yönetilmiştir.

Ayrıca çalışmada sonuçların uygulamaları gösteren sayısal örnekler sağlanmış ve tartışılmıştır. Bu sonuçlar, belli bir minimum istenen sinyal güç ihtiyacını belirten AOD üzerinde bir kat uyardığını gösterilmiştir. Ayrıca AOD esas olarak arzu edilen kullanıcılarının en fazla Doppler frekansları (ya da eşdeğer bir hızda) tarafından etkilendiğini ifade edilmiştir [13].

Y.C. Ko, M.R.Burr, M.S.Alouni, ve A.Abdi yapmış olduğu çalışmalarında kesit oranı düzeyi ve girişim sınırlı kablosuz haberleşme sistemlerinin ortalama kesinti süresini hesaplamak için bir karakteristik fonksiyon tabanlı bir yaklaşıma dayanmaktadır. Farklı dağıtılmış Rician zayıflayan sistemlere uygulanabilen analitik sonuçlar oldukça genel elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Monte Carlo uygulamaları tarafından onaylanmış ve bazı sayısal örneklerle yorumlanmıştır [14].

L.Yang ve M.S. Alouni ve Y.C. Ko, M.R.Burr, M.S.Alouni, ve A.Abdi yapmış olduğu çalışmalar IEEE 802.15.4 standardına uyumlu değildir.

T.Sato, M.Kawabe, T.Kato ve A.Fukasawa yapmış olduğu çalışmalarında, üç-durumlu Markov modeli kullanılarak kanal patlama hatası altında hibrit otomatik tekrar isteği (ARQ) için bir verim analizi yöntemi tanımlamışlardır. Hibrid ARQ'da ileri hata düzeltme (FEC) kodu ve çoklu çerçeve ret (MREJ) olarak rastgele ve patlama hata düzeltme kodları için çalışılmıştır. Çalışmada verim sınırlı ve sınırsız tampon belleği kullanılarak elde edilmiştir. Kanal patlama hatasında uyarlanabilir aralık rasgele ve patlama hata doğrulama kodları kullanılarak hibrit ARQ için tanımlamışlardır. Bu çalışmada slotted CSMA/CA kullanılmıştır. Unslotted CSMA/CA kullanımı hakkında bilgi verilmemiştir [15].

İletişim sistemlerinde yan bilgiler gibi alınan sinyal güç oranı (SNR) kullanımı özellikle zamanla değişen kanal kalitesinde yaygın olarak kabul edilir. Pek çok defa bu yan bilgi, güncel kanal sembollerinden veya önceki sembollerden alınan SNR gibi kullanılır. Özel olarak birinci dereceden Markov kanalı değişken zamanlı kanallar için matematiksel olarak izlenebilir bir model sağlar ve en güncel sembole öncelik tanıyarak SNR hesaplanmasında kullanılır. Birinci dereceden Markovian yaklaşımı ile güncel olan sembolün bilgisi göz önüne alındığında başka herhangi bir önceki sembol güncel olandan bağımsız olmalıdır. Deneysel ölçümler birinci dereceden Markovian yaklaşımını yararlı bulmasına rağmen, ikinci veya daha yüksek mertebeden Markov süreçleri daha doğru bir model sağlayabileceği de savunulmaktadır. H.S.Wang ve P.C.Chang yapmış olduğu çalışmalarında, daha önceki sembole karşılık gelen bilgi kullanılarak güncel sembolden kalan belirsizlik miktarının önemsiz olduğu gösterilmiştir. Çalışmada unslotted IEEE 802.15.4 MAC fonksiyonları için olasılıksal bir model geliştirilmiştir. Çarpışmalar için detaylı bir analiz yapılmasına rağmen, gürültü sinyalleri etki eden kanallar için bir çalışma sunulmamıştır [16].

F.Shu ve T.Sakaurai yapmış olduğu çalışmalarında IEEE 802.15.4 MAC protokolü enerji korumalı CSMA/CA kullanarak kablosuz algılayıcı ağların performansı hakkında analitik sonuçlar elde etmişlerdir. Periyodik trafik içeren yıldız ağlarında hem doymuş hem doymamış senaryolar üzerinde onay alınan ve onay alınmayan modlar simüle edilerek ve elde edilen sonuçların doğruluğu onaylanarak verimliliği sağlamışlardır. Çalışma sabit nokta eşitliğinin çözümüne dayanmıştır ve doymuş durum için sabit noktanın varlığını, tekliğini kanıtlamıştır. Doygunluk hacmini maximize eden başlangıç geri alma penceresi ile aktif düğümlerin sayısının yaklaşık olarak doğrusal bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada düğüm sayısının sonsuza eğilimli olduğu doymunluk modeli incelenmiş ve asimtotik verim için basit bir ifade elde edilmiştir. Geliştirilen modelde doymuş ve doymamış ağlar için sonuçlar alınmasına rağmen gürültülü ortamlara ilişkin performans analizi yapılmamıştır [17].

M.Goyal ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada beacon desteklemeyen IEEE 802.15.4 MAC protokolü için olasılıksal bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model kanal erişimi ve paket üretim oranları için yarışan düğüm sayısı göz önüne alındığında, paket kaybı olasılığını ve paket gecikmesini öngörmektedir. Bu model aynı zamanda, belirli durumlarda gizli düğümlerin etkisine önem vermektedir. Model tahminleri ve

NS2 uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır. İkisi arasında geniş aralıkta paket üretim oranları ve ağda yarışan düğüm sayıları için mükemmel bir uyum gözlenmiştir. Bu çalışmada veri iletim gecikmesi ve veri paketi kayıp oranı modellenmesine rağmen IEEE 802.15.4 protokolünün DSSS modülasyon tekniğine ilişkin verileri göstermemektedir [18].

J.Misic, S.Shafi ve V.Misic yapmış oldukları çalışmada, IEEE 802.15.4 Standardı beacon destekli modda çalışan bir kişisel alan ağını ayrık zaman Markov zincirleri ve M/G/1/K kuyruk teorisi kullanılarak analiz etmişlerdir. Geliştirilen model paket varış hızı, istasyon sayısı, istasyonun tampon büyüklüğü, paket büyüklüğü ve iki beacon arasındaki pasif periyot gibi farklı parametrelerin etkisini içermektedir. Erişim olasılığı, ortamın boş olma olasılığı, cihazda kuyruk uzunluğu dağıtımı ve paket hizmet zamanının dağıtımı olasılığı gibi birçok önemli performans parametresi kullanılmaktadır. 802.15.4 ağlar ve uyumlu ağ cihazlarının uygulanmasına ilişkin bazı önemli sonuçlar özetlenmiştir. Bu çalışmada analizler olasılık tabanlı fonksiyonlarla modellenmiştir. Ancak ortam gürültüsünün performansa etkisi incelenmemiştir [19].

IEEE 802.15.4 standardı, düşük güç ve düşük hızlı kablosuz algılayıcı ağları uygulamaları (WSN'ler) ile neredeyse hayatımızın her alanında değinmek için büyük kolaylıklar sunmaktadır. IEEE 802.15.4 CSMA/CA algoritması ile doymuş ve homojen trafik için önemli çalışmalar yapılmıştır. J.Zhu, Z. Tao ve C.Lv yapmış oldukları çalışmada ise heterojen doymamış trafik için CSMA/CA algoritmasının performansı değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında iki modifiye yarı Markov zinciri ve bir makro Markov zinciri bir asimetrik sistemi tanımlamak için kullanılmıştır. Bu asimetrik sistemde trafik ulaşımları ve paketlerin kanala erişimi birbirleri üzerinde önceliği olmadan sağlanır ve heterojen düğümlerin basit bağımsız süperpozisyon davranışı dışında birbirlerine davranışları etkileşimlidir. Verimlilik, paket gecikmesi ve doymamış enerji tüketimi onay istemeyen beacon destekli IEEE 802.15.4 ağlarda bu modellere dayalı olarak tahmin edilir. Kapsamlı uygulamalar basitleştirilmiş modellerin analiz sonuçları ve uygulama sonuçlarının iyi eşleştiğini ve aynı zamanda doğruluğunu desteklediğini göstermiştir. Bu çalışmada slotlu IEEE 802.15.4 haberleşmesinde doymamış durum analizinde performans incelemesi yapılmasına rağmen slotsuz IEEE 802.15.4 haberleşmesine ilişkin değerlendirme yapılmamıştır [20].

L. Badia, N. Baldo, M. Levorato ve M. Zorzi' nin yapmış oldukları çalışmada kablosuz kanallar üzerinde video iletiminde hata kontrol teknikleri analizi için Markov modelleri temel alan bir çerçeve sunmuşlardır. Kanalda geri bildirim gerektiren ama ayrıca adaptif hata kontrol uygulanabilen yeniden gönderme teknikleri üzerinde çalışmışlardır. Bu metodolojideki çalışmalar genellikle veri paketlerindeki değişmeyen(uniform) akış üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmada, video iletiminde farklı paket büyüklükleri ve hatta daha önemli olarak artarak şifreleme gibi önemli sorunlar çözülmeye çalışılmıştır. Bundan dolayı iki farklı durum için çalışmalar sürdürülmüştür. İlki iki ara giriş ile birleştirilmiş düşük düzeyde sistem tanımlaması değerlendirilmiştir. Şöyle ki hem video paket üretim süreci hem kablosuz kanal modeli ayarlanabilir durum sayılı Markov zincirleriyle tanımlanmıştır. İkinci olarak yüksek düzeyde sistem tanımlaması tüm sistemin değerlendirmesini, paket üretim sürecini yeniden üretim ile besleyen, hata kontrol süreçlerini tanımlayan diğer Markov zincirleriyle temsil edilmiştir. Çerçeve seçici iletimde hibrit otomatik tekrar isteği ile değerlendirilebilir ama aynı zamanda sadece otomatik tekrar isteği veya ileri hata düzeltme şemaları incelemek için uyarlanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bu şekilde, nispeten video iletimi, hem nicel senaryolarla çeşitli performans eğilimlerini değerlendirmek için farklı çözümleri değerlendirmek mümkün bulunmaktadır. Böylece tasarlanan çerçeve kablosuz üzerindeki video iletimlerinde uygulanan hata kontrol tekniklerinin davranışlarını anlamak için etkin bir araç olarak kullanılabilir ve bu tür sistemler için tasarım ilkeleri belirlenebilir [8]. Bu çalışmada Paket Hata Oranı (PER, Packet Error Rate) çeşitli sinyaller için Markov modellerinde girişim oranları kullanılarak analiz edilmiştir. Paket hata oranı farklı senaryolarda formülleştirilmesine rağmen çalışma IEEE 802.15.4 protokolüne uyumlu değildir. [21]

C. Y. Lee, H. Cho, G. U. Hwang, Y. Doh ve N. Park 'ın yapmış oldukları çalışmada IEEE 802.15.4 ACK modlu slotlu CSMA/CA kablosuz algılayıcı ağları için analitik model geliştirilmiştir. Veri çerçevesi iletim süreci için yenileme yaklaşımı temel alınmıştır. Bütün ağda benzer trafik özellikleri gösteren düğümleri bulunduran kablosuz algılayıcı ağları için analitik model oluşturulmuştur. Bu analitik model kablosuz algılayıcı ağlar için kullanılarak ağ verimliliği, başarılı iletim için ortalama servis zamanı, iletimin başarılı olma olasılığı, başarısız iletimden dolayı çerçevenin kaybedilme olasılığı ve başarısız temiz kanal atamasından (CCA) dolayı çerçevenin

kaybedilme olasılığı gibi performans ölçütleri elde edilmiştir. Sayısal çalışmalar ve simülasyonlar aracılığıyla bu analitik model geçerli kılınmıştır [22]. Bu çalışmada bir analitik model önerilmiş ve onay çerçevesi ile IEEE 802.15.4 ağlar için slotlu CSMA / CA kullanılarak performans değerlendirilmiştir. Buna rağmen bu çalışma IEEE 802.15.4 protokolünün slot desteklemeyen modu hakkında herhangi bir bilgi içermemektedir.

P. Park ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, dayanıklılık ve gecikme gereksinimlerinde güç tüketimlerini en aza indirmek için IEEE 802.15.4 MAC katmanında çalışacak adaptif optimal görev döngülü (duty-cycle) algoritma geliştirmişlerdir. Deneysel gerçekler temel alınarak, gerçeğe bağımlılık, gecikme ve düğümdeki görev döngüsünde güç tüketimi ve yaygın deneyler aracılığıyla doğrulamayı geçerli kılan basit deneysel modeller geliştirmişlerdir. Deneysel tabanlı modellerin katsayıları kolayca veri trafiği, ağ topolojileri ve ortam erişim parametreleri hakkında herhangi bir açık bilgi olmadan bir öğrenme aşaması getirerek mevcut IEEE 802.15.4 donanım platformları üzerinden hesaplanabilir olduğunu göstermişlerdir. Deneysel-tabanlı model daha sonra paket iletim güvenilirlik ve gecikme gereklerini yerine getirirken güç tüketimini en aza indirmek için bir dağıtılmış uyarlamalı algoritma türetmek için kullanılmıştır. Algoritma IEEE 802.15.4 ortam erişim kontrolü üzerine herhangi bir değişiklik yapmadan kolayca uygulanabilmektedir. Deneysel sonuçlar, deney tabanlı modelin doğru olduğunu ve amaçlanan adaptif algoritmanın görev döngüsünde optimal değeri elde ettiğini, ağın ömrünü gerçekleştirme, sabit ve geçici koşullar altında gecikme kısıtlamalarının maksimize ettiğini göstermektedir. Bu basit analitik modeli güvenilirliği, ortalama gecikme ve görev döngüsü protokol ortalama güç tüketimi gibi performans ölçümlerini sağlamaktadır [23].

IEEE 802.15.4 Ortam Erişim Kontrolü (MAC) protokolü ile yapılan çalışmalar, çok düğümlü ağlardan ve özellikle hareketlilikten uzak homojen trafik, ideal taşıyıcı duyarlılığı gibi varsayımları temel aldığından yeterli kalmamaktadır. P.D. Marco, P. Park, C. Fischione, K. H. Johansson'ın yapmış oldukları çalışmada, slotsuz IEEE 802.15.4 MAC için yeni genelleştirilmiş bir analiz sunulmaktadır. Analizde çok düğümlü (multi-hop) ağların neden olduğu heterojen trafik, ağdaki düğümler arasındaki farklı trafik durumları ve azaltılmış taşıyıcı duyarlılığından dolayı gizli terminallerin etkileri üzerinde çalışılmıştır. MAC ve yönlendirme protokolleri arasında karmaşık

ilişki modellenmiş ve modelden sonuçlar elde edilmiştir. Çeşitli ağ yapılandırmalar için, paket kayıp olasılığını veya çok düğümlü yollar karşısında dengelenmemiş trafik yükünü temel alan yönlendirme durumları analiz edilmiştir. Bu yönlendirme durumları, düğümlerin yüksek paket üretim oranlarına sahip düğümlerin enerji tüketimi için potansiyel yıkıcı etkilerinden uzaklaşmak için doğrudan trafik eğiliminde olduğunu gösterilmiştir. Bu heterojen trafik ve sınırlı taşıyıcı algılama mesafesi performans üzerinde etkin bir rol oynadığı ve trafik dağılımını dengelemek için ağ üzerindeki yönlendirmede baskın düğümlerin varlığı dikkate alınması sonucuna varılmıştır [24].

P. Park ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalar ve P.D. Marco, P. Park, C. Fischione, K. H. Johansson'ın yapmış oldukları çalışmalarda slot desteklemeyen IEEE 802.15.4 MAC operasyonları stokastik model geliştirilmiştir. Yazarlar, görev döngüsü(duty-cycle), çarpışma ve ayrıntılı trafik hızı gibi parametrelerin etkisini analiz edilmiş, ancak gürültü sinyalleri tarafından etkilenen kanallar için bir çalışma içermemektedir.

Kablosuz sensör ağları özellikle IEEE 802.15.4 standardının çıktığından beri yaygın olarak endüstriyel uygulamalarda uygulanmıştır. Bir otomobil projesine katkı sağlayan IEEE 802.15.4 tabanlı sensör ve uygulayıcı ağı, otomotiv sisteminin titreşimleri ölçmek ve kontrol etmek için çeşitli örnekleme oranlarının altında birçok ölçüt ile (paket dağıtım oranı, gecikme ve enerji tüketimi) çalışması gerekir. W. Du, D. Navarro ve F. Mieleveville' nin yapmış oldukları çalışmalarında her bir sensör düğüm üzerindeki donanım ve yazılımın yanı sıra ağ davranışlarını da ayrıntılı modelleme sağlamak amacıyla, soyutlama düzeyinde belirli bir esneklik ile sensör düğümlerinin donanım ve yazılımının birlikte simülasyonunu destekleyen SystemC-tabanlı kablosuz sensör ağları simülatörü IDEA1 üzerinde deneyler yapılmıştır. IEEE 802.15.4 protokolü üzerinde mevcut çalışmalarının performans değerlendirmesi ile karşılaştırıldığında, bu yazının hem işaret etkin (beacon) ve işaret etkin olmayan(non beacon) modlarında çeşitli parametre ayarları altında çoğu önceki çalışmalarda göz ardı edilen IEEE 802.15.4 standardında işaret izleme senkronizasyon mekanizmasına anlamlı katkılar sağlamıştır. Ayrıca, simülasyon sonuçlarının derinlemesine analizi diğer uygulamalar için genel deneyim olarak kullanılabilecek farklı trafik yükleri ve uygulama gereksinimleri altında iyi parametre yapılandırmaları bulunmasını sağlamıştır [25]. Bu çalışmada IEEE 802.15.4 protokolü hem slotlu hem slot desteklemeyen modlarının performansı

araştırılmıştır. Bu makalede paket iletim oranı, gecikme, enerji tüketimi gibi parametreler hakkında detaylı analiz verilmiştir.

IEEE 802.15.4 ortam erişim kontrolü ve fiziksel katman özellikleri çıktığından beri, taşıyıcıyı dinleyen çoklu erişim / çarpışma kaçınma (CSMA / CA) stratejilerinin kullanılması, kablosuz sensör ağlarının kullanımını arttırmak için önemli bir kilometre taşıyı temsil etmektedir. F. Wang, D. Li, Y. Zhao' nun yapmış çalışmada, yazarlar ilk olarak düğüm ve kanal durumlarını bulunduran ayrık zaman Markov zincirinin kullanıldığı IEEE 802.15.4 protokolünde slotlu CSMA/CA yarışma erişim periyodunda (CAP) performans analizi yapmışlardır. Daha sonra CAP'de Markov zinciri modellerini benimseyerek çalışmayı genişletmişlerdir. Genişletilen bu modeller performans analizinde, slotlu CSMA/CA stratejisinde kullanıldığı kadar slotsuz CSMA/CA stratejisinde kullanılabilir. Kapsamlı simülasyonlar önerilen modellerin ve sonuçların doğruluğunu ve etkinliğini göstermektedir [26]. Bu çalışmada ortam erişim çerçevesi ve çerçevelerin parametrelerinin etkileri hakkında detaylı bir analiz yapılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda IEEE 802.15.4 kullanılan CSMA / CA mekanizmasının performansını artırmak için bir modifikasyonunu içerir. Bununla birlikte, gürültü sinyallerinin protokolü performansı üzerindeki etkisiyle ilgili bir araştırma içermemektedir.

Son literatür çalışmaları, dinamik spektrum özellikleri ile kablosuz sensör ağlarını nitelendirmektedir. Kavramsal olarak radyo ağın bir ana bileşeni olarak tanıtıldığı zaman, özellikle yüksek dinamik ortamlarda bir ağ yönetim protokolü ağ bağlantısı ve istikrarı sağlamak için gereklidir. Kablosuz algılayıcı ağlarda bu tür protokolleri gerçekleştirme algılayıcı ağlarda kaynak kısıtlamaları fazla olduğundan dolayı zordur. Hızlı ve hafif ağır (light-weight) iletişim protokolleri enerji tasarrufu çözümleri için düşük hız ve düşük güçlü küçük düğümler içeren kablosuz algılayıcı ağlarına gereksinim duymaktadır. S. Zubair, N. Fisal, M. B. Abazeed, B.A. Salihu ve A.S.Khan'ın yapmış olduğu çalışmada WSN için bu ihtiyacını karşılayan bir dağıtılmış basit çözüm önerilmiştir. Bu protokol ile çok kanallı bir ortamda bir düğüm hızla komşu düğümlerle bir kontrol kanalı kurabilmektedir. Hafif dağıtılmış coğrafyada müdahale dayalı ve az yük ile kesişen düğümlerle yeterli ilgilenen kontrol kanalının kapsama alanını arttırabilir veya azaltılabilir. Yerel minimal düğümleri belirleyerek, aynı zamanda zamanı ve geçiş tarafından yapılan açılı yönlendirmedeki enerji yükü veya genellikle yerel minimum sorunu çözmek için kullanılan maksimum güç iletim şemalarını

azaltarak % 70 oranında rota hatası azaltma potansiyeli vardır. Bu çalışma terim olarak görev döngüsü(duty-cycle) ve sinyal güç oranı frekansları ve kavramsal radyo algılayıcı ağları (cognitive radio sensor networks) için ağ yönetim protokollerine uygun enerji ve iletişim yükü gibi iyi yönetme terimlerini tanımlamıştır [27]. Çalışmada yazarlar basit bir öğrenme kanal tahsisi algoritmasına dayanarak lightweight protokolü sunmuşlardır. Ancak çalışmada IEEE 802.15.4 protokolü için önerilen modelin uygulanmasına ilişkin hiçbir araştırma bulunmamaktadır.

IEEE 802.15.4 standardı yüksek bir güvenilirlik sunan düşük güç, düşük veri hızı protokolü sağlamak için tasarlanmıştır. IEEE 802.15.4a standardında değişiklik olarak, değişen hassasiyet sağlamak için fiziksel katman için yeni seçenekler sunmaktadır. Slot desteklemeyen modda, ağ cihazlarının bir zaman slotu olarak senkronize edilmesi gerekli değildir. Bunun yerine, fiziksel ortam erişmek için unslotted CSMA / CA algoritması kullanılır. N. Ullah, M. S. Chowdhury, P. Khan, S. Ullah ve K. S. Kwak yapmış olduğu çalışmada, slotsuz çip yayılım spektrumu kullanan PHY tabanlı IEEE 802.15.4a protokolü için teorik verimlilik ve gecikme sınırları analiz edilmiştir. Hiç bir iletim hatası vermeyen ideal bir kanal için bir gönderici ve bir alıcı arasındaki iletim için formüller verilmiştir. Verimlilik ve gecikme sınırları farklı frekans bantları ve veri hızları için türetilmiştir. Ayrıca, spektral kullanımını ölçmek için, bant genişliği verimliliği standartta ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar IEEE 802.15.4 protokolü ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalı analize göre IEEE 802.15.4a performansı verimlilik artışı ve gecikme azalışı açısından IEEE 802.15.4 protokolünden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Analitik sonuçlarla elde edilen verimlilik bilgisayar simülasyonları ile doğrulanmıştır [28].

IEEE 802.15.4 standardizasyon faaliyetleri tarafından desteklenen gömülü ağlar son yıllarda popülerlik kazanmaktadır. A. Faridi, M. R. Palattella, M. Dohler, G. Boggia, L. A. Grieco ve P. Camarda' nın yapmış olduğu çalışmalarında, IEEE 802.15.4 işaret etkin düğümlerinin paketlerin yeniden iletilmesi dahil tipik çalışma koşulları altında anahtar ağ ölçümleri davranışını ölçmek üzerinde durulmuştur. Genişletilmiş önceki analizler Markov modelleme tabanlı varsayımları incelemişlerdir. Karşılaştırmalı bir çalışma sayesinde, her bir performans ölçütünü(verimlilik, gecikme, güç tüketimi, çarpışma olasılığı ve paket atım olasılığı vb.) etkileyecek varsayımlar araştırılmıştır. Özellikle, - varsayılanın aksine- düğümün kanalı meşgul olarak algılamasında, gecikme

prosedürünün tüm aşamaları için ölçütler sabit olmadığını ve gecikme, paket atım olasılığı ve güç tüketimindeki değişkenliğin belirgin bir etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Eğer kanal meşgulse, NB parametre değeri 1 artırılır. Kaynak düğüm bu işlemi $\text{macMaxCSMABackoffs (M)}$ kadar zaman tekrarlayabilir. Eğer NB, M' den daha büyük olursa, üst katmanlara kanal erişimin başarısız olduğu bildirilir. $\text{MacAckWaitDuration}$ süresince onay alınırsa iletim süreci başarılı kabul edilir. Aksi takdirde iletim tekrarlanır. Benzer olarak, -gene yaygın varsayımın aksine- kanala erişimin iletilme olasılığı kanaldaki düğüm sayısına bağlı olduğunu yani kanalı düğümler eş zamanlı algıladığını göstermişlerdir. İhmal edilen bu bağımlılığın verim ve çarpışma olasılığının hesaplanan değerleri üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğunu çalışma kanıtlamıştır. Bu ve diğer varsayımları önleyen işaret etkin IEEE 802.15.4 yeniden iletimlerde önemli ölçütleri benzer yaklaşımlar vasıtasıyla çalışmada belirlenmiştir [29].

Son yıllarda kablosuz iletişim sektörünün rolü ve sektör için artan talep kablosuz haberleşme standartlarının tasarımını ve LoWPAN ağları için uygun teknolojilerin geliştirilme çalışmalarını arttırmıştır. Sektör ve araştırmalar artık fabrikalar, hastaneler, akıllı ölçümleme ve tarım gibi yeni ortamlar dahil ofis ve ev ötesine yayıldı. Genellikle üst katmanlar ağ katmanı ve uygulama katmanı içerir. Ağ katmanı ağ konfigürasyonu ve yönlendime işlemlerini gerçekleştirir. Uygulama katmanı cihaz için amaçlanan işlevleri korumak için kullanılır. T. Ech-Chaitami, R. Mrabet ve H. Berbia'nın yapmış olduğu çalışmada, günümüzde LoWPAN 'da Zigbee ve 6LoWPAN olarak adlandırılan iki önemli teknolojinin protokollerini ve yapılandırmalarını tanımlama 6LoWPAN ve Zigbee' nin IPV6 ile son kullanıcı için sorunsuz birlikte çalışabilirliğini araştırmışlardır.[30]

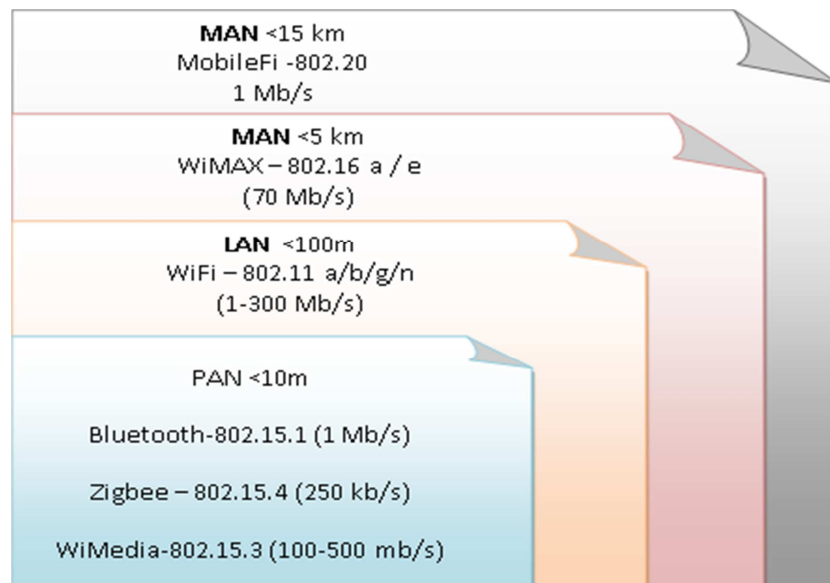
3. BÖLÜM

DÜŞÜK HIZLI KABLOSUZ KİŞİSEL ALAN AĞLARI (DH-KKA) VE IEEE 802.15.4 PROTOKOLÜ

3.1 Kablosuz Ağlar

Kablolu iletişime alternatif olarak geliştirilmiş kablosuz ağlar, iletişim esnasında mekândan bağımsız olabildikleri, hareket özgürlüğüne sahip oldukları bir iletişim ağıdır. Kablosuz ağlar kapsama alanlarına göre 4 bölüme ayrılır. Bunlar:

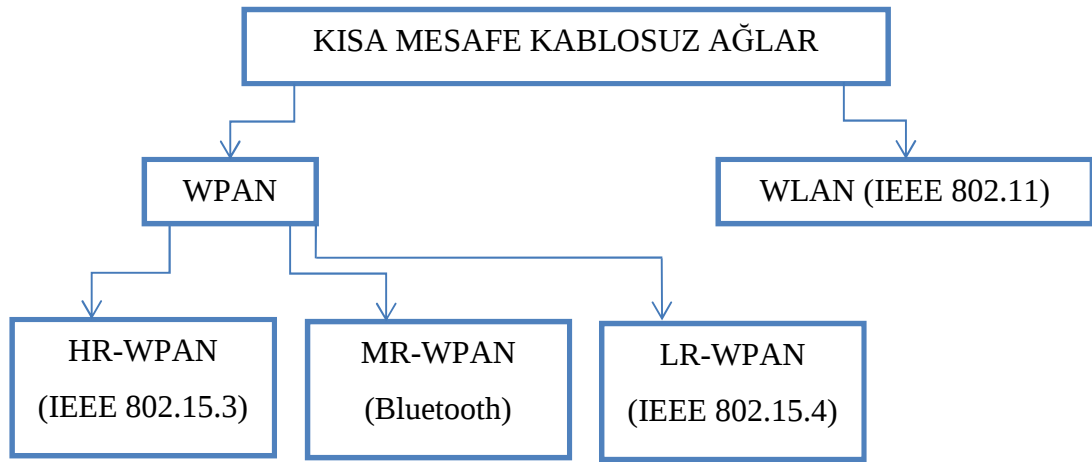
1. Kablosuz Geniş Alan Ağları (Wireless Wide Area Networks, WWAN),
 2. Kablosuz Metropol Alan Ağları (Wireless Metropolitan Area Networks, WMAN)
 3. Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Networks, WLAN) ve
 4. Kablosuz Kişisel Alan Ağları (Wireless Personal Area Networks, WPAN)
- olarak sıralanabilir. Şekil 3.1’ de kablosuz ağların kapsama alanlarına göre sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 3.1: Kablosuz Ağların Kapsama Alanlarına Göre Sınıflandırılması

3.1.1 Kısa Mesafeli Kablosuz Ağlar

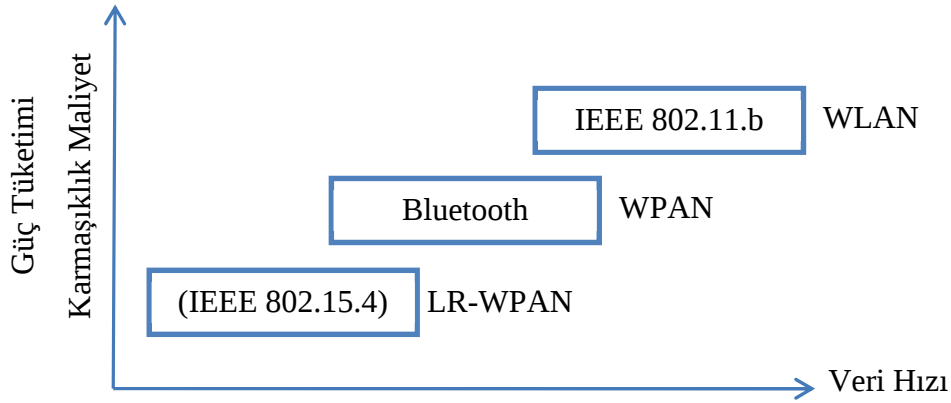
Kısa mesafeli kablosuz ağlar Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi iki sınıfa ayrılırlar. Kablosuz alan ağları (WLAN) mesafeyi ve veri aktarım oranını yükseltmek için kullanılan ağlardır. WLAN daha yüksek hızda veri gönderimine sahip uygulamalarda kullanılır. Ev ya da küçük iş yerlerinde birkaç bilgisayar ve çevre biriminden oluşan, düşük hız ve düşük enerjiye ihtiyaç duyan alanlarda kablosuz iletişim teknolojisi kullanan ağlara Kablosuz Kişisel Alan Ağları (Wireless Personal Area Networks, WPAN) denir.



Şekil 3.2: Kısa Mesafeli Kablosuz Ağların Sınıflandırılması

WPAN, Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi üç sınıfa ayrılır. Bunlardan Yüksek Oran WPAN (HR-WPAN, High Rate WPAN), gerçek zamanlı kablosuz video transferi gibi yüksek hız gerektiren uygulamalarda kullanılır. WPAN 11-55 Mbps arasında veri transfer hızına sahiptir. Bluetooth Orta Oran WPAN (MR-WPAN, Medium Rate WPAN) sınıfına girer. Bluetooth 10 ile 100 metre uzaklıkta 1-3 Mbps veri hızı ile ses ve veri iletimi yapabilmektedir. Düşük Oran WPAN (LRWPAN, Low Rate WPAN) sınıfına girer. Zigbee 250 Kbps veri hızı ile düşük hız gerektiren uygulamalarda kullanılır.

Kısa mesafeli kablosuz ağların Şekil 3.3’ de güç tüketimi, maliyet, karmaşıklık ve veri hızı açısından karşılaştırması grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 3.3: Kısa Mesafeli Kablosuz Ağların Sınıflandırılması

3.1.2 IEEE 802.15.4 Standardı Çalışma Grubu

IEEE 802.15.4 (LR-WPAN) Düşük Hız-Kablosuz Kişisel Alan Ağları, düşük güç ve küçük miktarda veri gereksinimi olan düşük enerjili uygulamalarda kullanılan iletişim ağıdır. Düşük Hız-Kablosuz Kişisel Alan Ağları kısa mesafede iletim yapabilmesi, düşük maliyet ve makul pil ömrü gibi özellikleri bir arada bulundurmasıdır. IEEE Std 802.15.4–2003 adı ile 2003 yılında IEEE tarafından yayınlanan dokümanda standardın yapısı tanıtılmıştır. IEEE 802.15 Çalışma Grubu–4 (TG-4–Task Group 4) ve ZigBee Topluluğu halen standartla ilgili çalışmaları yürütmektedir.

IEEE 802.15.4 (LR-WPAN) Düşük Hız-Kablosuz Kişisel Alan Ağları’ nın uygulama alanları askeri, çevre, sağlık, ev ve diğer ticari alanlar olmak üzere sınıflandırılabilir. Askeri alanda, özellikle savaş alanlarında mevcut donanım bilgisine ulaşmak, düşman askerinin hareketlerini izlemek ve savaş hasarı ile ilgili bilgi toplamak için, çevresel uygulamalarda hayvanların hareketlerini izlemek, kimyasal ve biyolojik tespitlerde bulunmak, orman yangınlarını ve sel felaketlerini tespit etmek için, sağlık uygulamalarında ise hasta takibi için kullanılabilir [32].

802.15 WPAN çalışma grubu Kişisel Alan Ağları (PAN) ve kısa mesafe kablosuz ağlar için kablolu ve kablosuz ağ çözümleri sağlayacak standartlar geliştirmek, var olan

standartları düzenlemek, yeni ve gelişmiş kablosuz ortamlar için OSI katmanlarından fiziksel katman ve veri bağı katmanı seviyesinde oluşturmayı amaçlar.

3.1.3 IEEE 802.15.4 ve ZigBee

IEEE 802.15.4 LR-WPAN düşük hızlı düşük enerjili kablosuz kişisel alan ağlarında oluşturulmuş bir standarttır. ZigBee teknolojisi, IEEE 802.15.4 standardının ortam erişim kontrol katmanı (MAC) ve fiziksel katmanı (PHY) üzerinden ağ ve uygulama servislerinin çalıştırır. PHY ve MAC katmanlarının üzerinde, ZigBee ağ topolojileri ile veri güvenlik özelliklerini ve uygulama profillerinin birlikte çalışmalarını sağlar.

Zigbee küçük boyutta veri alışverişi ile gerçekleştirilmesi mümkün uygulamalarda düşük maliyetli olması, minimum güç tüketme prensibine dayanması, kolay ve esnek yapıda kurulumunun olması nedeniyle günümüzde tercih edilmektedir. Bu teknoloji sayesinde karmaşık ağ yapıları kurmak, bunları genişletmek ve bu yapıların diğer teknolojilerle haberleşmesini sağlamak mümkündür. Bu teknolojinin tipik iletim mesafesi, kapalı mekânda (indoor) görüş alanında olmayan farklı ortamlar arası için 30 metre, görüş alanı için 80 metreden fazla olarak rapor edilmiştir [3]. Tablo 3.1 'de IEEE 802.15.4 genel karakteristikleri - modülasyon parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.1: IEEE 802.15.4 Genel karakteristikleri-Modülasyon Parametreleri[32]

PHY(MHz)	Frekans Bandı(MHz)	Yayılım Parametreleri	
		Chip Oranı (kchip/s)	Modülasyon
2400	2400-2483	2000	O-QPSK
Veri Parametreleri			
Bit Oranı (kb/s)	Sembol Oranı (ksymbols/s)	Semboller	
20	20	Binary	
40	40	Binary	
250	62.5	16'lı Ortogonal	

3.1.4 ZigBee ve Bluetooth Karşılaştırması

Zigbee ve Bluetooth aynı frekans bandında çalışabilmeleri, düşük enerji gerektiren uygulamalarda kullanılmaları nedeniyle birbirlerine alternatif olarak değerlendirilir. Bluetooth ofis ve ev cihazlarında kullanılması ve kablosuz konferans odası veya kablosuz internet bankacılığı gibi birçok uygulamaya imkân tanır. Ayrıca Bluetooth medya uygulamaları için kablo bağlantılarına alternatif olarak düşünülmüştür. Yüksek hız gerektiren uygulamalarda Bluetooth, düşük hızlı uygulamalarda ZigBee ön plana çıkmaktadır. ZigBee ağlarının asıl amacı düşük veri hızları gerektiren izleme kontrol sistemleri ve endüstriyel otomasyon tip uygulamalarıdır. Tablo 3.2’ de her iki teknoloji değişik parametreler bakımından özetlenmiştir.

Tablo 3.2: ZigBee ve Bluetooth [32]

Ticari İsmi	Bluetooth	ZigBee
IEEE Standart	802.15.1	802.15.4
Sistem Kaynağı Gereksinimleri	250 KByte +	4 KByte – 32 KByte
Batarya Ömrü (gün)	1 – 7	100 – 1000 +
Ağa Katılabilen Cihaz Sayısı	7	~sınırsız (65536)
Band Genişliği (Kbit / s)	1000	20 - 250
Veri İletim Mesafesi (metre)	~10	~100

3.2 IEEE 802.15.4 LR-WPAN

LR-WPAN düşük maliyetli ve düşük güç tüketime sahip iletişim ağıdır. LR-WPAN güvenilir ve kısa mesafede veri aktarımını sağlamayı amaçlar.

LR-WPAN’ ın bazı özellikleri:

1. 250kb/s, 40kb/s ve 20kb/s hızlarında veri aktarımı,
2. Yıldız veya noktadan noktaya çalışma,
3. Ayrılmış 16 bit kısa ve 64 bit genişletilmiş adres,

4. Garantilenmiş zaman dilimleri (GTS),
5. Taşıyıcıyı dinleyen çarpışmadan kaçınan çoklu erişim (CSMA-CA),
6. Veri aktarım güvenilirliği için tamamen doğrulanabilir protokol,
7. Düşük güç tüketimi,
8. Enerji sezimi (ED),
9. Bağlantı kalite bildirimi (LQI),
10. 2450 Mhz bandında 16 kanal, 915 Mhz bandında 10 kanal ve 868 Mhz bandında 1 kanal .

3.2.1 IEEE 802.15.4 LR-WPAN Bileşenleri

LR-WPAN ağına Tam Fonksiyonlu Cihazlar (FFD-Full-Function Device) ve Düşük Fonksiyonlu Cihazlar (RFD-Reduced-Function Device) olmak üzere 2 farklı tipte cihaz katılabilir. Bir WPAN' da oluşturulmuş aynı fiziksel kanal üzerinde iki veya daha fazla sayıda cihazın haberleşebilir. Ancak kurulan ağda en azından bir tane kişisel alan ağı (PAN) koordinatörü gibi işleyen FFD bulunmalıdır.

3.2.1.1 Tam Fonksiyonlu Cihazlar (FFD – Full Function Device)

Tam fonksiyonlu cihazlar kişisel alan ağı koordinatörü, koordinatör veya cihaz olarak 3 farklı şekilde hizmet verebilir. Şekil 3.3' de bir tam fonksiyonlu cihaz gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Tam Fonksiyonlu Cihaz [2] .

3.2.1.2 İndirgenmiş Fonksiyonlu Cihazlar (RFD – Reduced Function Device)

Sadece tam fonksiyonlu cihazlar ile iletişim kurabilen indirgenmiş fonksiyonlu cihazlar çok az kaynak ve düşük hafıza kapasitesi ile tasarlanarak son derece basit uygulamalar için kullanılır. RFD'lerin az miktarda veri göndermeleri amaçlanır. Bir RFD aynı zamanda yalnızca bir FFD ile iletişim kurabilir. Şekil 3.4' de indirgenmiş fonksiyonlu cihaz gösterilmiştir.



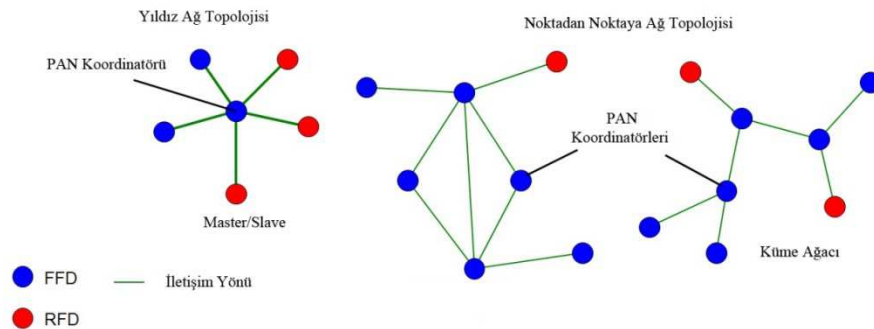
Şekil 3.4: İndirgenmiş Fonksiyonlu Cihaz [2] .

3.2.2 Ağ Topolojileri

LR-WPAN Yıldız Topolojisi veya Noktadan Noktaya Ağ Topolojisi' nin birinde işletilebilir. Her iki topoloji de Şekil 3.5' de gösterilmiştir. Yıldız topolojisinde cihazlar ile PAN koordinatörü olarak anılan tek bir merkezi kontrolcü arasında haberleşme sağlanır. Ağ içinde çalışan her cihaz haberleşebilmek için tekil 64 bitlik genişletilmiş adrese sahip olması gerekmektedir. Cihazlar sahip oldukları adresleri PAN içinde doğrudan haberleşme için kullanır. PAN koordinatörünün onayı ile bu adresler 16 bitlik kısa adresler ile değiştirilir. Yıldız ağ topolojisi endüstriyel otomasyon, kişisel elektronik oyuncaklar gibi basit uygulamalarında kullanılır.

Noktadan noktaya ağ topolojisi de PAN koordinatörüne sahiptir. Ancak bu topolojide yıldız topolojisindeki iletişimden farklı olarak, ağ içindeki cihazlar menzili içindeki diğer cihazlar ile haberleşebilir. Noktadan noktaya ağ topolojisi çokgen bağlantılı ağlar gibi daha karmaşık ağ biçimlerine uygulanabilir. Endüstriyel kontrol ve izleme, ziraat ve güvenlik uygulamalarında bu topoloji kullanılır.

Her bağımsız PAN tekil 16 bitlik bir belirteç kullanmaktadır. PAN belirtecini ve ağ içindeki cihazlar ise 16 bitlik kısa adreslerini kullanarak haberleşebilir ve bağımsız ağlar içindeki cihazlar arasında iletişim olanağı sağlanır.



Şekil 3.5: Yıldız ve Noktadan Noktaya Ağ Topoloji Örnekleri [4]

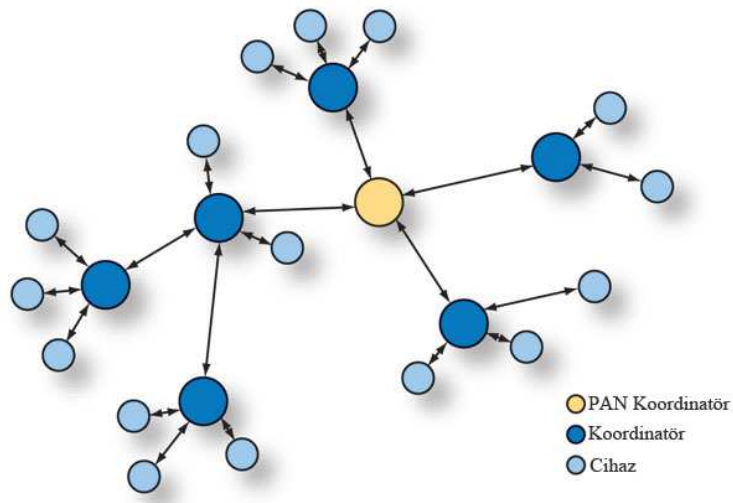
3.2.2.1 Yıldız Ağ Topolojisi

Yıldız ağının temel mimarisi Şekil 3.5’ de gösterilmiştir. Bu mimaride bir tam fonksiyonlu cihaz (FFD) etkinleştirildikten sonra ilk olarak kendi ağını kurar ve PAN koordinatörü olur. Tüm yıldız ağları etki alanları içinde aynı zamanda işleyen diğer tüm yıldız ağlarında bağımsız çalışır. Bu, etki alanı içinde bulunan diğer ağlar tarafından kullanılmayan PAN belirteci seçilerek sağlanır. Bir kez PAN belirteci seçilince, PAN koordinatörü diğer cihazların kendi ağına katılmalarına izin verir. FFD ve RFD’ ler tanımlanan ağa katılabilir.

3.2.2.2 Noktadan Noktaya Ağ Topolojisi

Noktadan noktaya ağ topolojisinde, her cihaz kendi radyo etki alanı içindeki herhangi başka bir cihazla iletişim kurabilir. Ağ içindeki bir cihaz PAN koordinatörü olarak atanır.

Noktadan noktaya iletişim topolojisinin kullanım örneklerinden biriside küme-ağacı ağıdır. Şekil 3.6’ da bir küme ağacı ağı verilmiştir. Küme-ağacı ağı içinde çok sayıda FFD’ nin bulunduğu noktadan noktaya topolojisinin özel bir durumudur. Bir RFD dalın sonundaki düğümden küme ağacı ağına bağlanabilir, çünkü sadece bir FFD ile iletişim kurabilir. Herhangi bir FFD koordinatör görevi yürütür ve diğer cihazlar için veya koordinatörler için eş zamanlama hizmeti sağlar. Bu koordinatörlerden sadece bir tanesi tüm ağ için PAN koordinatörü olabilir.

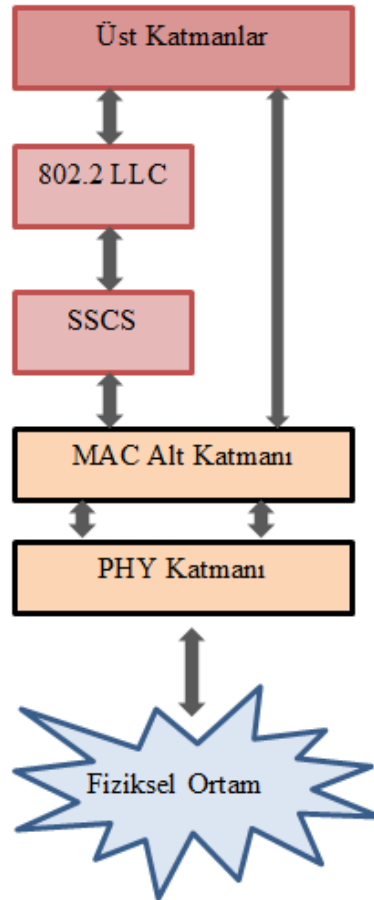


Şekil 3.6: Küme Ağacı Ağı [4]

3.2.3 LR-WPAN Mimarisi

LR-WPAN mimarisi standardı basitleştirmek için katmanlar halinde tanımlanmıştır. Her bir katman standardın bir parçasından ve üstündeki katmanlara hizmet etmekten sorumludur. Blokların yerleşimi 7 katmanlı açık sistemler bağlantısı (OSI) referans modelini temel alır.

Bir LR-WPAN cihazı, radyo frekans alıcı-vericisi ile birlikte onun düşük seviyeli kontrol mekanizmalarını ve veri aktarımının bütün tipleri için fiziksel kanala erişimi sağlayan MAC katmanını içerir. Şekil 3.7’ de gösterilen üst katmanlar, ağ konfigürasyonunu, mesaj yönlendirmesini, cihazların planlanan fonksiyonlarını sağlayan uygulama katmanlarından oluşur. Tanıtılan bu üst katmanlar standardın dışındadır. LR-WPAN mimarisi gömülü cihazlara veya PC tarafından desteklenen cihazlara uygulanabilir.



Şekil 3.7: LR-WPAN Cihaz Mimarisi [1]

Bu tez çalışmasında IEEE 802.15.4 karşılıklı olarak veri transferinde bulunan noktadan noktaya ağ topolojisi kullanılarak test edilmiştir. Paketlerin gönderim süreleri hesaplanarak birim zamanda maksimum veri iletimini gerçekleştirebilecek en iyi PN dizilerin bulunması amaçlanmıştır.

3.2.4 Veri Aktarım Modelleri

3 tip veri aktarım modeli vardır. Bunlar bir cihazdan koordinatöre gönderilen veriler, bir koordinatörden bir cihaza gönderilen veriler ve üçüncü tipi ise eş cihazlar arasında aktarılan verilerdir. Yıldız ağ topolojisinde veriler sadece koordinatör ve cihazlar arasında aktarıldığından dolayı ilk iki veri aktarım modelini kullanır. Noktadan noktaya ağ topolojide veri, ağ içindeki herhangi iki cihaz arasında aktarıldığından dolayı üç veri aktarım modelini de kullanabilir. Sonuç olarak tarif edilen üç veri aktarım modeli bu topoloji için kullanılabilir.

Her veri aktarım tipinin mekanizması, ağın beacon çerçevelerinin iletimini destekleyip-desteklemediğine bağlıdır. Düşük gecikme süresi ile veri aktarımını destekleyen cihazlar için aktif-beacon ağlar kullanılır. Örnek olarak bilgisayar çevre birimleri Aktif-beacon ağları kullanır [1,4] .

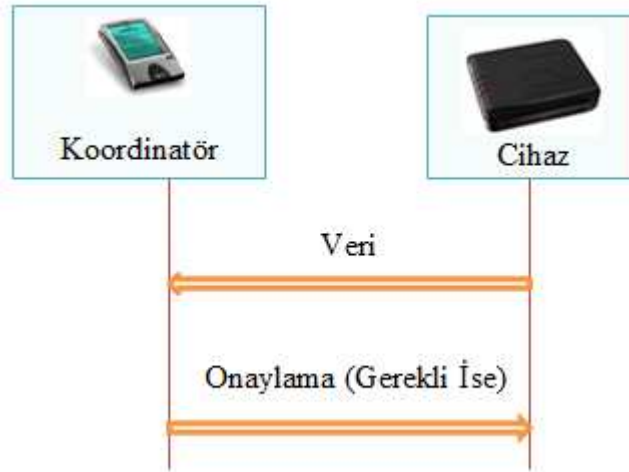
3.2.4.1 Koordinatöre Veri Aktarımı

Aktif-Beacon ağlarda bir cihaz, önce ağın beacon çerçevesini yakalayarak koordinatöre veri gönderir. Ağın beacon çerçevesi yakaladığında cihaz süper çerçeve yapısıyla senkronizasyonu sağlamış olur. Bu işlemten sonra cihaz uygun bir noktada kendi veri çerçevesini slotlu CSMA-CA kullanarak koordinatöre iletir. Koordinatör iletilen verinin başarı ile alındığını seçimli onay çerçevesini ileterek onaylayarak veri aktarımını tamamlanmış olur. Yapılan veri aktarım işlemi Şekil 3.8’ de özetlenmiştir.



Şekil 3.8: Aktif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim

Pasif-Beacon ağlarda bir cihaz, koordinatöre veri göndermek istediğinde, ilk kendi veri çerçevesini slotsuz CSMA-CA kullanarak koordinatörüne gönderir. Koordinatör verinin başarı ile alındığını seçimli onay çerçevesi ileterek onaylayarak veri aktarımını tamamlanmış olur. Bu aktarım işlemi Şekil 3.9’ da özetlenmiştir.

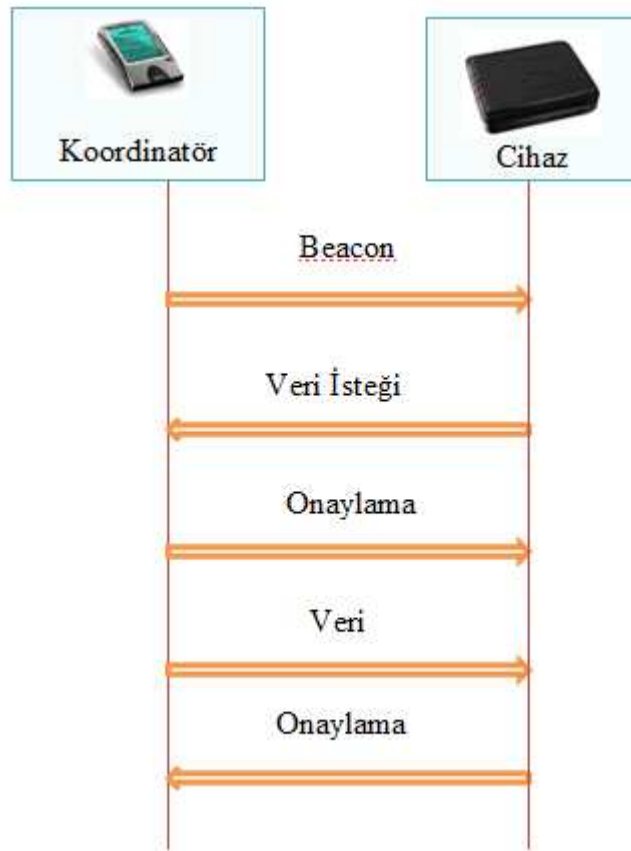


Şekil 3.9: Pasif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim

3.2.4.2 Koordinatörden Veri Aktarımı

Aktif-Beacon ağda koordinatör bir cihaza veri göndermek istenirse, ağın beacon çerçevesinde içinde veri mesajı beklediğini bildirir. Cihazlar periyodik olarak ağın

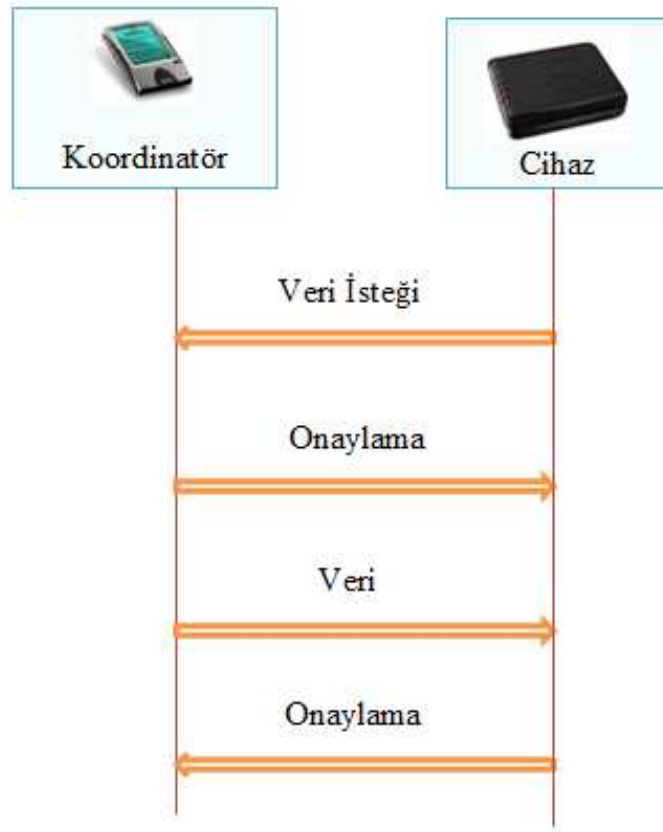
beacon çerçevesini dinler. Eğer cihaz için bekleyen mesaj varsa, cihaz tarafından veri isteği komutu slotlu CSMA-CA mekanizması kullanılarak gönderilir. Koordinatör komutun alındığını onaylamak için seçimli onay çerçevesini iletir ve ardından slotlu CSMA-CA mekanizmasını kullanarak bekleyen veriyi gönderir. Cihaz, bekleyen veriyi aldığı zaman onay çerçevesi yollayarak alındıyı onaylar. İşlem bu noktada tamamlanmış olur. Onay çerçevesinin alınması üzerine mesaj, beacon içindeki bekleyen mesajlar listesinden silinir. Veri aktarım işlemi şekil 3.10’da özetlenmiştir.



Şekil 3.10: Aktif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim

Şekil 3.11’ de Pasif-Beacon ağı içinde koordinatör ile iletişim gösterilmiştir. Pasif-Beacon ağda koordinatör bir cihaza veri göndermek isterse, koordinatör gönderilecek veriyi, uygun cihaz koordinatör ile bağlantı kurana kadar veya veri isteğinde bulunana kadar depolar. Cihaz uygulamada belirtilmiş aralıklarda veri isteği komutunu slotsuz CSMA-CA ile koordinatörüne göndererek, koordinatörü ile bağlantı kurabilir. Koordinatör veri isteğini komutunun başarı ile alındığını onaylamak için onay çevresi

yollar. Cihaz için bekleyen veri mevcutsa, koordinatör slotsuz CSMA-CA kullanarak bekleyen veriyi gönderir. Veri mevcut değilse, koordinatör sıfır uzunluklu veri yükü ile veri çerçevesini gönderir. Bu cihaza bekleyen verinin olmadığı belirtir. Cihaz verinin başarı ile alındığını onaylamak için onay çerçevesini gönderir. İşlem bu noktada tamamlanmış olur .



Şekil 3.11: Pasif-Beacon Ağı İçinde Koordinatör İle İletişim

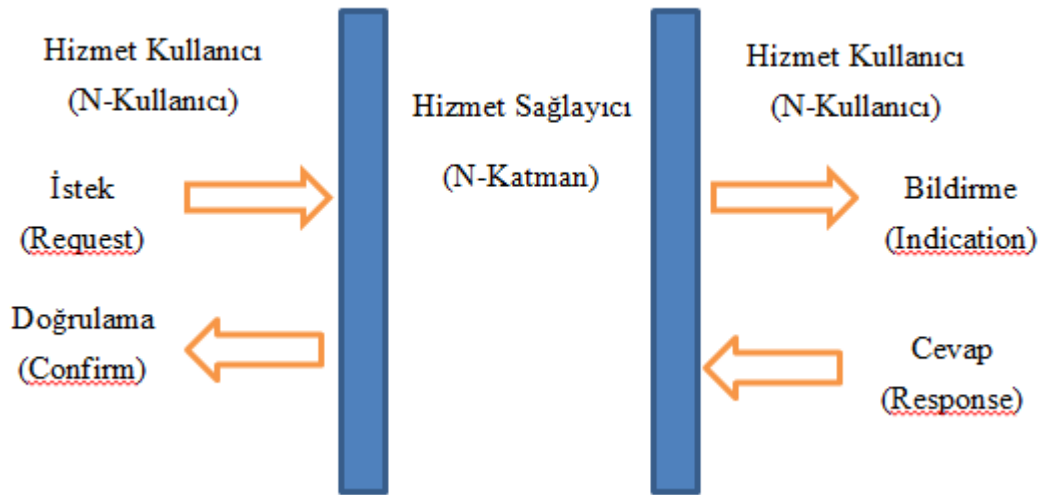
3.2.4.3 Noktadan Noktaya Veri Aktarımı

Noktadan noktaya ağ topolojisi ile kurulmuş ağlarda her bir cihaz kendi menzili içindeki başka cihazlarla iletişim kurabilir. Cihazlar etkin iletişim için alıcı cihazlarla senkronizasyonu sağlamış olmaları veya sürekli haberleşmeleri gerekir. Cihazların senkronizasyonu sağlamış olmaları uygulamaya bağlı olarak değişkenlik gösterir. Cihazların sürekli haberleşmeleri verilerini slotsuz CSMA-CA ile göndermeleri ile gerçekleştirilir.

3.2.5 İlkel Kavramı

Katman hizmetleri, alt katmanın üzerine kurulmuş fonksiyonların, kullanıcıya üst katmanlara veya alt katmanlara hizmet verme yeteneği sunmasını amaçlar. Karşılıklı N-kullanıcı ve onların eş protokol varlıkları ile ilişkili N-katmanı (veya alt katmanı) arasındaki hizmet hiyerarşisi ve ilişkisi Şekil 3.12’ de gösterilmiştir.

Bu hizmetler, N-kullanıcı ve N-katman arasındaki bilgi akışını tanımlayarak belirlenmiştir. Bu bilgi akışı hizmeti tanımlayan anlık olaylar için ayrık modellenmiştir. Her olay, N-kullanıcı ile ilişkili katman SAP’ ı üzerinden bir katmandan diğerine hizmet ilkellerinin geçirilmesinden ibarettir. Hizmet ilkelleri hizmet için gerekli bilgiyi taşır. Bu hizmet ilkelleri soyutlamadır, çünkü onlar sağladığı yöntemden ziyade sadece sağladığı hizmeti belirtir. Bu tanım her hangi diğer arabirim uygulamasından bağımsızdır [1,4].



Şekil 3.12: Hizmet İlkeleri

Hizmetler, hizmet ilkelleri ve parametreleri tanımlanması ile belirlenir ve bu onları karakterize eder. Bir hizmet, hizmet ile ilişkili bir etkinlik oluşturacak şekilde bir veya daha fazla ilişkili ilkel içerebilir. Tüm hizmet ilkelleri hizmet sağlamak için gerekli bilgiyi taşıyan sıfır veya çok sayıda parametreye sahip olabilir. Bir ilkel belirtilen 4 gruptan birindedir [1,4] .

1. **İstek (Request):** İstek ilkeli hizmetin başlatılması isteğini N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir.
2. **Bildirme (Indication):** Bildirme ilkeli N-kullanıcısı için önemli içsel N-katman olayı belirtisini N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir. Bu olay uzaktaki istek hizmeti ile mantıksal olarak ilişkili olabildiği gibi N-katmanın içsel olayı sebebiyle de oluşabilir.
3. **Cevap (Response):** Cevap ilkeli bir bildirme ilkeli tarafından başlatılmış işlemin tamamlanmasını N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir.
4. **Doğrulama (Confirm):** Doğrulama ilkeli bir veya daha fazla sayıda ilişkilendirilmiş hizmet isteklerinin sonuçlarının taşınmasını N-kullanıcısı için N-katmanından geçirir.

3.3 IEEE 802.15.4 FİZİKSEL KATMANI ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde IEEE 802.15.4 standardının fiziksel katmanının (PHY) sorumlu olduğu aşağıdaki görevlerden bahsedilecektir.

1. Radyo alıcısı için aktivasyon-deaktivasyon
2. Güncel kanal için enerji sezimi (ED)
3. Alınan paketler için bağlantı kalite bildirimi (LQI)
4. CSMA-CA için temiz kanal atanması (CCA)
5. Kanal frekans seçimi
6. Veri iletimi ve alımı.

Fiziksel katman tarafından belirlenen sabitler ve özellikler bu bölümde italik yazılmıştır. Sabitler genel olarak “*a*” ön ekine, özellikler genellikle “*phy*” ön ekine (örneğin, *aMaxPHYPacketSize*) sahiptir.

3.3.1 Genel Gereksinimler ve Tanımlamalar

Aşağıdaki alt bölümlerde genel gereksinimler ve tanımlamalar IEEE 802.15.4 standardının tüm fiziksel katmanları için belirtilmiştir.

3.3.1.1 İşletim Frekansı

Tablo 3.3’ de farklı frekans bantlarında çalışan cihazların veri hızları modülasyon ve yayılma biçimleri özetlenmiştir.

Tablo 3.3: Frekans Bantları ve Veri Hızları [4]

PHY (MHz)	Frekans Bandı (MHz)	Yayılım Parametreleri		Veri Parametreleri		
		Chip Oranı (kchip/s)	Modülasyon	Bit Oranı (kb/s)	Sembol Oranı (ksymbol/s)	Semboller
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	İkili
	902-928	600	BPSK	40	40	İkili
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16lı Dikgen

Bu standart Avrupa, Japonya, Kanada ve Birleşmiş Milletler düzenlenmiş yönetmeliklere uygundur [2].

3.3.1.2 Kanal Atama ve Numaralandırma

Frekans bandında toplam 0’dan 26’ya kadar numaralandırılan 27 kanal bulunmaktadır. 2450 MHz bandında 16, 915 MHz bandında 10 kanal ve 868 MHz bandında 1 kanal bulunmaktadır. Bu kanalların merkez frekansları aşağıda tanımlanmıştır [1,4].

$$F_c = 868,3 \text{ [MHz]} \rightarrow k=0$$

$$F_c = 906 + 2 \cdot (k-1) \text{ [MHz]} \rightarrow k=1,2,\dots,10$$

$$F_c = 2405 + 5 \cdot (k-11) \text{ [MHz]} \rightarrow k=11,12,\dots,26$$

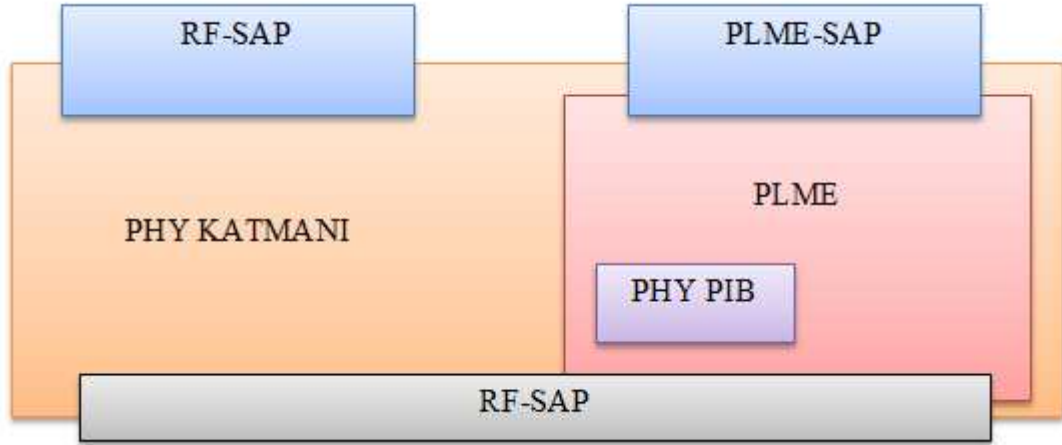
k:kanal numarası

(3.1)

Cihazlar desteklenen her fiziksel katman için, kullanıldığı bölgede izin verilen tüm kanalları desteklemelidir.

3.3.2 PHY Hizmet Özellikleri

PHY, RF yazılımı ve RF donanımı aracılığıyla MAC alt katmanı ve fiziksel radyo kanalı arasındaki arabirimi sağlamakla görevlidir. PHY, PLME yönetim varlığını içerir. Katman yönetim fonksiyonlarını içeren PLME aynı zamanda PHY ile ilgili nesnelerin veri tabanının (PIB) korunmasından sorumludur. Şekil 3.13 PHY' nin bileşenlerini ve arabirimleri gösterir.



Şekil 3.13: PHY Referans Modeli [1]

PHY, PD-SAP' tan erişilen PHY veri hizmeti ve PLME-SAP' tan erişilen PHY yönetim hizmeti olmak üzere iki servis erişim noktasından erişilen 2 hizmeti sağlar.

3.3.2.1 PHY Veri Hizmeti

PD-SAP, aynı düzeyde bulunan 2 MAC alt katman varlığı arasındaki MPDU' nun aktarılmasını destekler. Tablo 3.4' de PD-SAP tarafından desteklenen temel ilkeller listelenmiştir.

PD-SAP ilke	İstek (Request)	Doğrulama (Confirm)	Bildirme (Indication)
PD-DATA	3.2.1.1	3.2.1.2	3.2.1.3

Tablo 3.4: PD-SAP ilkelleri

3.3.2.1.1 PD-DATA.request

PD-DATA.request MAC katmanından PHY varlığına bir MPDU' nun (PSDU) aktarımını destekler.

3.3.2.1.2 PD-DATA.confirm

PD-DATA.confirm MAC katmanından aynı düzeyde başka MAC katmanına gönderilen MPDU' nun (PSDU) aktarım sonucunu bildirir.

3.3.2.1.3 PD-DATA.indication

PD-DATA.indication PHY' den yerel MAC katmanına MPDU' nun (PSDU) aktarımını gösterir.

3.3.2.2 PHY Yönetim Hizmeti

PLME-SAP tarafından desteklenen ilkeller yönetim amaçlı komutların MLME ve PLME arasındaki aktarımını sağlar. Bu ilkeller Tablo 3.5'de listelenmiştir.

PLME-SAP İlkelleri	İstek (Request)	Doğrulama (Confirm)
PLME-CCA	3.2.2.1	3.2.2.2
PLME-ED	3.2.2.3	3.2.2.4
PLME-GET	3.2.2.5	3.2.2.6
PLME-SET-TRX-STATE	3.2.2.7	3.2.2.8
PLME-SET	3.2.2.9	3.2.2.10

Tablo 3.5: PLME-SAP İlkelleri

3.3.2.2.1 PLME-CCA.request

PLME-CCA.request PLME' nin temiz kanal ataması (CCA) uygulamasını için istekte bulunur.

3.3.2.2.2 PLME-CCA.confirm

PLME-CCA.confirm CCA sonucunu raporlar. Toblo 3.6' da PLME-CCA.confirm parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.6: PLME-CCA. confirm parametreleri

Adı	Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
Durum	Numaralama	TRX_OFF, TX_ON, BUSY veya IDLE	CCA isteğinin sonucunu raporlar.

3.3.2.2.3 PLME-ED.request

PLME-ED.request ilkeli PLME' nin enerji sezimi (ED) ölçümünü gerektirmektedir.

3.3.2.2.4 PLME-ED.confirm

PLME-ED.confirm ilkeli enerji sezimi (ED) ölçümünün sonucunu raporlamakla görevlidir. Tablo 3.7' de PLME-ED.confirm parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.7: PLME-ED.confirm parametreleri

Adı	Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
Durum	Numaralama	SUCCESS, TRX_OFF veya ON	Enerji sezimi (ED) ölçümünü isteğinin sonucunu gerçekleştirir.
Enerji Seviyesi	Tam Sayı	0x00-0xff	Güncel kanaldaki enerji sezim (ED) seviyesi

3.3.2.2.5 PLME-GET.request

PLME-GET.request ilkeli belirtilen PHY PIB özelliği hakkında bilgi istemektedir. Tablo 3.8' de PLME-GET.request parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.8: PLME-GET.request parametreleri

Adı	Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
PIBAttribute	Numaralama	Şekil 3.18	PHY PIB niteliğinin kimliğini getirir.

3.3.2.2.6 PLME-GET.confirm

PLME-GET.confirm ilkeli belirtilen PHY PIB özelliği hakkında istenen bilgiyi raporlamakla görevlidir. Tablo 3.9’ da PLME-GET.confirm parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.9: PLME-GET.confirm parametreleri

Adı	Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
Durum	Numaralama	SUCCESS veya UNSUPPORTED_ATTRIBUTE	PHY PIB nitelik bilgisi isteğinin sonucudur.
PIB Niteliği	Numaralama	Özel Nitelik	PHY PIB niteliğinin kimliğini getirir.
PIB Nitelik Değeri	Değişken	Özel Nitelik	PHY PIB niteliğinin gösterdiği değeri getirir.

3.3.2.2.7 PLME- SET-TRX-STATE.request

PLME-SET-TRX-STATE.request ilkeli PHY varlığının alıcı-verici ünitesinin durumunu değiştirmesini gerektirmektedir. Alıcı alıcı-verici ünitesi, alıcı-verici devre dışı, verici aktif veya alıcı aktif olmak üzere 3 ana durumdan birinde olabilir. Tablo 3.10’ da PLME-SET-TRX-STATE.request parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.10: PLME-SET-TRX-STATE.request parametreleri

Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
Numaralama	RX_ON, TRX_OFF, FORCE_TRX_OFF veya TX_ON	Alıcının yapılandırılmış yeni durumudur.

3.3.2.2.8 PLME- SET-TRX-STATE.confirm

PLME-SET-TRX-STATE.confirm ilkeli alıcı-verici ünitenin çalışma durumunu değiştirme isteğinin sonucu raporlar. Tablo 3.11’ de PLME-SET-TRX-STATE.confirm parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.11: PLME-SET-TRX-STATE.confirm parametreleri

Adı	Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
Durum	Numaralama	SUCCESS, RX_ON, TRX_OFF, TRX_ON, BUSY_RX veya BUSY_TX	Alıcının durumundaki değişim isteğinin sonucudur.

3.3.2.2.9 PLME- SET.request

PLME-SET.request ilkeli belirtilen PHY PIB özeliğine verilen değeri atamaya çalışmakla görevlidir. Tablo 3.12’ de PLME-SET.request parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.12: PLME-SET.request parametreleri

Adı	Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
PIB Niteliği	Numaralama	Özel Nitelik	PHY PIB niteliğinin kimliğini ayarlar.
PIB Nitelik Değeri	Değişken	Özel Nitelik	PHY PIB niteliğinin gösterdiği değeri ayarlar.

3.3.2.2.10 PLME- SET.confirm

PLME-SET.confirm ilkeli değiştirilmek istenen PHY PIB özelliğinin son durumunu raporlar. Tablo 3.13’ de PLME-SET.confirm parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.13: PLME-SET.confirm parametreleri

Adı	Tipi	Geçerli Olduğu Aralık	Tanım
Durum	Numaralama	SUCCESS veya UNSUPPORTED_ATTRIBUTE veya INVALID_PARAMETER	PIB niteliğinin isteğini ayarlayan durumdur.
PIB Niteliği	Numaralama	Özel Nitelik	PIB niteliğinin kesinleşen niteliğidir.

3.3.2.3 PHY Numaralandırma Tanımlamaları

Tablo 3.14 PHY numaralandırmalarını tanımlamaktadır.

Tablo 3.14: PHY Numaralandırma Tanımlamaları

Numaralandırma	Değer	Tanım
BUSY	0x00	CCA meşgul kanalı belirlemeye çalışır.
BUSY_RX	0x01	Alıcı verici alma durumundaki değişikliği ister.
BUSY_TX	0x02	Alıcı verici iletim durumundaki değişikliği ister.
FORCE_TRX_OFF	0x03	Alıcı kapatılır.
IDLE	0x04	CCA boş kanalı belirlemeye çalışır.
INVALID_PARAMETER	0x05	Bir SET/GET isteği geçerli aralık dışında parametre gösterir.
RX_ON	0x06	Alıcı verici alıcının desteklenen durumda yapılandırıldığını gösterir.
SUCCESS	0x07	Bir SET/GET, bir enerji sezimi veya alıcı verici durumunun başarılı olduğunu gösterir.
TRX_OFF	0x08	Alıcı verici vericinin desteklenmeyen durumda yapılandırıldığını gösterir.
TX_ON	0x09	Alıcı verici vericinin desteklenen durumda yapılandırıldığını gösterir.
UNSUPPORTED_ATTRIBUTE	0x0a	Bir SET/GET isteği desteklenmeyen bir niteliğin kimliğini gösterir.

3.3.3 PPDU Formatı

Bu bölümde PPDU formatı tanımlanmaktadır. Standartta, sunulan PHY protokol veri birimi (PPDU) paket yapısında en solda yazılan alan (en önemsiz bit) ilk gönderilmeli ve alınmalıdır. Bütün çoklu bayt (octet) alanlarında en düşük anlamlı bayt ve her bayt için en düşük anlamlı bit (LSB) önce gönderilmeli ve alınması gerekmektedir. PHY ve MAC alt katmanları arasındaki veri aktarımı için de aynı şekilde iletim yapılmalıdır.

Tablo 3.15’ de görüldüğü üzere, her bir PPDU paketi aşağıda üç temel bileşen içerir. SHR, alıcı cihazın birlikte zamanlamayı sağlamasını ve bit akımına kilitlenmesini sağlar. PHR, çerçeve uzunluğu bilgisini içerir. Değişken uzunluktaki veri yükü, MAC alt katmanı çerçevesini taşır.

Tablo 3.15: PPDU Yapısı

Oktet: 4	1	1		Değişken
Başlangıç	SFD	Çerçeve Uzunluğu (7 bit)	Ayrılmış (1 bit)	PSDU
SHR		PHR		PHY veri yükü

3.3.3.1 Başlangıç Alanı (Preamble Field)

Başlangıç alanı, alıcı-verici tarafından gelen mesajlarda çip ve sembol senkronizasyonu elde etmek için kullanılır. Başlangıç alanı 32 adet ikili sayıdan oluşur.

3.3.3.2 SFD Alanı (SFD Field)

SFD alanı, başlangıç alanının sonunu ve paket verisinin başlangıcını gösterir ve 8 bit boyutundadır. SFD alanı Tablo 3.16’ da gösterildiği gibi olmalıdır.

Tablo 3.16: SFD Alanı Yapısı

Bit: 0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	1	0	1

3.3.3.3 Çerçeve Uzunluğu Alanı (Frame Length Field)

Çerçeve Uzunluk Alanı, PHY hizmet veri biriminin (PSDU) içerdiği oktetlerin toplam sayısını belirler ve 8 bit boyutundadır. Çerçeve uzunluk alanı değeri 0 ile en büyük PHY paket boyutu ($aMaxPHYSize$) arasında olabilir. Tablo 3.17’ de veri yükünün tipine göre çerçeve uzunluk değeri özetlenmiştir.

Tablo 3.17: Çerçeve Uzunluğu Değerleri [4]

Çerçeve Uzunluk Değeri	Veri Yüğü
0 – 4	Ayrılmış
5	MPDU (Onaylama)
6 – 7	Ayrılmış
8 – En Büyük Paket Boyutu	MPDU

3.3.3.4 PSDU Alanı (PSDU Field)

PHY hizmet veri birimi (PSDU) alanı değişken uzunluğa sahiptir. PSDU alanı PHY paketinin verisini taşımakla görevlidir. Bütün paketler çerçeve uzunluk değeri, 5 oktet veya 7 oktetden büyük olması gerekir. PSDU, MAC alt katmanı çerçevesini (MPDU) içerir.

3.3.4 PHY Sabitleri ve PIB Özellikleri

Bu alt bölümde PHY tarafından gereksinim duyulan sabitler ve özellikler tanımlanmıştır.

3.3.4.1 PHY Sabitleri

PHY katmanının karakteristiklerini belirleyen sabitler Tablo 3.18’ de listelenmiştir. PHY sabitleri donanıma bağlıdır ve işletim esnasında değiştirilemez.

Tablo 3.18: PHY sabitleri

Sabit	Açıklama	Değer
<i>aMaxPHYPacketSize</i>	PHY'nin alabileceği maximum PSDU boyutu (oktet)	127
<i>aTurnaroundTime</i>	RX'den TX e veya TX'den RX'e maximum dönüş süresi	12 sembol periyodu

3.3.4.2 PHY PIB Nitelikleri

PHY PIB, cihazdaki PHY yönetmesini sağlayacak niteliklerden oluşur. Bu niteliklerden her biri sırasıyla PLME-GET.request ve PLME-SET.request ilkeleri kullanılarak okunabilir veya yazılabilir. PHY PIB'in içerdği nitelikler Tablo 3.19'da gösterilmiştir.

Tablo 3.19: PHY PIB Nitelikleri

Özellik	Belirteç	Tip	Arahk	Açıklama
<i>phyCurrentChannel</i>	0x00	Tam sayı	0-26	İletimler ve alımlar için kullanılan RF kanalı
<i>phyChannelsSupported</i>	0x01	Bit alanı		Yüksek anlamlı 5 bit ayrılmıştır ve 0 olmalıdır. Düşük anlamlı 27 bit, 27 geçerli kanalın durumunu gösterir. (1: uygun, 0: uygun değil)
<i>phyTransmitPower</i>	0x02	Bit alanı	0x00 0xBF	2 MSB iletilen gücün toleransını gösterir.
				00= ±1dB
				01=±3dB
				10= ±6dB
				6 LSB işaretli tam sayı 2'ye tümlenmiş biçimde, cihazın desibel cinsinden iletilen gücünü gösterir.
<i>phyCCAMode</i>	0x03	Tam sayı		CCA modu

3.3.5 2450 MHz PHY Tanımlamaları

3.3.5.1 Veri Hızı

IEEE 802.15.4 (2450 MHz) PHY' de 250Kb/s hızında veri aktarımı yapar.

3.3.5.2 Modülasyon ve Yayılma

2450 MHz PHY O-QPSK modülasyon tekniğini kullanır. Fiziksel katman protokol veri birimi (PPDU) 'nun tüm baytları 4 LSB'si (b_0, b_1, b_2, b_3) bir veri sembolü ve 4 MSB'si (b_4, b_5, b_6, b_7) bir sonraki veri sembolü ile eşlenir. Her bir veri sembolü IEEE 802.15.4 standardında tanımlanan 32 bit chip sözde rasgele gürültü dizisi (PN Chip Sequences)

ile eşlenerek chip dizileri elde edilir. Chip dizileri yarım dalga sinüs darbe şeklini içeren O-QPSK modülasyonu kullanılarak taşıyıcı üstüne modüle edilmesi sağlanır.

3.3.5.2.1 Referans Modülatör Diyagramı

Şekil 3.14’ de gösterilen fonksiyonel blok diyagramı 2450 MHz PHY modülasyon ve yayılma fonksiyonları için kullanılır. Her blok fonksiyonu tanımlayan alt birimlere gönderme yapmaktadır.



Şekil 3.14: Modülasyon ve Yayılma fonksiyonları

3.3.5.2.2 Bit – Sembol Eşlenmesi

PHY Protokol Veri Birimi’nin tüm ikili bitleri şekil 3.19’da gösterilen modülasyon ve yayılma fonksiyonları kullanılarak kodlanır.

Her bir baytın en düşük anlamlı bitleri (4 LSB’ si (b_0, b_1, b_2, b_3)) bir veri sembolü ile ve sonraki en anlamlı bitleri (4 MSB’ si (b_4, b_5, b_6, b_7)) bir sonraki veri sembolü ile eşlenir. PPDU’ nun her bir baytı modülasyon ve yayılma fonksiyonları ile aynı işleme tabi tutularak veri sembolleri ile eşlenir. İşlem, sıralı olarak senkronizasyon başlığının ilk alanı başlangıç alanı ile başlar ve PSDU’ nun son baytı ile biter. Bayt içindeki en düşük anlamlı sembol (b_0, b_1, b_2, b_3) önce işlenmektedir.

3.3.5.2.3 Sembol – Chip Eşlemesi

Her bir veri sembolü, Tablo 3.20’ de gösterilen 32 – chip sözde-rasgele gürültü dizisi (PN sequences) ile eşlenir. Sözde-rasgele gürültü dizileri içindeki en düşük anlamlı chip (c_0) önce gönderilir.

Tablo 3.20: Sembol – Chip eşlemesi [1]

Sembol (Onlu)	Sembol (İkili) (b_0, b_1, b_2, b_3)	Chip Değerleri ($c_0, c_1, \dots, c_{30}, c_{31}$)
0	0 0 0 0	1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
1	1 0 0 0	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0
2	0 1 0 0	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0
3	1 1 0 0	0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
4	0 0 1 0	0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1
5	1 0 1 0	0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 0 0
6	0 1 1 0	1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1
7	1 1 1 0	1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1
8	0 0 0 1	1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
9	1 0 0 1	1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1
10	0 1 0 1	0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1
11	1 1 0 1	0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0
12	0 0 1 1	0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
13	1 0 1 1	0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1
14	0 1 1 1	1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0
15	1 1 1 1	1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0

3.3.5.2.3.1 Sözde Rasgele Gürültü Dizileri (PN Sequences)

Sözde rasgele gürültü dizileri(PRBS, Pseudo Random Binary Sequences) olarak da bilinen sözde rasgele ikili dizileri (PN, Pseudo Noise), doğrusal geri beslemeli kayan yazmaç (LFSR, Linear Feedback Shift Register) dizileri ve en fazla uzunluklu ikili dizileri (m Sequences) dijital iletişimde yaygın olarak kullanılır. Gerçekte rasgele dizilerdeki bit örnekleri asla tekrarlamaz. Ancak, bu tür dizilerin üretimi zordur ve daha önemlisi bu tür diziler pratik sistemlerde az kullanılır. Uygulamalar verinin kanalda rasgele ama aynı zamanda kullanıcı tarafından tahmin edilebilir olmasını isterler. Bu durum PRBS kullanışlı hale getirir. Bir sözde rasgele ikili dizisi yarı rasgele dizi olarak algılanır yani dizi uzunluğu, rasgele ihtiyaçların karşılanması dizide rasgele gözükür. Ama tüm dizi belirsiz olarak tekrarlar. Bir gözlemciye dizi tümüyle rastgele görünebilir, buna rağmen dizi üretilirken dizi özelliklerini farkında olan bir kullanıcı tamamıyla rastgele olmadığını bilir. PN dizileri çeşitli uygulamalar için ilgi çekici özelliklere sahiptir. İki benzer PN dizisi iyi bir otokorelasyona sahip olduğundan dolayı, hatta bunlardan biri bozulmuş olsa bile kolayca fazlı senkronize olabilir. Bir PN dizisi dijital sinyalin rasgele özelliklerini simule edilebilir ve kolayca üretilebilir olduğundan ideal bir test sinyalidir. PN üreticisi rasgele gibi görünen PN dizisini üretir. PN dizileri:

1. Bir başlangıç değeri kullanılarak üretilir.
2. Dizi istatistiksel olarak rasgele değildir ancak bir çok rasgelelik testinden geçer.
3. Diziler sözde rasgele sayı veya sözde rasgele dizi olarak adlandırılır.
4. Algoritma ve başlangıç değeri bilindiği halde diziyi tahmin etmek zordur.

Bir ikili PN dizisi 1 ve 0 ' dan oluşur. Bir dizi, PN dizisi olabilmek için bazı özellikleri sağlaması gerekir. Bu özellikler dijital iletişim, aletler ve ölçümlerde kullanılır. PN Dizisi iletişim kanallarının ve sistemlerin analizi, optimizasyon ve performans ölçümü için bilinen rasgele özelliklere sahip bir referans model olarak hizmet vermektedir.

Bir PN dizisi aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

1. Rastgelelik

- Uniform dağılıma sahip olmalıdır.
 - o İkili dizilerde 1'lerin sayısı ve 0'ların sayısı arasında denge olmalıdır. Buna göre dizide bulunan 1'lerin sayısı dizinin toplam uzunluğunun yarısı kadar olmalıdır. Örneğin Bir PN dizisinin uzunluğu 15 ise dizi 8 tane 1 ve 7 tane 0'dan oluşmalıdır.
 - o Koşma özelliği (run property): Bir PN dizisinde 1'lerin sayısı ve 0'ların sayısı farklılık göstermektedir. Genellikle 1'lerin sayısı 0'ların sayısından 1 fazla olmalıdır. Dizide ard arda gelen 1 veya 0'lar koşma olarak adlandırılırlar ve 1'lerin sayısı ve 0'ların sayısı koşma uzunluğu olarak tanımlanır. 2^N-1 uzunluğundaki bir PN dizisi koşmada N tane 1'lerin koşması ve N-1 tane 0'ların koşmasını içerir. Daha sonra N-2 tane 1'lerin ve N-2 tane 0'ların koşmasını içerir. Tablo da 2^N-1 uzunluğundaki bir PN dizisinin çalışma durumları verilmiştir.

Tablo 3.21: 2^N-1 Uzunluğundaki PN Dizisinin Çalışma Durumları

Koşma Uzunluğu	1'ler	0'lar
N	1	0
N-1	0	1
N-2	1	1
N-3	2	2
N-4	4	4
...	...	...
...	...	...
2	2^{N-4}	2^{N-4}
1	2^{N-3}	2^{N-3}

2. Bağımsızlık

3. Korelasyon özelliği: Korelasyon iki dizi arasındaki benzerlik ölçüsüdür. Eğer iki dizi kıyaslandığında diziler farklı ise çapraz korelasyon (crosscorrelation) aynı olduğu zaman otokorelasyon (autocorrelation) olarak adlandırılır. Korelasyonda dizinin bir süre periyodu süresince dizi terim terim (ikil ise bit bit) kaydırılır. Her iki terim aynı terimse Aynı Terimler' in sayısı bir arttırılır. Her iki terim farklı terimse Farklı Terimler' in sayısı bir arttırılır. 'Aynı Terimler' ve 'Farklı Terimler' arasında aşağıdaki bağıntı bulunmalıdır.

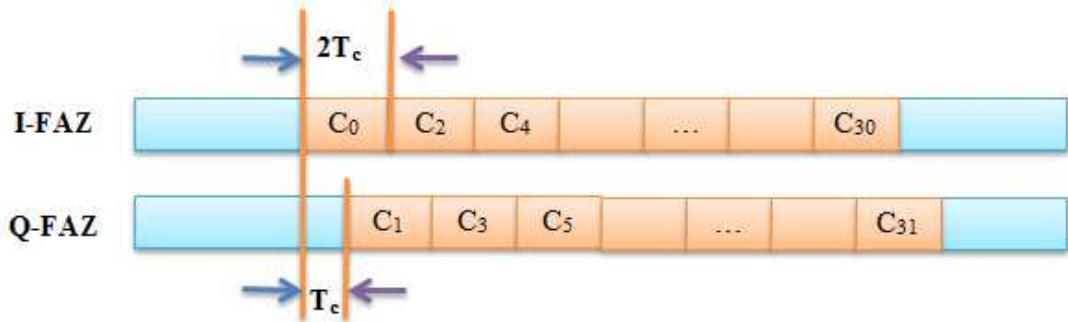
$$|Aynı Terimler - Farklı Terimler| \leq 1 \quad (3.2)$$

4. Tahmin edilemez.

3.3.5.2.4 O-QPSK Modülasyonu ve Darbe Şekli

Her veri sembolünü eşleştirilen chip dizileri, yarım dalga sinüs darbe şeklini içeren O-QPSK modülasyon tekniğini kullanılarak taşıyıcı üstüne modüle edilir. Şekil 3.15'de görüldüğü üzere Çift-indeksli chipler I-faz taşıyıcısı üstüne ve tek-indeksli chipler Q-faz taşıyıcısı üstüne eklenir.

Veri sembolleri 32 chip dizisi ile gösterilir. Chip hızı (nominal 2,0Mchip/sn) sembol hızının 32 katıdır. I-faz ve Q-faz chip modülasyonu arasındaki kayma biçimi, Q-faz chipleri I-faz chiplerinden T_c kadar gecikmelidir, burada T_c chip hızının tersini gösterir [1,4].



Şekil 3.15: O-QPSK Chip Kaymaları

Temel band chip işaretini temsil eden yarım-sinüs darbe şekli verilen denklem ile tanımlanır.

$$p(t) = \begin{cases} \sin(\pi \frac{t}{2T_c}), 0 \leq t \leq 2T_c \\ 0, \text{diğer} \end{cases}$$

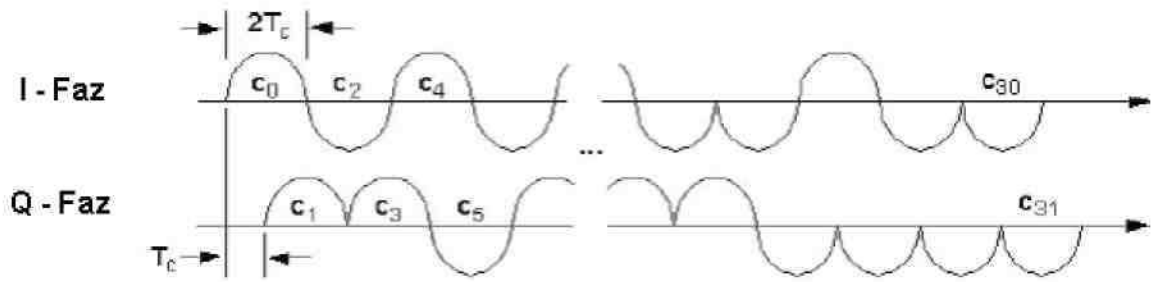
(3.3) [4]

Her sembol periyodu iletimi esnasında en az anlamlı chip (c_0) ilk önce ve en anlamlı bit (c_{31}) en son iletilir.

3.3.5.3 2450 MHz Bandı Radyo Tanımlamaları

2450MHz bandında işletilen cihazlar alt bölümlerde sınırlamaları gerçekleştirmek zorundadır.

Şekil 3.16 örnek bir temel band chip dizisini yarım-sinüs darbe şekli ile gösterir.



Şekil 3.16: Darbe Şekli İle Temel Band Chip Dizisi [4].

3.3.5.3.1 İzgesel Güç Yoğunluğu

İletilen izgesel bileşenler, Tablo 3.21' de belirtilen sınır değerlerden daha az olmalıdır. Ortalama izgesel güç 100kHz çözünürlüklü band genişliği kullanılarak ölçülen bağıl ve kesin limitler -20 dB ve -30 dBm arasında değerler almalıdır. Bağıl limitde referans düzeyi belirlenirken taşıyıcı frekansın $+ / - 1$ MHz içinde en yüksek ortalama izgesel güç değerlendirilmelidir.

Tablo 3.22: İzgesel Güç Yoğunluğu Sınırları

Frekans	Bağıl Limit	Kesin Limit
$ f - f_c > 3.5 \text{ MHz}$	-20 dB	-30 dBm

2450 Mhz PHY de sembol hızı 62,5 ksymbol/s $\pm$ 40ppm değerler arasında olmalıdır.

3.3.5.3.2 Alıcı Duyarlılığı

Tablo 3.22’de belirtilen durumlara uyumlu cihazların -85dBm veya daha iyi duyarlılığı sağlayabilme yeteneği olmalıdır.

Tablo 3.23: Alıcı Duyarlılığı Tanımları

Terim	Terimin tanım	Durumlar
Paket hata oranı (PER)	Paketlerin doğru şekilde tespit edilemeyen bölüm ortalaması	- Ortalama ölçümler rasgele PSDU verisi üzerinden yapılır
Alıcı duyarlılığı	Giriş işaret gücü eşiği	- PSDU uzunluğu = 20 bayt - PER < %1 - Güç ölçümü antende - Karışma mevcut değil

3.3.5.3.3 Alıcı Frekans Bozulma Direnci

Minimum frekans bozulma direnci düzeyi Tablo 3.23’ de verilmiştir. Bitişik kanal kullanılmak istenen frekansa en yakın frekansları kullanan kanalların her iki yanındaki kanala denir. Diğer kanallar bitişik kanalın yanlarında ki alternatif kanallardır. Örneğin 13 kanal kullanılmak isteniyorsa, 12 ve 14. kanallar bitişik kanallar ve 11 ile 15. kanallar diğer kanallardır.

Tablo 3.24: 2450 MHz PHY’de en az alıcı frekans bozulma direnci gereksinimleri

Bitişik kanal ayrımı	Alternatif kanal ayrımı
0 dB	30 dB

3.3.6 Genel Radyo Tanımlamaları

2450 MHz PHY ve 868/915 MHz PHY’ de Tx’den Rx ‘e dönüş zamanı *aTurnaroundTime* dönüş zamanından düşük olmalıdır. Rx’den Tx ‘e dönüş zamanı *aTurnaroundTime* dönüş zamanından düşük olmalıdır.

3.3.6.1 Bağlantı Kalite Bildirimi (LQI)

Bağlantı Kalite Bildirimi alınan paketin niteliğinin ve gücünün ölçümüdür. Ölçüm alıcıda enerji sezimi (ED) kullanılması, Sinyal Gürültü Oranı(SNR) tahmini veya her iki metodun kombinasyonu kullanılarak elde edilebilir. Ağ ve uygulama katmanlarında bağlantı kalite bildirimi sonucunun uygulanması bu standardın dışındadır [1,4].

3.3.6.2 Temiz Kanal Ataması

IEEE 802.15.4 PHY katmanı aşağıda listelenen 3 metottan en az birine göre temiz kanal ataması (CCA) uygulayabilme yeteneğine sahiptir [1,4].

1. CCA Mod 1: Eşik değeri üstünde enerji. Belirlenen eşik enerjisi üstünde enerji tespiti yapıldığı müddetçe kanal meşgul olarak değerlendirilir.
2. CCA Mod 2: Sadece taşıyıcı sezimi. IEEE 802.15.4 standardına uygun sinyal tespit edildiği müddetçe kanal meşgul olarak değerlendirilir. Bu sinyal eşik enerji değerinin üstünde veya altında olabilir.
3. CCA Mod 3: Taşıyıcı sezimi ile eşik değeri üstünde enerji: IEEE 802.15.4 standardına uygun sinyal tespit edildiğinde ve enerji eşik değerin üstünde ise kanal meşgul olarak değerlendirilir.

CCA tespit zamanı 8 sembol periyoduna eşit olmalıdır. Her hangi CCA modu için, PPDU alımı sırasında PHY tarafından “PLME-CCA.request” ilkeli alınırsa, kanal meşgul olarak değerlendirilir. PPDU alımı sırasında SFD’ nin tespitini takiben PHR’ de belirtilmiş sayıda baytın alınacağı da göz önünde bulundurulmalıdır.

3.4 IEEE 802.15.4 MAC ALT KATMANI ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde IEEE 802.15.4 standardının MAC alt katmanı tanımlanacaktır. MAC alt katmanı fiziksel radyo kanalına erişimden ve aşağıda listelenen görevlerden sorumludur:

1. Cihaz koordinatör ise ağın beacon çerçevesini üretmek
2. Beacon çerçevelerinin senkronize etmek
3. PAN' na bağlanma ve ayrılmayı desteklemek
4. Cihaz güvenliği desteklemek
5. Kanal erişimi için CSMA-CA mekanizmasını işletmek
6. GTS mekanizmasının işletilmesi ve korunması
7. 2 MAC varlığı arasındaki güvenilir bağlantıyı sağlamak.

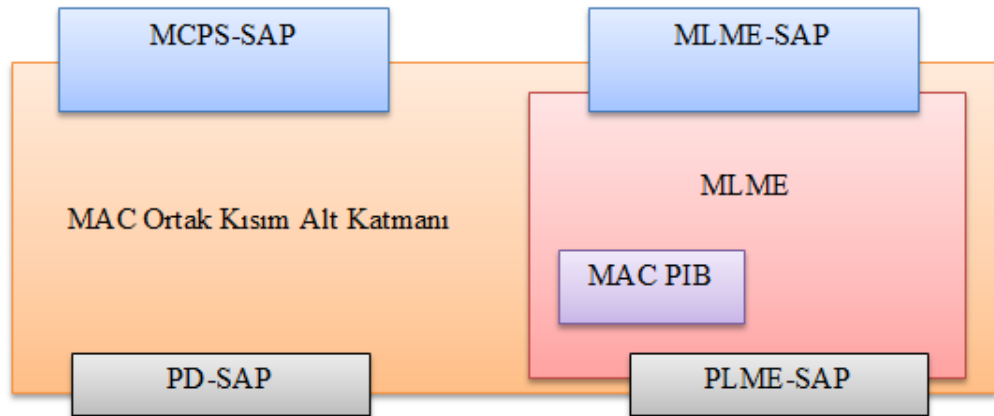
MAC alt katmanı tarafından belirlenen sabitler ve özellikler bu bölümde italik yazılmıştır. Sabitler genel olarak “*a*” ön ekine, özellikler genellikle “*mac*” ön ekine sahiptir (örneğin, *aMaxFrameRetries*).

3.4.1 MAC Alt Katmanı Hizmet Özellikleri

MAC alt katmanı SSCS ve PHY arasındaki ara yüzü sağlar. MAC alt katmanı MLME adı ile anılan yönetim varlığını içerir. MLME aşağıda listelenen görevlerden sorumludur:

1. Katman yönetim fonksiyonlarını işletmek
2. MAC alt katmanı ile ilgili yönetilen nesnelerin veri tabanını korumak

Yukarıda değinilen veri tabanı MAC alt katmanı PIB değerleridir. Şekil 3.17’ de MAC alt katmanının bileşenleri ve ara yüzleri gösterilmiştir.



Şekil 3.17: MAC Alt Katmanı Referans Modeli

MAC alt katmanı 2 SAP üzerinden erişilen 2 hizmeti sağlar. MAC veri hizmeti, MCPS - SAP üzerinden erişilir. MAC yönetim hizmeti, MLME - SAP üzerinden erişilir.

MAC alt katmanın iki hizmeti, PD-SAP ve PLME-SAP üzerinden SSCS ve PHY arasındaki ara yüzü sağlamaktadır. Katmanda, MLME ve MCPS arasında da MLME'nin MAC veri hizmetini kullanmasına izin veren ek ara yüzey bulunur.

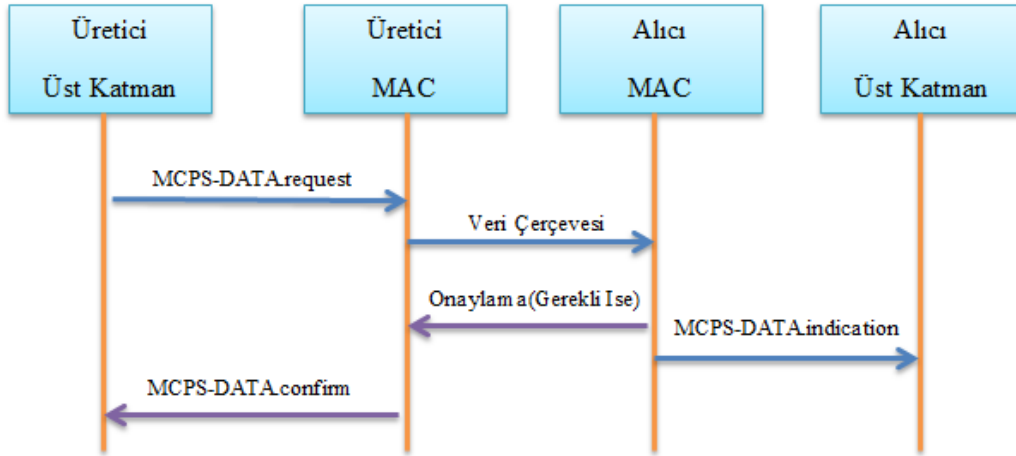
3.4.1.1 MAC Veri Hizmeti

MCPS-SAP, aynı düzeyde bulunan SSCS varlıkları arasında SSCS protokol veri birimlerinin (SPDU) aktarımını sağlar. Tablo 3.24' de MCPS-SAP tarafından desteklenen ilkeler ile işaretlenmiştir. Belirtilen ilkelerden (♦) ile işaretlenenler RFD'ler için zorunlu değildir.

Tablo 3.25: MCPS-SAP ilkeleri

MCPS-SAP ilke	İstek (Request)	Doğrulama (Confirm)	Bildirme (Indication)
MCPS – DATA	4.1.1.1	4.1.1.2	4.1.1.3
MCPS – PURGE	4.1.1.4 ♦	4.1.1.5 ♦	---

MCPS-SAP ilkeleri için cihazlar ara yüzeyi sağlamalıdır. Şekil 3.18' de başarılı veri aktarımı için gerekli mesajlaşma sırası gösterilmiştir.



Şekil 3.18: MAC Veri Hizmeti İçin Mesaj Sırası

3.4.1.1.1 MCPS-DATA.request

MCPS-DATA.request ilkeli bir yerel SSCS varlığı ile eş düzey tekil SSCS varlığı arasında veri transferini talep eder.

3.4.1.1.2 MCPS-DATA.confirm

MCPS-DATA.confirm ilkeli bir yerel SSCS varlığı ile eş düzey tekil SSCS varlığı arasında veri SPDU (MSDU) transferi sonucunu raporlar.

3.4.1.1.3 MCPS-DATA.indication

MCPS-DATA.indication ilkeli MAC alt katmanından yerel SSCS varlığına veri SPDU(MSDU) transferini gösterir.

3.4.1.1.4 MCPS-PURGE.request

MCPS-PURGE.request ilkeli bir üst katmandan MSDU'yu iş sırasından ayıklamasına izin verir.

3.4.1.1.5 MCPS-PURGE.confirm

MCPS-PURGE.confirm ilkeli MAC alt katmanına MSDU'nun iş sırasından ayıklanma isteğinin başarılı olup olmadığını bildirmesine izin verir.

3.4.1.2 MAC Yönetim Hizmeti

MLME-SAP, üst katmanlar ile MLME arasındaki yönetim fonksiyonlarını işletir. Tablo 3.25’ de MLME-SAP ara yüzeyi üzerinden MLME tarafından desteklenen ilkeller gösterilmiştir. Mevcut ilkeller (■) ile belirtilmiştir. Belirtilen ilkellerden (◆) ile işaretlenenler RFD’ ler için zorunlu değildir.

Tablo 3.26: MLME-SAP üzerinden erişilebilen ilkeller [4].

MLME-SAP ilkei	İstek (Request)	Bildirme (Indication)	Cevap (Response)	Doğrulama (Confirm)
MLME-ASSOCIATE	■	■ ◆	■ ◆	■
MLME-DISASSOCIATE	■	■		
MLME-BEACON-NOTIFY		■		
MLME-GET	■			■
MLME-GTS	■ ◆	■ ◆		■ ◆
MLME-ORPHAN		■ ◆	■ ◆	
MLME-RESET	■			■
MLME-RX-ENABLE	■			■
MLME-SCAN	■			■
MLME-COMM-STATUS		■		
MLME-SET	■			■
MLME-START	■ ◆			■ ◆
MLME-SYNC	■			
MLME-SYNC-LOSS		■		
MLME-POLL	■			■

3.4.1.2.1 Bağlanma ilkelleri (MLME-ASSOCIATE)

Bir cihazın PAN' a nasıl bağlanacağını tanımlayan ilkelerdir. Bunlar:

1. **MLME-ASSOCIATE.request** cihazın koordinatöre bağlanma isteğini talep eder.
2. **MLME-ASSOCIATE.indication** ilkeli bağlantı istek talebini belirtmek için kullanılır.
3. **MLME-ASSOCIATE.response** ilkeli MLME-ASSOCIATE.indication ilkeline bağlantıyı başlatarak yanıt vermek için kullanılır.
4. **MLME-ASSOCIATE.confirm** ilkeli bir üst katmanda başlayan cihaz bağlantısının başarılı-başarısız olup olmadığını doğrulamak için kullanılır.

3.4.1.2.2 Ayrılma ilkelleri (MLME-DISASSOCIATE)

Bir cihazın PAN' dan nasıl ayrılacağını tanımlayan ilkelerdir. Bunlar:

1. **MLME-DISASSOCIATE.request** ilkeli PAN 'a bağlanmış cihazın PAN'dan ayrılma talebini koordinatöre bildirmek için kullanılır.
2. **MLME-DISASSOCIATE.indication** ilkeli bağlantı ayrılma istek talebini belirtmek için kullanılır.
3. **MLME-DISASSOCIATE.confirm** ilkeli MLME-DISASSOCIATE.request ilkeli ilkelinin sonuçlarını raporlamak için kullanılır.

3.4.1.2.3 Beacon bildirme ilkeli (MLME-BEACON-NOTIFY)

Çalışma esnasından beacon çerçevesi alındığında kullanılan ilkedir.

1. **MLME-BEACON-NOTIFY.indication** bir üst katmana MAC alt katmanı tarafından alınan beacon çerçevesini içeren parametreleri göndermek için kullanılır. Ayrıca bu ilkel LQ ve beacon çerçevesinin alınma zamanını ölçmek için kullanılır.

3.4.1.2.4 PIB Özelliklerinin Okunması İlkelleri (MLME-GET)

PIB değerlerinin nasıl okunmasını tanımlayan ilkelerdir.

1. **MLME-GET.request** ilkeli PIB değerleri hakkında bilgi talep eder.
2. **MLME-GET.confirm** MAC PIB'e ait isteklerin sonuçları hakkında bilgi rapor eder.

3.4.1.2.5 GTS yönetim ilkeleri (MLME-GTS)

GTS yönetim ilkeleri (MLME-GTS) GTS' lerin nasıl talep edileceğini ve nasıl korunacağını tanımlayan ilkelerdir. Cihazlar bu ilkeleri kullanmak isterler. Ayrıca genellikle GTS onların PAN koordinatörlerinin işaretlerini (beacon) izleyebilir.

1. **MLME-GTS.request** ilkeli PAN koordinatörünün yeni bir GTS'nin yerleştirmesi yada var olan GTS'nin çıkarılması için istekte bulunur.
2. **MLME-GTS.confirm** ilkeli yeni bir GTS'nin yerleştirmesi yada var olan GTS'nin çıkarılması hakkındaki isteğin sonuçlarını raporlar.
3. **MLME-GTS.indication** ilkeli yeni bir GTS'nin yerleştirmesi yada daha önceden yerleştirilmiş GTS'nin çıkarılmasını gösterir.

3.4.1.2.6 Yetim bildirimi ilkeleri (MLME-ORPHAN)

Yetim bildirimi ilkeleri (MLME-ORPHAN) koordinatöre yetim (hiçbir ağa bağlanmamış) cihazların bildirimi için kullanılan ilkelerdir. Bunlar:

1. **MLME-ORPHAN.indication** ilkeli koordinatörün MLME varlığına bir sonraki katmanda yetim bir cihazın varlığını bildirmek için kullanılır.
2. **MLME-ORPHAN.response** ilkeli bir üst katmandaki koordinatöre MLME-ORPHAN.indication ilkelinin cevabını bildirmek için kullanılır.

3.4.1.2.7 MAC alt katmanını yeniden başlatma ilkeleri (MLME-RESET)

MAC alt katmanını yeniden başlatma ilkeleri (MLME-RESET) MAC alt katmanını varsayılan değerlere döndürerek ayarlamak için tanımlanan ilkelerdir. Bütün cihazlar yeniden başlatma ilkelerinin ara yüzlerini bulundurlar.

1. **MLME-RESET.request** ilkeli MLME'nin yeniden başlatma talebinin uygulaması için istekte bulunur.

2. **MLME-RESET.confirm** ilkeli yeniden başlatma işleminin sonuçlarını raporlar.

3.4.1.2.8 Alıcı aktifleşme zamanı tanımlayan ilkeller (MLME-RX-ENABLE)

Alıcı aktifleşme zamanı tanımlayan ilkeller (MLME-RX-ENABLE) verilen zamanda alıcının açılmasını veya kapatılmasını sağlayan ilkelerdir. Bütün cihazlar alıcının açılması veya kapatılmasını tanımlayan ilkelerin ara yüzünü tanımlamaları gerekmektedir.

1. **MLME-RX-ENABLE.request** ilkeli bir üst katmana alıcının verilen zaman periyodunda açılması için istekte bulunur.
2. **MLME-RX-ENABLE.confirm** ilkeli alıcının açılması işleminin sonuçlarını raporlar.

3.4.1.2.9 Kanal tarama ilkelleri (MLME-SCAN)

Kanal tarama ilkelleri (MLME-SCAN) PAN iletişim kanalında ki enerjiyi belirlemek için kullanılan ilkelerdir. Burada enerjinin PAN iletişim kanalında enerji kullanımı da belirlenir. Bütün cihazlar kanala tarama ilkellerinin ara yüzlerini tanımlamaları gerekmektedir.

1. **MLME-SCAN.request** ilkeli belirli bir kanal listesi üzerinde tarama başlatmak için kullanılır. Bir cihaz kanal üzerinde enerji ölçümü için kanal taramasını kullanabilir. Ayrıca cihazın bağlantılı olduğu koordinatörü veya POS dâhilindeki tarama cihazıyla beacon çerçevesi ileten bütün koordinatörleri arar.
2. **MLME-SCAN.confirm** ilkeli kanal tarama talebinin sonucunu raporlar.

3.4.1.2.10 İletişim durumu ilkeli (MLME-COMM-STATUS)

İletişim durumu ilkeli (MLME-COMM-STATUS) iletim durumu hakkında MLME ile üst katmanların iletim her hangi bir istek ilkeli ile başlatılmamışsa ve gelen paketlerde güvenlik hataları varsa nasıl haberleşeceğini tanımlayan ilkelerdir.

1. **MLME-COMM-STATUS.indication** ilkeli MLME'ye iletişim durumlarını göstermek için izin verir.

3.4.1.2.11 PIB özelliklerinin yazılması ilkelleri (MLME-SET)

MLME-SAP kurulum ilkelleri MAC PIB özelliklerinin nasıl yazılabileceğini tanımlar. Bütün cihazlar kurulum ilkellerine ara yüz sağlamalıdır.

1. **MLME-SET.request** ilkeli verilen değeri gösterilen MAC PIB özelliğine yazar.
2. **MLME-SET.confirm** ilkeli MAC PIB özelliğine değer yazma işleminin sonuçlarını raporlar.

3.4.1.2.12 Süper çerçeve Konfigürasyonu Güncelleyen ilkeller (MLME-START)

Süper çerçeve konfigürasyonunu güncelleyen ilkeller (MLME-START) bir FFD' nin PAN' ı başlatabilmek için yeni süper çerçeve yapısı oluşturmasını sağlar. Böylece bu ilkeller var olan PAN' da beacon iletimini başlatırlar.

1. **MLME-START.request** ilkeli yeni bir süper çerçeve konfigürasyonu kullanımına başlamak için talepte bulunur.
2. **MLME-START.confirm** ilkeli yeni bir süper çerçeve konfigürasyonu kullanımına başlama işleminin sonuçlarını raporlar.

3.4.1.2.13 Koordinatör ile Senkronizasyon Çalışma İlkelleri (MLME-SYNC, MLME-SYNC-LOSS)

MLME-SAP senkronizasyon ilkelleri koordinatörle senkronizasyonun nasıl başlanılabileceğini ve senkronizasyonun kaybının bir üst katmana nasıl ileteceğini tanımlar.

1. **MLME-SYNC.request** ilkeli koordinatörle senkronizasyonu sağlayarak belirtilmişse işaretleri izlemeyi talep eder.
2. **MLME-SYNC-LOSS.indication** koordinatörle senkronizasyonun kaybını gösterir.

3.4.1.2.13 Koordinatörden Veri İsteme İlkeleri (MLME-POLL)

MLME-SAP polling ilkeleri koordinatöre nasıl veri talep edileceğini tanımlar. Bütün cihazlar polling ilkelerine ara yüz sağlamalıdır.

1. **MLME-POLL.request** ilkeli koordinatörden veri talep etmesi için cihaza yönlendirir.
2. **MLME-POLL.confirm** ilkeli koordinatörde veri olup olmadığını kontrol etmek için taleplerin sonuçlarını raporlar.

3.4.2 MAC Çerçeve Yapıları

Bu alt bölümde MAC çerçevesinin (MPDU) formatı anlatılacaktır. Her bir MAC çerçevesi aşağıda belirtilen temel alanlardan oluşur.

1. MHR alanı; çerçeve kontrol, dizi numarası ve adres bilgilerini kapsar.
2. MAC veri yükü; çerçeve tipine özel değişken uzunluktaki bilgileri içerir. Onay çerçeveleri veri yükü içermez.
3. MFR alanı; FCS alanını içerir.

MAC alt katmanında çerçeveler, özel bir sırada bulunan alanların dizisidir. Soldan sağa, en soldaki en düşük anlamlı bit ilk önce gönderilir. Her bir alan k bit uzunluğundadır ve içindeki bitler 0' dan (en sol ve en düşük anlamlı) $k-1$ e (en sağ ve en yüksek anlamlı) kadar numaralandırılır. Eğer alan sekiz bitten daha fazla bit uzunluğuna sahipse, baytın içerdiği en düşük numaralı (en düşük anlamlı) bitten en yüksek numaralı bite (en yüksek anlamlı) doğru sırayla PHY' ye gönderilir.

3.4.2.1 Genel MAC Çerçeve Yapısı

MAC çerçevesi MHR, MAC veri yükü ve MFR alanları bileşiminden oluşur. Adres alanının bütün çerçevelerde bulunmaması nedeniyle MHR kısmı tüm çerçevelerde sabit değildir. Genel MAC çerçeve yapısı Tablo 3.26' da gösterilmiştir.

Tablo 3.27: Genel MAC Çerçeve Yapısı [1]

Oktet:2	1	0 / 2	0 / 2 / 8	0 / 2	0 / 2 / 8	Değişken	2
Çerçeve	Dizi numarası	Varış	Varış Adresi	Kaynak	Kaynak Adresi	Çerçeve Yüğü	Çerçeve
Kontrol		PAN		PAN			Kontrol
Alanı		Belirteci		Belirteci			Dizisi
Adres Alanları							
MHR						MAC Veri Yüğü	MFR

3.4.2.1.1 Çerçeve Kontrol Alanı

Çerçeve kontrol alanı (frame control field) çerçeve tipi, adresleme alanları ve diğer kontrol bayraklarını tanımlayan bilgiyi içerir. Bu alan 16 bit uzunluğundadır.

3.4.2.1.2 Dizi Numarası Alanı

Dizi numarası alanı (sequence number fields) çerçeve için tekil dizi kimliğini belirler. Bu alan 8 bit uzunluğundadır.

Beacon çerçevesi için bu alan beacon dizi numarasını (BSN) gösterir. Her koordinatör güncel BSN değerini MAC PIB içinde *macBSN* özelliğinde depolar ve rasgele değer ile başlatır. Rasgele sayının oluşturulması standardın kapsamı dışındadır. Koordinatör *macBSN* özelliği içindeki değerini beacon çerçevesi üretildiği zaman çerçeve içindeki dizi numarası alınan kopyalamalı ve *macBSN* değerini bir arttırmalıdır.

Veri, onay ve MAC komut çerçeveleri için bu alan veri dizi numarasını (DSN) belirler. Bu alt alan, veri veya MAC komut çerçevelerinin onay çerçeveleri ile eşleştirilmesi için kullanılır. Haberleşmek isteyen her cihaz DSN' yi sağlamalıdır. Her bir cihaz DNS değerini MAC PIB içinde *macDSN* özelliğinde depolar ve onu rasgele sayı ile başlatır. Rasgele sayının oluşturulması standardın kapsamı dışındadır. Cihaz, her bir veri veya MAC komut çerçevesi ürettiğinde *macDSN* değerini dizi numarası alanına kopyalamalıdır ve değerini bir arttırmalıdır.

Eğer onay istenmişse, alıcı cihaz alınan veri veya MAC komut çerçevesindeki DSN' yi uygun onay çerçevesi içindeki DSN alanına kopyalamalıdır. Eğer onay

macAckWaitDuration sembol süresi sonuna kadar alınmamışsa, gönderici cihaz çerçeveyi aynı DSN numarası ile birlikte tekrar yollamalıdır.

3.4.2.1.3 Hedef PAN Belirteci Alanı

Varış PAN belirteci alanı (destination PAN identifier field), 16 bit uzunluğundadır ve çerçeve alıcının tekil PAN kimliğini belirler. Bu alanın (0xffff) değerinde olması kanalı dinleyen tüm cihazlar için geçerli kabul edilir ve yayımlanan çerçeve kanalı dinleyen tüm cihazlar tarafından kabul edilir.

Bu alan sadece çerçeve kontrol alanı içindeki adres modu alt alanı sıfır değilse MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

3.4.2.1.4 Hedef Adresi Alanı

Varış adresi alanı (destination address field), çerçeve kontrol alanının varış adresleme modu alt alanı içindeki değere göre 16 bit veya 64 bit boyutundadır ve çerçeveyi alması istenen cihazın adresini belirtir. Bu alanın (0xffff) değerinde olması genel kısa adresin yayımını gösterir ve kanalı dinleyen her cihaz için geçerli bir kısa adres değeri olarak kabul edilir.

Bu alan sadece çerçeve kontrol alanı içindeki adres modu alanı sıfır değilse MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

3.4.2.1.5 Kaynak PAN Belirteci Alanı

Kaynak PAN belirteci alanı (source PAN identifier field), 16 bit uzunluğundadır ve çerçeve vericisinin tekil PAN kimliğini belirler. Bu alan sadece kaynak adres modu alt alanı sıfır dışı bir değere ve İç-Pan alt alanı sıfır değerine sahip ise MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

3.4.2.1.6 Kaynak Adres Alanı

Kaynak adres alanı (source address field), çerçeve kontrol alanındaki kaynak adresleme modu alt alanı içindeki değere göre 16 bit veya 64 bit boyutundadır ve çerçeveyi gönderen cihazın adresini belirtir. Bu alan sadece çerçeve kontrol alanının kaynak adres modu alt alanı içindeki değer sıfır değilse MAC çerçevesi içinde bulunmalıdır.

3.4.2.1.7 Çerçeve Veri Alanı

Çerçeve veri alanı (frame payload field), değişik çerçeve tiplerine göre özel bilgiler içeren değişken uzunlukta bir alandır. Eğer çerçeve yükü seçilen güvenlik ilkelerine göre korunmuş ise çerçeve kontrol alanının güvenlik seçimi alt alanı 1 olarak kurulmalıdır.

3.4.2.1.8 Çerçeve Kontrol Dizisi (Frame Control Sequence) Alanı

Çerçeve kontrol dizisi (FCS) alanı 16 bit uzunluğundadır. Ayrıca 16 bit ITU-T periyodik artıklık testini (CRC) içerir. FCS, çerçevenin MHR ve MAC verisi parçaları üzerinden hesaplanır.

FCS, aşağıda verilen standart 16. dereceden üretici polinom kullanarak hesaplanır.

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (3.4)$$

FCS değeri iletim için aşağıdaki algoritma kullanılarak hesaplanabilir.

- Periyodik artıklık testi yapılacak bitler için verilen polinom oluşturulur.

$$M(x) = b_0x^{k-1} + b_1x^{k-2} + \dots + b_{k-2}x + b_{k-1} \quad (3.5)$$

- $M(x)$ ile x^{16} çarpılarak $x^{16} \cdot M(x)$ polinomu elde edilir

- $x^{16} \cdot M(x)$ polinomu üretici polinom, $G_{16}(x)$, tarafından bölünür ve aşağıdaki polinom elde edilir.

$$R(x) = r_0x^{15} + r_1x^{14} + \dots + r_{14}x + r_{15} \quad (3.6)$$

- $R(x)$ polinomunun katsayıları FCS alanını verir.

Örnek olarak, 3 bayt MHR alanı ve verisi olmayan onay çerçevesini ele alalım:

0100 0000 0000 0000 0101 0110

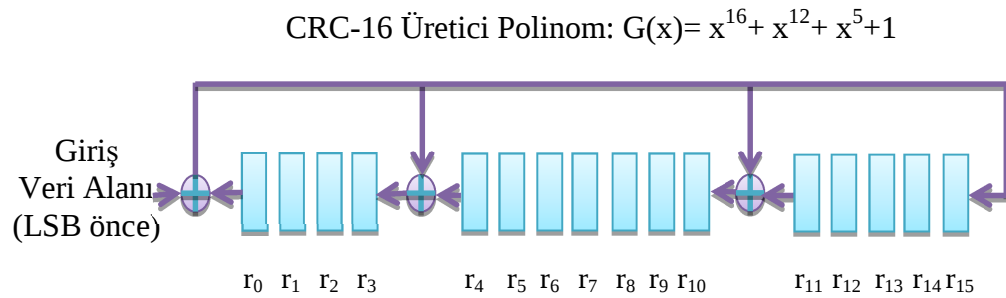
$b_0 \dots b_{23}$ [en soldaki bit (b_0) önce gönderilir]

Bu şartlar altında FCS yukarıda verilen yönteme göre hesaplanırsa aşağıdaki gibi olur,

0100 0111 1001 1110

$r_0 \dots r_{15}$ [en soldaki bit (r_0) önce gönderilir] [1,4] .

Tipik uygulama Şekil 3.19’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19: Tipik FCS Uygulaması

1. Yazmaçları ($r_0 \dots r_{15}$) sıfır değer ile başlatılır.
2. MHR ve veri, bölücüye iletim sırası ile sokulur. (önce LSB)
3. Veri alanının son biti bölücüye girdikten sonra kalan yazmaçları FCS’ yi içerir.
4. FCS veri alanını sonuna eklenir böylece r_0 önce gönderilir.

Uygulamada çerçeve kontrol dizisinin hesaplanmasında Şekil 3.20’ de gösterilen fonksiyon kullanılmıştır.

```
function fcs = calculate_fcs(data)

fcs=zeros(1,16);

for i=1:length(data)
    x1=bitxor(data(i),fcs(1));
    x2=bitxor(x1,fcs(12));
    x3=bitxor(x1,fcs(5));
    fcs=[fcs(2:16) x1];
    fcs(11)=x2;
    fcs(4)=x3;
end
```

Şekil 3.20: Uygulamada kullanılan FCS fonksiyonu

Fonksiyonda 16 bitlik (tüm bitleri 0) başlangıç dizisi oluşturulmuş ve verinin uzunluğuna göre XOR ile çerçeve kontrol dizisi hesaplanmıştır.

3.4.2.2 Beacon Çerçevesi Yapısı

Beacon çerçevesi Tablo 3.27’ de gösterildiği biçimde olmalıdır.

Tablo 3.28: Beacon Çerçeve Yapısı

Bayt: 2	1	04.Eki	2	Değişken	Değişken	Değişken	2
Çerçeve kontrol alanı	Dizi numarası	Adres alanları	Süper çerçeve tanımları	GTS alanları (şekil 4.11)	Bekleyen Adres Alanları (şekil 4.12)	Beacon yükü	FCS
MHR			MAC yükü				MFR

GTS alanları Tablo 3.28’ da ve bekleyen adres alanları Tablo 3.29’de gösterildiği biçimde olmalıdır.

Tablo 3.29: GTS bilgi alanının yapısı

Bayt: 1	0 / 1	Değişken
GTS Tanımı	GTS Talimatları	GTS Listesi

Tablo 3.30: Bekleyen Adres Bilgi Alanının Yapısı

Bayt: 1	Değişken
Bekleyen Adres Tanımı	Adres Listesi

- **Beacon Çerçevesi MHR Alanları**

Beacon çerçevesi için MHR, çerçeve kontrol alanını, dizi numarası alanını, kaynak PAN belirteci alanını ve kaynak adresi alanlarını içermelidir.

Çerçeve kontrol alanı içinde çerçeve tipi alt alanı beacon çerçevesini belirtecek değerde seçilmelidir. Kaynak adres modu alt alanı, gönderilecek beacon çerçevesindeki koordinatör adresine uygun değerde kurulmalıdır. Beacon çerçevesi için güvenlik ilkesi uygulanacaksa güvenlik aktif alt alanı 1 yapılmalıdır. Bunların dışındaki tüm alanlar 0 yapılmalı ve çerçeve alımı sırasında ihmal edilmelidir. Dizi numarası alanı güncel *macBSN* değerinde olmalıdır.

Adres alanı sadece kaynak adres alanını içermelidir. Kaynak PAN belirteci ve kaynak adres alanı beaconu iletecek cihazın PAN belirteci ve adresi değerlerinde olmalıdır.[1,4]

- **Süper Çerçeve Tanımları Alanı**

Süper çerçeve tanımları alanı 16 bit boyutundadır ve Tablo 3.30’da gösterildiği biçimde olmalıdır.

Tablo 3.31: Süper Çerçeve Tanımları Alanı Yapısı

bit : 0 – 3	04.Tem	08.Kas	12	13	14	15
Beacon Derecesi	Süper Çerçeve derecesi	Nihai CAP Slotları	Pil Ömrü Uzantısı	Ayrılmış	PAN Koordinatör	Bağlanma İzni

Beacon derecesi alt alanı 4 bit uzunluğundadır ve beacon çerçevesinin iletim aralığını belirler. Beacon derecesi değeri (*BO*) ise beacon aralığı (*BI*) şu şekilde hesaplanabilir,

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \text{ [sembol] }, 0 \leq BO \leq 14 \quad (3.7)$$

Eğer *BO* = 15 ise koordinatör gerekmediği müddetçe beacon göndermez. Süper çerçeve derecesi alt alanı 4 bit uzunluğundadır ve süper çerçevenin aktif olduğu zaman uzunluğunu belirtir. Koordinatör kendi PAN’ ı ile sadece aktif süper çerçeve müddetince etkileşir. Süper çerçeve derecesi (*SO*) ise süper çerçeve süresi (*SD*) şu şekilde hesaplanabilir,

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \text{ [sembol]}, 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (3.8)$$

Eğer $SO = 15$ ise, beacon iletimi sonrasında süper çerçeve aktif değildir.

Nihai CAP slotları 4 bit uzunluğundadır ve CAP tarafından kullanılan nihai süper çerçeve slotlarını tanımlar. CAP' ın süresi bu alan tarafından uygulanır ve $aMinCAPLength$ de belirtilen değere eşit veya büyük olur.

PAN koordinatör alt alanı 1 bit uzunluğundadır ve beaconu gönderen cihaz PAN koordinatörü ise 1 olarak ayarlanmalıdır. Aksi durumda bu alan 0 olmalıdır.

Bağlanma izni alanı 1 bit uzunluğundadır ve $macAssociationPermit$ değeri 1 ise bu alanda 1 olmalıdır. Alan 0 ise, koordinatör kendi ağı içindeki bağlanma isteklerini kabul etmeyecektir [1,4].

3.4.2.3 Veri Çerçevesi Yapısı

Veri çerçevesi yapısı Tablo 3.31'de gösterildiği gibi olmalıdır.

Tablo 3.32: Veri Çerçevesi Yapısı [1]

Bayt: 2	1	Nis.20	Değişken	2
Çerçeve kontrol	Dizi numarası	Adres alanları	Veri Yüğü	FCS
MHR			MAC yüğü	MFR

Veri çerçevesinin alanlarının sırası genel MAC çerçeve yapısına uygundur.

Veri Çerçevesi MHR alanları

Veri çerçevesi MHR alanı; çerçeve kontrol alanı, dizi numarası alanı, varış ve kaynak PAN belirteçleri ile adresleri alanlarını içerir.

Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı veri çerçevesini belirtecek şekilde seçilir. Diğer tüm alanlar kullanılacak veri çerçevesine uygun değerlerde ayarlanır. Dizi numarası alanı $macDSN$ ' nin güncel değerini içerir. Varış adresi alanı ve/veya kaynak

adres alanını içeren adres alanları çerçeve kontrol alanı içindeki değerlere göre oluşturulur.[1,4]

4.2.4 Onaylama Çerçevesi Yapısı

Onaylama çerçevesi yapısı Tablo 3.32’ de gösterildiği gibi olmalıdır.

Tablo 3.33: Onaylama Çerçevesi Yapısı [1]

Bayt: 2	1	2
Çerçeve kontrol	Dizi numarası	FCS
MHR		MFR

Onaylama çerçevesinin alanlarının sırası genel MAC çerçeve yapısına uygundur.

Onaylama Çerçevesi MHR alanları

Onaylama çerçevesi MHR alanı; çerçeve kontrol alanı, dizi numarası alanlarını içerir. Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı onaylama çerçevesini belirtecek şekilde seçilmelidir. Bekleyen çerçeve alt alanı onaylama çerçevesini alıcı cihaz için bekletilen daha fazla sayıda veri mevcutsa 1 olarak ayarlanmalıdır, aksi durumda 0 yapılmalıdır. Diğer tüm alanlar 0 yapılmalı ve alım sırasında ihmal edilmelidir.

Dizi numarası alanı, alındı onayı verilecek veri veya MAC komut çerçevesinin içerdiği dizi numarasını içermelidir.

3.4.2.5 MAC Komut Çerçevesi Yapısı

MAC komut çerçevesi yapısı Tablo 3.34’de gösterildiği gibi olmalıdır.

Tablo 3.34: MAC Komut Çerçevesi Yapısı [1]

Bayt: 2	1	Nis.20	1	Değişken	2
Çerçeve kontrol	Dizi numarası	Adres alanları	Komut çerçeve belirteci	Komut veri yükü	FCS
MHR			MAC yükü		MFR

MAC komut çerçevesinin alanlarının sırası genel MAC çerçeve yapısına uygundur.

- **MAC Komut Çerçevesi MHR alanları**

MAC Komut çerçevesi MHR alanı; çerçeve kontrol alanı, dizi numarası alanı, varış ve kaynak PAN belirteçleri ile adresleri alanlarını içerir.

Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı MAC komut çerçevesini belirtecek şekilde seçilmelidir. Diğer tüm alanlar kullanılacak MAC komut çerçevesine uygun değerlerde ayarlanmalıdır.

Dizi numarası alanı *macDSN*'nin güncel değerini içermelidir.

Varış adresi alanı ve kaynak adresi alanını içeren adres alanları çerçeve kontrol alanı içindeki değerlere göre oluşturulmalıdır.

- **Komut Çerçeve Belirteci Alanı**

Komut çerçeve belirteci alanı kullanılacak MAC komutunu tanımlar.

3.4.3 MAC Sabitleri ve PIB özellikleri

Bu alt bölümde MAC alt katmanı tarafından gereksinim duyulan sabitler ve özellikler tanımlanacaktır.

3.4.3.1 MAC sabitleri

MAC alt katmanının özelliklerini belirleyen sabitler Tablo 3.35' de listelenmiştir.

Tablo 3.35: MAC alt katmanı sabitleri [1,4]

Sabit	Açıklama	Değer
<i>aBaseSlotDuration</i>	Süper çerçeve derecesi sıfıra eşit olduğu zaman süper çerçeve slotunu oluşturan sembollerin sayısı	60
<i>aBaseSuperframeDuration</i>	Süper çerçeve derecesi sıfıra eşit olduğu zaman süper çerçeveyi oluşturan sembollerin sayısı	$aBaseSlotDuration * aNumSuperframeSlots$
<i>aExtendedAddress</i>	Cihaza atanan 64 bit IEEE adresi	Cihaz tanımlar
<i>aMaxBE</i>	CSMA-CA algoritmasında gecikme periyotlarının azami üstel değeri	5
<i>aMaxBeaconOverHead</i>	Beacon çerçevesi veri yüküne MAC alt katmanı tarafında eklenecek baytların azami sayısı	75
<i>aMaxBeaconPayloadLength</i>	Beacon çerçevesinin azami veri yükü, [bayt]	$aMaxPHYPacketSize - aMaxBeaconOverHead$
<i>aGTSDescPersistenceTime</i>	GTS açıklayıcıların bulunduğu süper çerçevelerin sayısı	4
<i>aMaxFrameOverhead</i>	Güvenlik ilkesi uygulanmaksızın MAC alt katmanı tarafında eklenecek baytların azami sayısı.	25
<i>aMaxFrameResponseTime</i>	Veri istek çerçevelerine cevap verebilmek için geçen azami sembol süresi	1220
<i>aMaxFrameRetries</i>	İletimin başarısızlıkla sonuçlanmasından önce yapılan tekrar sayısı	3

Tablo 3.36: MAC alt katmanı sabitleri (devamı)

Sabit	Açıklama	Değer
<i>aMaxLostBeacon</i>	Alıcı cihazın eş zamanlılık kaybı bildirimini yapmadan önce yakalayamadığı ardışık beacon çerçeveleri sayısı	4
<i>aMaxMACFrameSize</i>	MAC çerçevesi veri alanı içinde iletilebilecek baytların azami sayısı	<i>aMaxPHYPacketSize-aMaxFrameOverhead</i>
<i>aMaxSIFSFrameSize</i>	Kısa çerçeve aralığı (SIFS) ile takip edilecek MPDU' nun azami boyutu	18
<i>aMinCAPLength</i>	CAP' ı oluşturan sembollerin en az sayısı	440
<i>aMinLIFSPeriod</i>	Uzun çerçeve aralığını (LIFS)oluşturan en az sembol sayısı	40
<i>aMinSIFSPeriod</i>	Kısa çerçeve aralığını (SIFS) oluşturan en az sembol sayısı	12
<i>aNumSuperframeSlots</i>	Her hangi bir süper çerçevenin içerdiği slotların sayısı	16
<i>aReponseWaitTime</i>	İstek komutlarına takiben alınan cevap komutlarını azami bekleme süresi [sembol]	$32 * aBaseSuperframeDuration$
<i>aUnitBackoffPeriod</i>	CSMA-CA algoritması tarafından kullanılan temel zaman periyotlarını oluşturan sembollerin sayısı	20

Uygulamada kullanılan MAC alt katmanı sabitleri paket oluşturulurken aşağıdaki fonksiyonunda CSMA yapılandırılırken tanımlanmıştır. Şekil 3.21’ de uygulamada kullanılan MAC sabitleri gösterilmiştir.

```
csma.aMaxBE = 5;
    %gecikme üssünde kullanılan maksimum değer
csma.aMaxFrameRetries = 3;
    %hata olması durumunda yeniden deneme sayısının maksimum
    değeri
csma.aUnitBackoffPeriod = 20*csma.symbolPeriod;
    %gecikme periyodunun sembol süresi cinsinden değeri
csma.MacAckWaitDuration = 120*csma.symbolPeriod;
    %onay mesajının gelmesi için beklenen
    %maksimum süre
csma.CCAPeriod = 8*csma.symbolPeriod;
    %CCA prosesinde kanal dinleme süresi
csma.macMaxCSMABackoffs = 4;
    %kanal erişim hatası verilmeden önce yapılan
    %maksimum gecikme sayısı
csma.macMinBE = 3;
    %gecikme üssünün minumum değeri
csma.aMaxSIFSFrameSize = 18;
    %Maksimum SIFS Çerçeve Boyutu
csma.aMinLIFSPeriod = 40*csma.symbolPeriod;
    %Minumum LIFS periyodu
csma.aMinSIFSPeriod = 40*csma.symbolPeriod;
    %Minumun SIFS periyodu
```

Şekil 3.21: Uygulamada Kullanılan MAC Sabitleri

3.4.3.2 MAC PIB Özellikleri

Cihazın MAC alt katmanını yönetimi için gerekli özellikler. Tüm bu özelliklere “MLME-GET.request” ve “MLME-SET.request” ilkelleri ile okuma ve yazma yapılabilir. MAC PIB içerdiği özellikler Tablo 3.36’ da listelenmiştir. Özelliklerden (♦) ile işaretlenenler RFD’ ler için zorunlu değildir.

Tablo 3.37: MAC PIB özellikleri [1,4]

Özellik	Belirteç	Tip	Aralık	Açıklama	Varsayılan
<i>macAckWait Duration</i>	0x40	Tam sayı	54 - 120	İletilen veri çerçevesini takiben onay çerçevelerinin beklendiği azami sembol süresi	54
◆ <i>macAssociationPermit</i>	0x41	Bool	Doğru Yanlış	Koordinatörün ağa bağlanmaya izin verip vermediğini belirtir	YANLIŞ
<i>macAutoRequest</i>	0x42	Bool	Doğru Yanlış	Beacon çerçevesi içinde kendi adresi varsa veri isteği komutunun otomatik gönderileceğini belirtir.	DOĞRU
<i>macBattLifeExt</i>	0x43	Bool	Doğru Yanlış	Pil ömrü uzantısını belirtir	YANLIŞ
<i>macBattLife ExtPeriods</i>	0x44			Alıcının açık kalacağı gecikme periyotları sayısı	6
◆ <i>macBeacon Payload</i>	0x45	Bayt kümesi	-	Beacon çerçevesi veri yükü içeriği	Boş
◆ <i>macBeacon Payload-Length</i>	0x46	Tam sayı		Beacon çerçevesi veri yükünün bayt cinsinden uzunluğu	0
◆ <i>macBeacon Order</i>	0x47	Tam sayı	0 - 15	Koordinatörün beacon gönderme aralığını tanımlar	15
◆ <i>macBeacon TxTime</i>	0x48	Tam sayı	0x000000 0xffff	En son gönderilen beacon dan sonra geçen zaman [sembol]	0x000000

Tablo 3.38: MAC PIB özellikleri (devamı)

Özellik	Belirte	Tip	Aralık	Açıklama	Varsayıla
◆ <i>macBSN</i>	0x49	Tam sayı	0x00 0xff	Beacon çerçevelerine eklenen dizi numarası	Rasgele Değer
<i>macCoordExtended-Address</i>	0x4a	IEEE adresi	64 bit IEEE adresi	Koordinatörün 64 bitlik genişletilmiş adresi	-
<i>macCoordShort-Address</i>	0x4b	Tam sayı	0x0000 0xffff	Bağlı bulunan koordinatörün 16 bit kısa adresi	0xffff
<i>macDSN</i>	0x4c	Tam sayı	0x00 0xff	Veri ve MAC komut çerçevelerine eklenen dizi numarası	Rasgele Değer
◆ <i>macGTSPermit</i>	0x4d	Bool	Doğru Yanlış	Koordinatörün GTS isteklerini kabul edip etmediğini belirtir.	DOĞRU
<i>macMaxCSMABackoffs</i>	0x4e	Tam sayı	0 - 5	CSMA-CA algoritmasının kanal erişimi başarısız olarak bildirmeden önceki gecikme periyotlarının azami sayısı	4
<i>macMinBE</i>	0x4f	Tam sayı	0 - 3	CSMA-CA algoritmasında ki gecikme periyotlarının en az üstel sayısı	3
<i>macPANId</i>	0x50	Tam sayı	0x0000 0xffff	Cihazın çalıştığı PAN' ın 16 bitlik PAN belirteci	0xffff
◆ <i>macPromiscuous Mode</i>	0x51	Bool	Doğru Yanlış	MAC alt katmanın karışık modda çalışıp çalışmadığını gösterir.	YANLIŞ
<i>macRxOnWhenIdle</i>	0x52	Bool	Doğru Yanlış	Bekleme müddetince alıcının açık kalıp kalmayacağını belirtir.	YANLIŞ
<i>macShortAddress</i>	0x53	Tam sayı	0x0000 0xffff	Cihazın PAN içinde iletişim kurarken kullandığı kısa adres	0xffff
◆ <i>macSuperframe Order</i>	0x54	Tam sayı	0-15	Süper çerçevenin aktif kısmının uzunluğunu tanımlar	15
<i>macTransaction-PersistenceTime</i>	0x55	Tam sayı	0x0000 0xffff	Koordinatör tarafında işlem in kayıtlı tutulduğu azami zaman	0x01fd

3.4.4 MAC İşlevsel Tanımı

IEEE 802.15.4 protokolü MAC alt katmanını iki çalışma modunda tanımlar. Bunlar slotlu (beacon bulunduran, beacon enabled) ve slotsuz (beacon bulundurmayan, beaconless) iletim modlarıdır.

Slotlu iletim modunda çerçeve gönderen her cihaz zaman slotlarını istemcilerinin beacon çerçevelerine tahsis eden bir PAN koordinatörüne bağlı olmalıdırlar. Beacon çerçeveleri ağ yapılandırmak, bağlı cihazların kanal kullanımı için zaman senkronizasyonunu sağlamak, PAN ve süper çerçeve yapısını tanımlamak için kullanılır. Slotlu iletim modunda senkronizasyon iki beacon çerçevesi arasında sağlanır.

Slotsuz iletim modunda ağda bulunan cihazlar senkronizasyon için zaman slotlarına ihtiyaç duymazlar. Bunun yerine cihazlar slotsuz CSMA-CA mekanizması kullanarak iletim yaparlar.

Bu alt bölüm slotsuz iletim modunda MAC işlevselliğini tanımlar.

3.4.4.1 Kanal Erişimi

Bu alt bölümde, fiziksel radyo kanalına erişim için gerekli mekanizmaları tanımlanmıştır.

3.4.4.1.1 Süper Çerçeve Yapısı

Süper çerçeve, ağın koordinatörü tarafından gönderilen beacon çerçevesi ile her iki taraftan sınırlandırılan slotlu iletim modunda kullanılan çerçeve yapısıdır.

Süper çerçevenin yapısı *macBeaconOrder* ve *macSuperframeOrder* değerleri ile tanımlanır. MAC PIB özelliği *macBeaconOrder* (BO), koordinatörün kendi beacon çerçevelerini ilettiği aralığı tanımlar. BO ile beacon iletim aralığı (BI) bir birine şu şekilde bağlıdır:

$$0 \leq BO \leq 14, BI = aBaseSuperframeDuration \cdot 2BO \text{ [sembol]} \quad (3.9)$$

Eğer BO = 15 ise *macSuperframeOrder* değeri ihmal edilir.

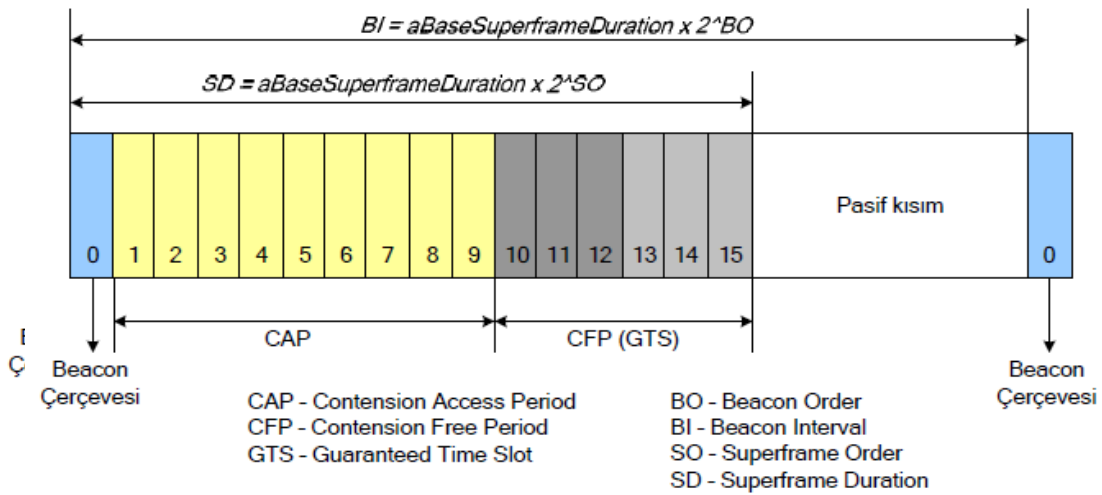
MAC PIB özelliği *macSuperframeOrder* (SO), süper çerçevenin aktif kısmının uzunluğunu tanımlar. SO ile süper çerçeve süresi (SD) bir birine şu şekilde bağlıdır:

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14, SD = aBaseSuperframeDuration \cdot 2SO \text{ [sembol]} \quad (3.10)$$

Eğer $SO = 15$ ise süper çerçeve beacondan sonra aktif kalmayacak. Eğer $BO = 15$ ise süper çerçeve var olmayacaktır.

Süper çerçeve yapısını kullanmak isteyen PAN, aktif-beacon PAN olarak isimlendirilir. Aktif-beacon PAN 0 ile 14 arasında bir değeri $macBeaconOrder$ değerine ve 0 ile $macBeaconOrder$ arasında bir değeri de $macSuperframeOrder$ değerine atmalıdır. PAN koordinatörü özel veri hızları gerektiren uygulamalarda aktif süper çerçevenin bir kısmını bu uygulama için atayabilir. Atanan bu kısma garantilenmiş zaman slotları (GTS) denir. GTS yalnızca aktif-beacon PAN ağlarında tahsis edilir.

Şekil 3.22’ de süper çerçeve yapısının bir örneği gösterilmiştir. Bu örnekte, süper çerçeve aktif ve pasif kısımlar içerir ve CFP alanı içinde 2 adet GTS tahsis edilmiştir.



Şekil 3.22: Süper Çerçeve Yapısına Bir Örnek [1,4]

Süper çerçeve yapısını kullanmak istemeyen PAN, pasif-beacon PAN olarak isimlendirilir. Pasif-beacon PAN her iki değeri de 15 yapmalıdır. Pasif-beacon ağda tüm iletimler slotsuz CSMA-CA mekanizması kullanılarak yapılır [1].

- CAP Alanı

CAP alanı, Şekil 4.19’da görüldüğü üzere beacon çerçevesini tabiken başlar ve süper çerçevedeki CFP slot sınırının başlamasından önce tamamlanır.

CAP içinde iletilen tüm çerçeveler (onay çerçeveleri ve veri isteği komutunu takiben gönderilen onay çerçevelerinden hemen sonra gönderilen veri çerçevesi hariç) kanala

erişmek için slotlu CSMA-CA mekanizmasını kullanır. CAP içinde iletim yapan bir cihaz, yapılan işlemin CAP bitiminden önce bir IFS periyodunda tamamlandığından emin olmalıdır. Eğer bu mümkün değilse, cihaz iletimi bir sonraki süper çerçevenin CAP bölümüne kadar ertelemelidir. MAC komut çerçeveleri daima CAP içinde iletilmelidir.

- CFP Alanı

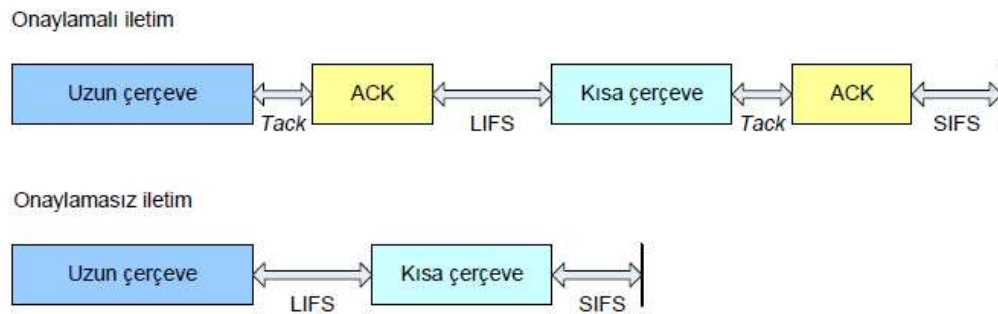
CFP alanı, Şekil 4.19’da görüldüğü üzere CAP alanının bittiği slot sınırını takiben başlar ve bir sonraki beacon çerçevesinin başlamasından önce tamamlanır. Eğer cihaz CFP içinde iletim yapacaksa kendine tahsis edilmiş GTS alanı bitiminden önce bir IFS periyodunda iletimin tamamlandığından emin olmalıdır [1,4].

3.4.4.1.2 Çerçeveler Arası Bekleme Zamanı (IFS)

MAC alt katmanı PHY tarafından alınan veriyi işleyebilmek için belli bir miktarda zamana gereksinim duyar. Bunu sağlayabilmek için, iletilen çerçeveler arasına bekleme zamanı (IFS) eklenmelidir. Eğer iletim onaylama gerektiriyorsa, IFS periyodu onaylama çerçevesini takiben bırakılır. IFS periyodunun uzunluğu aktarılan çerçevenin boyutuna bağlıdır. MAC alt katmanı tarafından *aMaxSIFSFrameSize* (18 sembol) sabit değerinden daha küçük boyutlu çerçeveler kısa çerçeve ve daha büyük boyutlu çerçeveler uzun çerçeve olarak kabul edilir. Buna göre, kısa çerçeveleri en azından *aMinSIFSPeriod* sembol süresi uzunluğunda kısa-IFS (SIFS) periyodu takip eder. Uzun çerçeveleri ise en azından *aMinLIFSPeriod* sembol süresi uzunluğunda uzun-IFS (LIFS) periyodu takip etmelidir. Bu kavram Şekil 3.23’ de gösterilmiştir [1,4].

$$SIFS \geq aMinSIFSPeriod \text{ (12 sembol)}$$

$$LIFS \geq aMinLIFSPeriod \text{ (40 sembol)}$$



Şekil 3.23: IFS Şematik Gösterimi [1,4]

3.4.4.1.3 Slotsuz İletim Modunda CSMA-CA Algoritması

Slotsuz CSMA-CA algoritması PAN içinde beacon çerçeveleri kullanılmıyorsa veya aktif-beacon PAN içinde beacon yerleştirilemiyorsa gerçekleştirilir. CSMA-CA algoritması CAP içinde iletilen veri veya MAC komut çerçevelerinin iletiminden önce kullanılan bir algoritmadır. CSMA-CA algoritmasını beacon çerçeveleri, onaylama çerçeveleri ve CFP içinde iletilen veri çerçeveleri iletim için kullanılmaz. Şekil 3.24' de slotsuz iletim modunda CSMA-CA algoritma şeması verilmiştir.

Algoritma, $aUnitBackoffPeriod$ sembol süresine eşit olması gereken gecikme periyotları ismi ile anılan zaman birimleri kullanılarak uygulanır. Slotsuz CSMA-CA' da Bir cihazın gecikme periyotları, PAN içindeki diğer cihazların gecikme periyotları ile zaman içinde bağlantılı değildir.

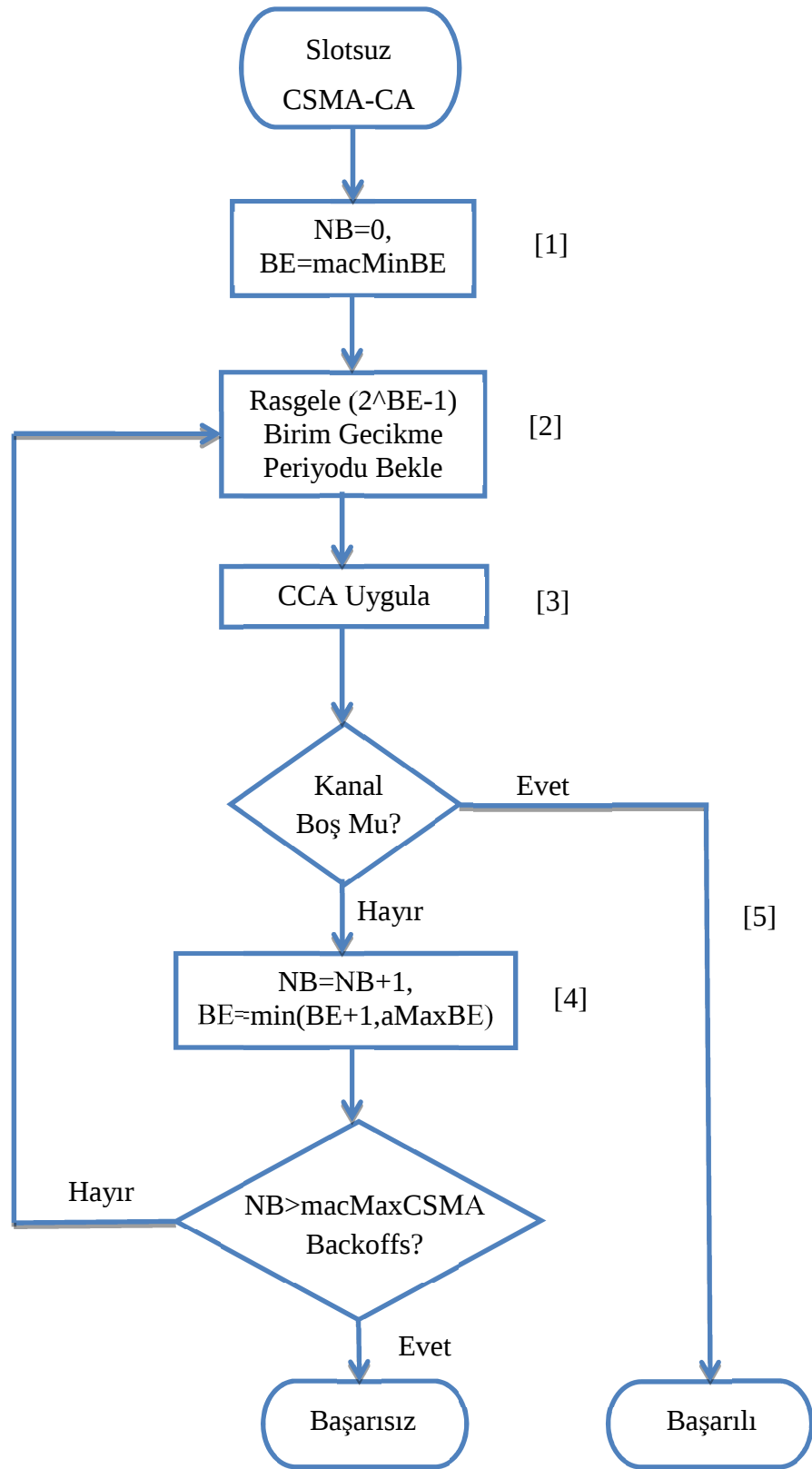
Slotsuz CSMA-CA'da tüm cihazlar her bir iletim işlemi için NB ve BE ile isimlendirilen 2 değişken bulundurur. NB , güncel iletim denenirken CSMA-CA algoritmasının gerek duyduğu gecikme periyotları sayısıdır. Bu değer her yeni iletim işleminden önce 0 değeri ile başlatılır. BE , gecikme periyodu üstel değeri, cihazın kanal değerlendirmesi yapmadan önce ne kadar gecikme periyodu bekleyeceği ile ilişkilidir. $macMinBE$ değeri 0 olarak ayarlanmış ise bu algoritmanın birinci iterasyonu müddetince çarpışmadan kaçınma geçersiz olacaktır.

Bu algoritmanın kanal değerlendirme kısmı süresince cihazın alıcısı aktif olduğu halde, cihaz bu zaman diliminde alınan tüm çerçeveleri imha edecektir. Şekil 3.23' de slotsuz CSMA-CA algoritmasının adımları gösterilmiştir.

MAC alt katmanı NB ve BE değişkenlerini başlatır ve doğruca 2. adımı işletir. [adım 1]

MAC alt katmanı 0 ile $2^{BE}-1$ aralığında rasgele sayıda gecikme periyodu bekler [adım 2] ve sonra PHY katmanından CCA uygulaması ister [adım 3].

Eğer kanal meşgul ise [adım 4], MAC alt katmanı NB ve BE değişkenlerini bir arttıracaktır, burada BE ' nin $aMaxBE$ değerinden büyük olmadığından emin olmalıdır. Eğer NB değişkeni değeri $macMaxCSMABackoffs$ değerine eşit veya daha küçükse, CSMA-CA algoritmada 2. Adıma geri dönecektir. NB daha büyükse, CSMA-CA algoritması kanal erişimi başarısız durumu ile sonlandırılacaktır. Eğer kanal boş olarak değerlendirilirse [adım 5], MAC alt katmanı çerçevenin iletimine hemen başlar [4].



Şekil 3.24: Slotsuz CSMA – CA Algoritması

3.4.4.2 PAN Başlatılması ve İşletilmesi

Bu alt bölümlerde kanalların taranması ve PAN başlatılması işlemleri belirtilecektir.

3.4.4.2.1 Kanalları Tarama

Bütün cihazlar belirlenmiş bir kanal listesinde aktif, pasif, yetim ve enerji sezimi (ED) tarama yapabilirler.

FFD cihazı ED taraması ile istenilen her bir kanalın tepe enerji değerini elde edebilir. FFD tarafından yapılan aktif kanal taraması, kanalda bulunan koordinatörlerin kendi radyo frekans alanına (POS) beacon çerçevesi göndermesine neden olur. Bu işlem yeni PAN kuracak olan muhtemel koordinatör tarafından PAN belirtecini seçmek için veya cihazın başka bir ağa bağlantısı için kullanılabilir. Pasif kanal taraması yapan cihaz kendi alanı içinde bulunan koordinatörlerin beacon çerçevesini iletmesine neden olur. Pasif kanal taramada beacon istek komutu, her nasıl oluyorsa, iletilmez. Bu tarama tipi cihazın ağa bağlantısı için kullanılır. Yetim kanal taraması, koordinatörü ile eş zamanlılığını kaybetmiş cihazları yeniden konumlandırmak için yapılır. Kanal tarama işleminde üst katmanlar taranması istenilen kanalların listesini göndermelidir.

Bir cihaz “MLME-SCAN.request” ilkeli ile kanalı tarayabilir. Eğer uygulanabiliyorsa, bu tarama müddetince, cihaz beacon iletimini askıya almalı ve taramanın sonucu üzerine beacon iletimini yeniden başlatmalıdır. Tarama işlemi ile elde edilen sonuçları “MLME-SCAN.confirm” ilkeli ile üst katmanlara bildirilecektir [1,4].

3.4.4.2.2 PAN Başlatılması

Bir PAN, bir FFD tarafından aktif kanal taraması yapılması ve uygun PAN belirteci seçilmesinden sonra başlatılır. Aktif kanal taramasından sonra listelenen PAN belirteçleri arasından uygun PAN belirtecini seçen algoritma bu standardın kapsamı dışındadır. Ek olarak, PAN başlatacak FFD’ nin *macShortAddress* değeri (0xffff) değerinden daha küçük olmalıdır.

FFD “MLME-START.request” ilkelini iletimi ile PAN işletmeye başlar, ilkelin PAN koordinatör parametresi 1 ve koordinatör yeniden düzenleme parametresi 0 olarak ayarlanmalıdır. Bu ilkel alındığında, MAC alt katmanı *macPANId* ve *phyCurrentChannel* değerlerini ayarlar. Yapılandırma tamamlandıktan sonra, MAC alt

katmanı “MLME-START.confirm” ilkelini ile cevap verir ve PAN koordinatörü gibi çalışmaya başlar [1,4].

3.4.4.2.5 Cihaz Tarama

FFD beacon çerçevelerini ileterek bulunduğu PAN içinde diğer cihazları bilgilendirebilir. Bu işlem diğer cihazlara, cihaz taramayı uygulatır.

PAN Koordinatörü olmayan FFD başarı ile PAN a bağlandığında ağın beacon çerçevelerini iletme başlayacaktır. Cihaz PAN koordinatör parametresi 0 olarak ayarlanmış “MLME-START.request” ilkelini kullanarak beacon çerçevesi iletimini başlatır. Bu ilkel alındığında, MLME cihazın bağlı olduğu PAN’ ın belirteci ve kendi kısa adresi ile beacon iletimine başlar. Bir Beacon çerçevesi gönderimi $[aBaseSuperframeDuration \cdot 2^n]$ sembol oranındadır, burada “n” değeri *macBeaconOrder* değerine eşittir.

3.4.4.3 Ağa Bağlanmak ve Ağdan Ayrılmak

Bu alt bölüm ağa bağlanma ve ağdan ayrılma işlemlerini tanımlar.

3.4.4.3.1 Ağa Bağlanmak

Ağa bağlanma isteğinde bulunan bir cihaz, önce “MLME-RESET.request” ilkelini uygulayarak MAC katmanını ilk duruma getirir. Daha sonra aktif kanal tarama veya pasif kanal tarama yöntemlerinde birini tamamlar. Kanal taramasının sonuçlarına göre cihaz uygun bir PAN seçebilir. Kanal tarama işlemiyle elde edilen PAN-açıklayıcı listesinden bağlantı kurulacak uygun PAN’ ı seçen algoritma standardın kapsamı dışındadır.

Ağın Koordinatörü ağa bağlanmak isteyen cihazlara sadece *macAssociationPermit* özelliği bir olarak ayarlanmış ise izin verecektir. Benzer şekilde, cihazlarda sadece kanal taramasının sonucunda bağlantı kurulmasına izin verilen ağlara bağlantı kurmak için çaba harcayacaktır. Eğer koordinatörün *macAssociationPermit* özelliği 0 olarak ayarlanmış ise cihaz tarafından alınmış bağlantı istek komutu ihmal edilecektir.

Bağlantı kurulacak PAN seçiminden sonra, aşağıda belirtilen PHY ve MAC PIB değerleri güncellenmelidir.

1. *phyCurrentChannel* bağlantı için uygun kanala ayarlanmalıdır.
2. *macPANId* bağlantı kurulacak PAN belirtecine ayarlanmalıdır.
3. *macCoordExtendedAddress* veya *macCoordShortAddress* bağlantı kurmak istenilen ağın koordinatöründen gelen beacon çerçevesinde belirtilen değerlere göre ayarlanmalıdır.

Bir PAN ile bağlantı kurmak isteyen cihaz, “MLME-ASSOCIATE.request” ilkelisi ile, sadece var olan bir PAN’ a bağlanmayı deneyecektir ve kendi PAN’ ının başlatmak için uğraşmayacaktır. Hiçbir PAN ile bağlantı kurmamış cihaz, var olan PAN’ ın koordinatörüne “bağlanma isteği” komutunu göndererek bağlanma işlemini başlatacaktır. Eğer “bağlama isteği” komutu doğru bir şekilde alınmış ise koordinatör bir onay çerçevesi gönderir, böylece komutun alındığı onaylanır.

“Bağlanma isteği” komutuna gönderilen onay çerçevesi cihazın ağa bağlandığı anlamına gelmez. Komutun koordinatör tarafında alınmasından sonra, var olan güncel kaynakların PAN’ a yeni cihazın bağlanmasına yeterli olacağına karar vermesi için koordinatöre zaman gerekmektedir. Koordinatör *aResponseWaitTime* sembol süresi içinde bu kararı vermelidir. Eğer Koordinatör bu cihazın kendi PAN’ ına daha önce bağlanmış olduğunu bulmuşsa, evvelce bilinen cihazla ilgili bilgileri silmelidir. Eğer yeterli kaynak varsa, koordinatör cihaz için kısa adres tahsis eder. Cihaz için atanan yeni adresi içeren ve başarılı bağlantıyı durumunu gösteren “bağlama yanıtı” komutunu üretir. Eğer yeterli kaynak yok ise koordinatör başarısızlık durumunu belirten “bağlanma yanıtı” komutunu üretir. Bağlanma yanıtı komutu dolaylı iletim kullanılarak cihaza gönderilecektir.

Eğer “bağlanma isteği” komutunun adres tahsisi alt alanı 1 olarak kurulmuş ise, koordinatör tarafından desteklenen adres modlarına bağlı olarak 16bit kısa adres tahsis edilecektir. Eğer “bağlanma isteği” komutunun adres tahsisi alt alanı 0 olarak kurulmuş ise, koordinatör tarafından tahsis edilen kısa adres (0xffff) değerine eşit olacaktır. (0xffff) değerine eşit olan kısa adres cihazın ağa bağlandığını fakat kısa adres tahsis

edilmediğini gösteren özel bir durumdur. Bu durumda cihaz ağ içinde sadece 64 bitlik genişletilmiş adresini kullanabilir.

"Bağlanma İsteği" komutu için onay çerçevesi alan cihaz, koordinatörün karar verebilmesi için *aResponseWaitTime* sembol kadar bekleyecektir.

"Bağlanma yanıtı" komutunun alınmasından sonra cihaz onay çerçevesi göndererek alındıyı doğrulayacaktır. Eğer alınan komutta ki bağlanma durumu alt alanı başarılı bağlantıyı gösteriyorsa, cihaz bağlantı kurulan koordinatörün adresini kayıt eder. Bağlantı sonrası koordinatörün kısa adresi tarama sonucunda elde edilen beacon çerçevesinden edinilir ve *macCoordShortAddress* özelliğinde saklanır. Koordinatörün genişletilmiş adresi de bağlantı yanıtı komut çerçevesinin MHR alanında bulunur ve *macCoordExtendedAddress* özelliğinde saklanır. Cihaz aynı zaman da kısa adres alanındaki adresi de *macShortAddress* özelliğinde saklar. Tablo 3.37' da belirtilen aralıkta olmasına bağlı olarak PAN içindeki iletişim kısa adresleri kullanarak yapılır. Eğer komutun bağlantı durumu alanı bağlantının başarısız olduğunu gösteriyorsa, cihaz *macPANId* değerini varsayılan değer olan (0xffff) olarak ayarlamalıdır.

Tablo 3.39: Kısa adresin kullanımı [1]

<i>macShortAddress</i> değerleri	Açıklama
0 x 0000 - 0 x fffd	Kısa adresleme modunda kullanılabilen adresler.
0 x fffe	Cihaz 64bitlik genişletilmiş adresleme modunu kullanır (<i>aExtendedAddress</i>)
0 x ffff	Cihaz ağa bağlı değildir ve PAN içinde iletişim kuramaz

3.4.4.3.2 Ağdan Ayrılmak

Ağdan ayrılma işlemi “MLME-DISASSOCIATE.request” ilkeli yayımlanarak başlatılır.

Bir koordinatör kendine bağlı cihazlardan birini PAN’ dan ayırmak istediği zaman, cihaza “ayrılma bildirim” komutunu dolaylı iletim ile gönderir. Eğer cihaz komutu doğru bir şekilde alırsa onay çerçevesi göndererek alındıyı onaylar. Koordinatör tarafından onay çerçevesi alınmasa dahi cihazın ağdan ayrıldığı kabul edilir. Eğer PAN’ a bağlı bir cihaz ağdan ayrılmak isterse “ayrılma bildirim” komutunu kendi koordinatörüne gönderir. Komutu doğru şekilde alan koordinatör durumu onay çerçevesi göndererek onaylar. Gönderilen onay çerçevesi cihaz tarafından alınmasa dahi cihaz kendine kendine ağdan ayrıldığını kabul eder. Eğer komutun kaynak adres kısmı *macCoordExtendedAddress* değerine eşitse, alıcı kendisinin artık bağlı olduğu ağ olmadığını göz önünde bulunduracaktır. Eğer komut bir koordinatör tarafından alınırsa ve kaynak *macCoordExtendedAddress* değerine eşit değilse, gelen kaynak adresi kendi cihazları listesinden doğrular. Eğer adres listede mevcutsa koordinatör cihazı ağdan ayrılmış gibi düşünür, mevcut değilse komutu ihmal eder. PAN’ a bağlı bir cihazın ayrılması PAN için gerekli tüm referans bilgilerinin silinmesiyle, koordinatörün cihazı ayırması ise kayıtlı bulunan cihazın tüm referans bilgilerinin silinmesi ile gerçekleşir. Ayrılma işleminin sonucu üst katmanlara “MLME-DISASSOCIATE.confirm” ilkeli yayımlanarak bildirilir.

3.4.4.4 Senkronizasyon

Bu alt bölüm beacon desteklenen/desteklenmeyen PAN için senkronizasyonun nasıl yapıldığını tanımlar. Beacon destekli PAN içinde senkronizasyon, beacon çerçevelerinin alınması ve çözümlenmesi ile uygulanır. Beacon desteklenmeyen PAN içinde ise, “MLME-POLL.request” ilkeli alındığı zaman MLME varlığı koordinatörde bekleyen veri için senkronizasyon üst katmanların belirlediği zamanlarda koordinatörün taranması yolu ile uygulanır.

3.4.4.5 İletme, Alma ve Onaylama

Bu alt bölümde, çerçeve iletme, alma ve onaylama için temel işlemler tanımlanacaktır.

3.4.4.5.1 Çerçeve İletme

Her hangi bir zamanda veri veya MAC komut çerçevesi üretilebilir. MAC alt katmanı gönderilecek her çerçeve için dizi numarası alanına *macDSN* değerini kopyalar ve değerini bir arttırır. Benzer şekilde her bir beacon çerçevesi üretildiğinde *macBSN* benzer işleme tabi tutulur. Kaynak adres alanı, eğer sunulursa, çerçeveyi gönderecek cihazın adresini içerir. Cihaz ağa bağlı olduğu zaman ve ona kısa adres tahsis edilmişse (*macShortAddress* 0xfffe veya 0xffff değerine eşit değilse) , cihaz tercihen 64 bitlik genişletilmiş adresi yerine kısa adresi kullanabilir. Cihaz henüz bir ağa bağlı değilse veya *macShortAddress* değeri genel kısa adres (0xffff) değerine eşitse tüm iletişim sırasında kaynak adresi alanında 64 bitlik genişletilmiş adresini kullanmalıdır. Eğer kaynak adres alanı sunulmuyorsa, çerçeveyi oluşturanın koordinatör olduğu farz edilir ve varış adresi alanı alıcının adresini içerir. Eğer varış ve kaynak adres bilgileri sunulursa, MAC alt katmanı varış ve kaynak PAN belirteçlerini karşılaştırır. Eğer PAN belirteçleri aynı ise ve çerçeve kontrol alanı içindeki iç-PAN alt alanı 1 ise iletilecek çerçevede kaynak PAN belirteci çıkarılır. Her iki PAN belirteçleri farklı ise ve iç-PAN alt alanı 0 ise her iki PAN belirteci gönderilecek çerçeveye eklenir. Eğer çerçeve aktif-beacon PAN içinde gönderilecekse, iletici cihaz iletimden önce beacon çerçevesini bulmalıdır. Eğer beacon izlenmiyorsa ve böylece cihaz beaconun ne zaman görüneceğini bilmiyorsa, beaconu bulabilmek için kendi alıcısını aktif etmeli ve belli bir süre arama yapmalıdır. Eğer bu süre sonunda beacon bulunamamışsa, cihaz gönderilecek çerçevesini CSMA-CA algoritmasının slotsuz sürümü ile gönderir. Arama sonunda bir kez beacon bulunmuş veya beacon zaten izleniyorsa, çerçeve süper çerçevenin uygun kısmında iletilir. CAP içindeki iletim CSMA-CA algoritmasının slotlu sürümünün başarılı uygulamasını izler ve GTS içindeki iletim CSMA-CA algoritmasını kullanmaz. Eğer çerçeve, pasif-beacon PAN içinde iletilecekse, çerçeve iletimi CSMA-CA algoritmasının slotsuz sürümünün başarılı uygulamasını izleyerek iletilir.

3.4.4.6.2 Çerçeve Alma ve Reddetme

Bütün cihazlar bekleme periyodu müddetince kendi alıcılarını aktif olup olmayacağını seçebilirler. Bu bekleme periyotları esnasında, MAC alt katmanı üst katmanlar tarafından alıcı-verici görev isteklerine hizmet etmeye devam etmelidir. Bir alıcı-verici

görevi; onay alımı ile iletim isteği (eğer onay gerekli ise) veya iletim isteği gibi tanımlanabilir. Her bir alıcı-verici görevinin tamamlanmasında sonra, alıcısının aktif veya pasif olmasını *macRxOnWhenIdle* değerine 1 veya 0 olmasına bağlıdır. Eğer *macBeaconOrder* değeri 15 değerinden küçükse, *macRxOnWhenIdle* değeri sadece CAP göz önünde bulundurulacaktır. Radyo iletişiminin yapısından dolayı, bir cihaz ve onun alıcısı alım sırasında aktif edilir ve IEEE 802.15.4 standardına uyumlu aynı kanalda çalışan diğer tüm cihazlardan gelen iletimlerin anlamını çözmeye çalışır, diğer kaynakların girişimi ile birlikte. Böylece, MAC alt katmanı sadece üst katmanların ilgilendiği çerçeveleri sunmak için gelen çerçeveleri süzmelidir. Çerçeve süzme işlemi için ilk seviye, MAC alt katmanının FCS alanı içinde algoritmalarla göre doğru değeri içermeyen tüm çerçeveleri imha etmesidir. Süzme işleminin bir sonraki seviyesi MAC alt katmanının karışık modda işleyip işlemediğine bağlıdır. Karışık modda, MAC alt katmanı birinci seviye süzme işleminden geçen tüm çerçeveleri daha fazla süzmeden doğrudan üst katmanlara geçirir. MAC alt katmanı *macPromiscuousMode* değeri 1 ise bu modda çalışır. Eğer MAC alt katmanı karışık modda çalışmıyorsa ise, sadece aşağıda listelenen durumlar sağlandığı zaman çerçeveleri kabul edilir:

1. Çerçeve kontrol alanı içindeki çerçeve tipi alt alanı geçersiz bir çerçeve tipi değeri içeriyorsa çerçeve imha edilir.
2. Eğer çerçeve tipi bu çerçevenin beacon çerçevesi olduğunu belirtiyorsa, kaynak PAN belirteci *macPANId* değerine eşitse çerçeve kabul edilir.(Eğer *macPANId* değeri 0xffff değerine eşitse bu beacon çerçevesi kaynak PAN belirtecine bakılmaksızın kabul edilir)
3. Eğer çerçeve içinde varış PAN belirteci mevcutsa, bu değer *macPANId* değerine eşitse veya değeri genel PAN belirteci (0xffff) değerinde ise çerçeve kabul edilir.
4. Eğer çerçeve içinde varış kısa adresi mevcutsa, bu değer *macShortAddress* veya genel kısa adres (0xffff) değerine eşitse veya çerçevede bulunan varış genişletilmiş adresi *macExtendedAddress* değerine eşitse çerçeve kabul edilir.
5. Eğer veri veya MAC komut çerçeveleri sadece kaynak adres alanını mevcutsa, alıcı cihaz PAN koordinatörü ve PAN belirteci *macPANId* değerine eşitse çerçeve kabul edilir.

Yukarıda listelenen gereksinimlerinden biri sağlanmazsa, MAC alt katmanı gelen çerçeveyi imha edecektir. Tüm koşullar sağlandığında çerçeve geçerli kabul edilir ve işlem uygulanır. Geçerli çerçeveler için, eğer çerçeve tipi alt alanı veri veya MAC komut çerçevesi olduğunu belirtiyorsa ve onay isteği alt alanı 1 olarak kurulmuş ise, MAC alt katmanı bir onay çerçevesi gönderecektir. Onay çerçevesinin iletimden önce, veri veya MAC komut çerçevesinin içerdiği dizi numarası değeri onay çerçevesinde bulunan dizi numarası alanına kopya edilir. Bu adım, işlemi yapan kaynak cihaza uygun onay çerçevesi aldığını bilmesini sağlar. Eğer “güvenlik aktif alt alanı 1 olarak kurulmuş ise, MAC alt katmanı güvenlik ilkesi ile alınan çerçeveyi işleyecektir. Aktif veya pasif tarama müddetince sağlanan beacon çerçeveleri için, güvenlik işlemi başarısızlığa uğramışsa dahi güvenlik alanları uygun değer ile ayarlanarak PAN açıklayıcıları içine kayıt edilir. Eğer çerçeve kontrol alanı içindeki İç-PAN alt alanı 1 olarak kurulmuş ve çerçeve hem varış hem de kaynak adres bilgilerini içeriyorsa, MAC alt katmanı varış PAN belirteci alanına benzer olan kaynak PAN belirteci alanının ihmal edildiğini varsayacaktır. Eğer çerçeve başarı ile kabul edilmiş ise, MAC alt katmanı çerçeveyi üst katmanlara geçirir. Bu çerçeve bilgisini kapsayan “MCPS-DATA.indication” ilkelinin yayınlanması ile gerçekleştirilir. [1,4]

3.4.4.6.3 Bekleyen Verinin Koordinatörden Çıkarılması

Aktif-Beacon PAN içinde işleyen bir cihaz, bekleyen her hangi bir çerçevenin olup olmadığını alınan beacon çerçevesinin içeriğini işleyerek karar verebilir. Eğer beacon çerçevesi içindeki adres listesi alanı cihazın adresini içeriyorsa, cihazın MLME varlığı, CAP müddetince, onay isteği alt alanı 1 olan veri isteği komutunu kendi koordinatörüne gönderecektir. MLME varlığının koordinatörüne veri isteği komutunu göndermesi için iki ayrı durum daha vardır. Birinci durum, MLME varlığı “MLME-POLL.request” ilkeli aldığı zaman. İkinci durum, cihaz bir istek komutu onayından *aResponseWaitTime* sembol sonra veri isteği komutu gönderebilir, ağa bağlanma işleminde olduğu gibi. Veri isteği komutu PAN koordinatörüne gönderilmek üzere hazırlanmamışsa varış adresi bilgisini içermelidir. Veri isteği komutunun başarılı alımında koordinatör onay çerçevesi gönderecektir. Koordinatörün cihaza gönderilecek verinin bulunduğu kararını verebilmek için yeterli zamanı olmasa da *macAckWaitDuration* sembol zamanı içinde onay çerçevesini yollayabilmelidir. Koordinatör onay çerçevesinin çerçeve kontrol alanının bekleyen çerçeve alt alanını cihaz için gerçekten bekleyen çerçeve olup

olmadığını gösterecek biçimde ayarlanmalıdır. Eğer bu mümkün olmuyorsa, koordinatör onay çerçevesinin bekleyen çerçeve alt alanını 1 olarak kurmalıdır. Bekleyen çerçeve alt alanı 0 olarak ayarlanmış onay çerçevesinin alımında cihaz, koordinatörde bekleyen verinin olmadığı sonucuna varır. Bekleyen çerçeve alt alanı 1 olarak ayarlanmış onay çerçevesinin alımında cihaz, Aktif-Beacon PAN içinde çalışıyorsa kendi alıcısını *aMaxFrameResponseTime* CAP sembolleri kadar aktif yapar, Pasif-Beacon PAN içinde ise koordinatörden uygun veri çerçevesini almak için gerekli sembol süresi kadar aktif yapacaktır. İstekte bulunan cihaz için koordinatörde gerçekte bekleyen veri çerçevesi var ise, koordinatör bekleyen çerçeveyi bu bölümde anlatılan mekanizmaların birini kullanarak gönderir. Eğer istekte bulunan cihaz için gerçekte bekleyen veri çerçevesi yoksa koordinatör onay çerçevesi istemeksizin sıfır veri yükü içeren veri çerçevesini bu bölümde anlatılan mekanizmalar ile gönderecektir, bu durum cihaz için verinin bulunmadığını gösterir.

Veri isteği komutunun onaylanmasını takiben veri çerçeveleri aşağıdaki mekanizmaların biri kullanılarak iletilir:

1. CSMA-CA kullanmaksızın, Eğer MAC alt katmanı veri çerçeveleri için iletimi gecikme slot sınırında *aTurnaroundTime* ile (*aTurnaroundTime* + *aUnitBackoffPeriod*) sembol süresi arasında başlarsa, mesaj, uygun IFS periyodu ve onaylama için CAP içinde yeterli zaman kalır. Eğer veri çerçevesini takiben istenen onay çerçevesi alınamamışsa bunu izleyen tüm iletimler CSMA-CA kullanılarak yapılır.

2. CSMA-CA kullanarak, yukarda ki koşulun aksi durumunda.

Eğer veri isteğinde bulunan cihaz koordinatörden belirlenen sembol zamanında veri çerçevesini almamış veya sıfır veri yüklü bir veri çerçevesi almış ise koordinatörde bekleyen verinin bulunmadığı sonucuna varacaktır.

Eğer istekte bulunan cihaz koordinatöründen veri çerçevesi almışsa kendisi de bir onay çerçevesi gönderir ve (eğer gerekli ise) böylece alındının onaylaması yapılmış olur.

Eğer koordinatörden alınan veri çerçevesinin çerçeve kontrol alanının bekleyen çerçeve alt alanı 1 olarak ayarlanmış ise, cihaz için hala daha koordinatörde bekleyen çerçeve mevcuttur. Bu durumda cihaz yukarda tanımlanan işlemleri

tekrarlayarak koordinatörüne yeni bir veri isteği komutu göndererek veriyi çıkartabilir.

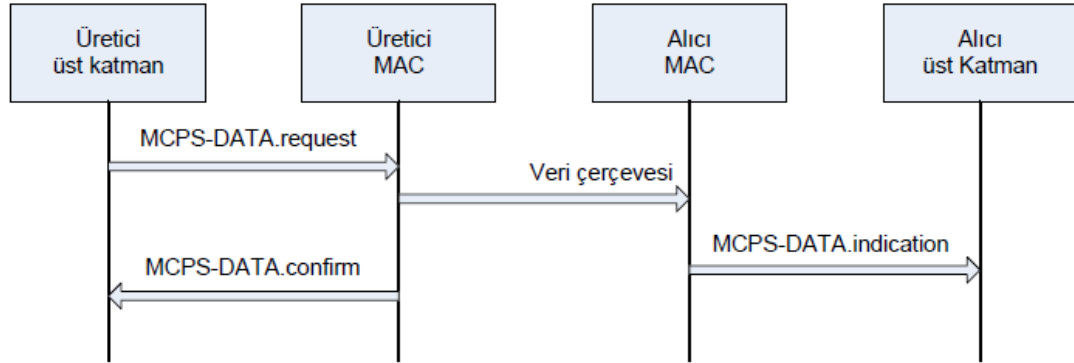
3.4.4.6.4 Onaylamaların Kullanılması

Veri ve MAC komut çerçeveleri onaylama isteği alt alanı çerçeve için uygun değer ayarlanarak gönderilir. Beacon ve onay çerçevelerinde onaylama isteği alt alanı daima 0 olarak ayarlanmalıdır. Benzer şekilde, genel yayınlanan çerçevelerde de onaylama isteği alt alanı 0 olmalıdır.

Onaylamama

Onaylama isteği alt alanı 0 olarak ayarlanıp iletilen bir çerçeve istenilen alıcı tarafından alınması ile onaylanmayacaktır ve çerçeveyi ileten cihaz iletimin başarı olduğunu kabul edecektir.

Şekil 3.25’ de gösterilen mesaj sıralaması, tek bir mesaj çerçevesinin onaylama olmaksızın iletiminin senaryosudur. Bu durumda gönderici cihaz onaylama isteği alt alanı 0 olan veri çerçeveleri gönderir .



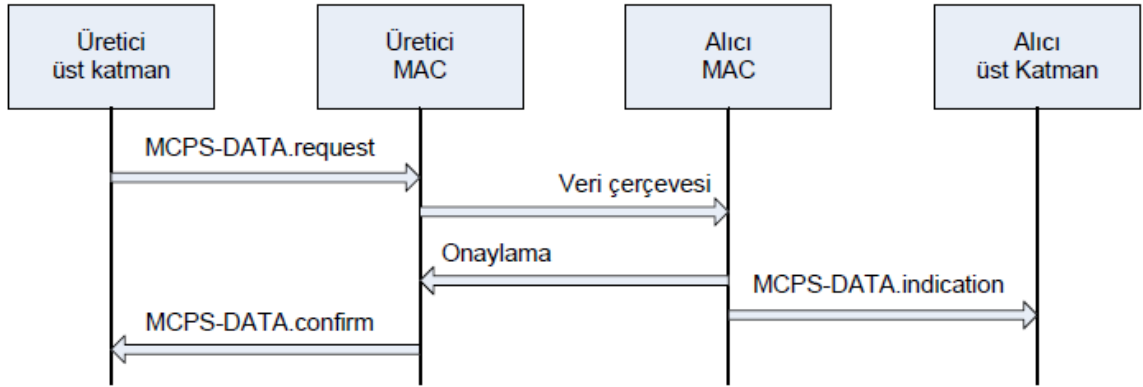
Şekil 3.25: Onaylama Olmaksızın Veri Aktarımı

- Onaylama İşlemi

Onaylama isteği alt alanı 1 olarak ayarlanıp iletilen bir çerçeve istenilen alıcı tarafından alınması ile onaylanacaktır. Eğer istenilen alıcı çerçeveyi doğru şekilde almışsa, onaylanacak veri veya MAC komut çerçevesi ile aynı DSN numarasını içeren onay çerçevesini üretecek ve gönderecektir.

Pasif-Beacon PAN içinde veya CFP alanı içinde onaylama çerçeveleri iletimi MAC komut veya veri çerçevelerinin son sembolünden alımından *aTurnaroundTime* sembol sonra başlar. CAP alanı içinde ise onaylama çerçevelerinin iletimi gecikme slot sınırında başlar. Bu durumda, onaylama çerçevelerinin iletimi veri veya MAC komut çerçevesinin son sembolünün alımında sonra *aTurnaroundTime* ile (*aTurnaroundTime* + *aUnitBackoffPeriod*) sembol arasında bir sürede başlar.

Şekil 3.26’de gösterilen mesaj sıralaması, tek bir mesaj çerçevesinin onaylama isteği ile iletiminin senaryosudur. Bu durumda gönderici cihaz onaylama isteği alt alanı 1 olan veri çerçeveleri gönderir.



Şekil 3.26: Onaylama ile Veri Aktarımı [4]

3.5 Düşük Hızlı Kablosuz Kişisel Alan Ağlarında Gürültü Sinyallerinin Etkisi

Bu alt bölümde Düşük Hızlı Kablosuz Kişisel Alan Ağlarında Alınan Sinyal Güç Göstergesi (RSSI) ve Gürültü Sinyalleri (Signal Noise to Radio, SNR) tanımlanacaktır.

3.5.1 Alınan Sinyal Güç Göstergesi (RSSI)

IEEE 802.15.4 yönlendirme protokolünde ağ düğümler arası ve/veya düğümlerin kendilerine yönlendirme maliyeti atamaları gerekir. Bağlantının yönlendirme maliyetine karar verilirken yaygın olarak uzaklık birimi kullanılır. Bağlantı güvenilirliği, bağlantı gecikme süresi, bağlantının iletme / alma işlemindeki enerji tüketimi de yönlendirme maliyeti ölçütlerindendir. Bağlantı güvenilirliği diğer etkenlerle bağlantı yönlendirme maliyeti belirlenirken ağırlıklı olarak kullanılan önemli bir faktördür. Bağlantı güvenilirliği paketin başarılı/hatalı gönderim oranına veya beklenen iletim sayısı ile (ETX-bağlantı sonunda başarılı gönderilen paket sayısı) ölçülebilir [5].

Genellikle, bağlantı güvenilirliği Alınan Sinyal Güç Göstergesi (RSSI) ile ifade edilir. Alınan Sinyal Güç Göstergesi (RSSI) iletişim kanalındaki paketin iletimi boyunca radyo enerji göstergesidir. Radyo enerji sinyal enerjisi içerdiği kadar gürültü enerjisini de içerir [6].

3.5.2 Sinyal Güç Oranı (SNR)

RSSI sinyal enerjisini belirlemede Sinyal Güç Oranı (SNR) eklenmeden iyi bir gösterge olmayabilir. Sinyal Güç Oranı (SNR) iletişim kanalındaki enerji düzeylerinde sinyal ve güç oranı olarak tanımlanır. Sinyal gücünün azalıp gürültü gücünün artması durumunda iletişim kalitesi azalır ve sinyallerde bozulmalar artar.

3.5.2.1 Modülasyon Tekniklerine Göre SNR Hesaplanması

Modülasyon tekniklerine göre SNR hesaplamasını belirleyen notasyonlar aşağıda verilmiştir. Tablo 3.38’ de SNR hesaplanırken kullanılan notasyonlar verilmiştir.

Tablo 3.38: SNR Hesaplanırken Kullanılan Notasyonlar [31]

Sabit	Notasyon
Modülasyon Boyutu	M
Sembol Başına Düşen Bit Sayısı	$k = \log_2 M$
Bit Başına Enerjinin Gürültü Güç Spektral Yoğunluğuna Oranı	$\frac{E_b}{N_0}$
Sembol Başına Enerjinin Gürültü Güç Spektral Yoğunluğuna Oranı	$\frac{E_s}{N_0} = k \frac{E_b}{N_0}$
Bit Hata Oranı (BER)	P_b
Sembol Hata Oranı (SER)	P_s

SNR hesaplanırken kullanılan fonksiyonlar Tablo 3.39 ‘da gösterilmiştir.

Tablo 3.40: SNR Hesaplanırken Kullanılan Fonksiyonlar [31]

Fonksiyon	Matematiksel İfade
Q Fonksiyonu	$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$
Marcum Q Fonksiyonu	$Q_M(a, b) = \int_b^{\infty} t * \exp\left(-\frac{t^2 + a^2}{2}\right) I_{M-1}(at) dt$
Birinci dereceden Modifiye Edilmiş Bessel Fonksiyonu	$J_v(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{v+2k} \cdot (-1)^k}{k! \Gamma(v+k+1)}$ Burada Gama Fonksiyonu: $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$

3.5.2.1.1 BPSK, QPSK ve OQPSK Modülasyonları İçin SER Hesaplanması

BPSK(İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama) için bit hata oranı ve sembol hata oranı aşağıda verilmiştir.[31]

$$P_s = P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (3.11)$$

QPSK modülasyonu için bit hata oranı BPSK’da hesaplanan bit hata oranı ile aynıdır. Sembol hata oranı eşitlik 3.11’ de bit hata oranı eşitlik 3.12’ de verilmiştir.

$$P_s = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \left[1 - \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\right] \quad (3.12)$$

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (3.13)$$

OQPSK modülasyonu BER ve SER hesaplaması QPSK modülasyonu ile aynıdır.

4.BÖLÜM

UYGULAMA YAZILIMI

Gürültü sinyalleri iletilen veriler üzerinde bozucu etkiye sahiptir. Bu etki gürültü sinyalinin şiddetiyle orantılıdır. Bu etkiden en az düzeyde etkilenmek için farklı yayılım faktörleri kullanılarak iletim dizilerinden faydalanılır. Bu bölümde sabit uzunluklu yayılım faktörü kullanımı yerine gürültü seviyesine göre adapte olabilen yeni bir kod üretme mekanizması geliştirilmiştir. Mekanizma temel yapıda gürültüsüz ortamlarda daha az dizi bitleri, gürültülü ortamlarda daha çok dizi bitlerini üretir. Diğer bir ifade ile gürültü sinyalinin şiddetine göre yayılım faktörleri değiştirilir.

4.1 Kullanılan Yöntem

Yöntemde performansı belirleyen MAC parametre değerleri Monte Carlo Metodu kullanılarak elde edilmiştir. Veri iletimi IEEE 802.15.4 2003 versiyonu için maksimum çerçeve boyutlarında 2.4 GHz frekans bandında iletişim gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3’de bahsedildiği üzere IEEE 802.15.4 standardı gönderilecek her 4 bilgi bitini bir veri sembolüyle eşleştirilir. Eşleştirilen her sembol 32 çip bitiyle temsil eder. Adaptif yayılım faktörü üretme mekanizmasında her bir sembol için 5,6,7...58 bitlerinden oluşan çip bitleriyle temsil edilmiştir. Farklı çip bitleri IEEE 802.15.4 standardında yer alan 32 çip bit tablosuna komşu bitlerin eklenip çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda 4/5, 4/6, 4/7... 4/58 adaptif yayılım faktörleri elde edilir. Gürültü seviyesi az ortamlar için daha az çip bitleriyle, gürültü seviyesi çok ortamlar için daha çok çip bitleriyle temsil edilen rasgele dizileri ile daha hızlı veri aktarımının sağlanması hedeflenmiştir. Sayısal değerlerin alınmasında Monte Carlo metoduyla işletilen adımlar aşağıda verilmiştir.

Adım 1. Başlatma:

- Popülasyon sayısını (n) 26' ya (Chip Hata Oranı $\in [0, 0.25]$) set et, popülasyondaki her bir komşuluk için (neighbour) 54 'e ve bireyi temsil eden indeksi (packet) 128' e set et,

Adım 2. Popülasyondaki her komşuluk için aşağıdaki işlemleri yap:

Adım 2.1. Popülasyondaki her birey için aşağıdaki işlemleri için;

- MAC çerçeveler için 4 bitlik rasgele semboller üret,
- Bu sembollere ilişkin adaptif kod üretme mekanizması ile kodlamayı gerçekleştir,
- Sağlıklı giden veri miktarını ve iletim süresini hesapla,

Adım 3. Durdurma kriterini değerlendir

- Eğer durdurma kriteri sağlandı ise sonuç verilerini yazdır ve çık (bütün komşuluk değerleri için bu hesaplama yapıldı mı?).
- Her komşuluk değeri için veri aktarım oranının en iyi olduğu yayılım faktörünü not et

Adım 4. Diğer durumda çalışmaya devam et,

1. Popülasyon komşuluk değerini (neighbour) bir artır ve adım 2' ye git.

Çalıştırılan algoritmanın detaylı adımları, sonuçlar alındıktan sonra elde edilen karşılaştırmalar ve grafiğe aktarma işlemi devam eden alt bölümlerde verilmiştir.

4.2 Uygulama Mimarisi

Uygulama, slotsuz IEEE 802.15.4 haberleşmesinde karşılıklı olarak veri transferinde noktadan noktaya (peer to peer) düğümler için geliştirilmiştir. Uygulama her bir gürültü seviyesi için bütün komşuluk değerlerinde koşutularak sağlıklı gönderilen veri paketleri ve bunların iletim süreleri alınarak iyi veri aktarım oranına sahip yayılım faktörleri elde edilmiştir.

4.2.1 Ana Fonksiyon

Ana fonksiyon Bölüm 4.1’ de tanımlanan adımların işletildiği kısımdır. Şekil 4.1’ de fonksiyonda veri transferi için gerekli parametreler yer almaktadır.

```
%Sabitler
DADR=0;
%kaynak adres değeri
SADR=0;
%hedef adres değeri
packet_number=128;
%gönderilecek paket sayısı
payloadSize=102;
%gönderilecek veri yükü büyüklüğü (bayt)
ChipErrorRate=0:0.01:0.25;
%test edilecek çip hata oranı aralığı
Max_Throughput=[];
%belirli bir hata oranı için
%en yüksek verimlilik oranı
Max_CodeRate=[];
%belirli bir hata oranı için
%en yüksek verimliliğin elde edildiği yayılım
```

Şekil 4.1: Ana fonksiyonda parametre değerleri

Ana fonksiyonda Monte Carlo metoduyla işletilen adımlar Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.

```

%Her Bir Chip Error Rate Değeri İçin
for i=1:length(ChipErrorRate)
%Her Bir Komşuluk Değeri İçin
    for neighbour=1:54

        %CSMA'nın yapılandırılması
        csma = configure_csma_neighbour(neighbour);
        csma.ChipErrorRate=ChipErrorRate(i);

        %Paket_iletimi
        for j=1:packet_number
            packet = create_packet(payloadSize, DADR, SADR);
            stats = [stats csma_transmit_neighbour(csma,packet,neighbour)];
        end

        %T'nin Hesaplanması
        %Toplam Gönderilen Bit ve Zamanın Hesaplanması
        for k=1:length(stats)
            %Toplam
            %Gonderilen_Paket=Gonderilen_Paket+Gönderilen Bit Sayısı

            if(stats(1,k).receivedDataSize==bit)
                received_bit=received_bit+bit;
            end
            %Zamanın Hesaplanması

            zaman=zaman+stats(1,k).time;

        end
        T=received_bit/zaman;
        Throughput=[Throughput T];
        deger=[deger stats];
        received_bit=0;
        received_bit=0 T=0; zaman=0; stats=[];

    end%for neighbour=1:54

    Max_T=0; Max_Rate=0;

    for j=1:length(Throughput)
        if(Throughput(j)>Max_T)

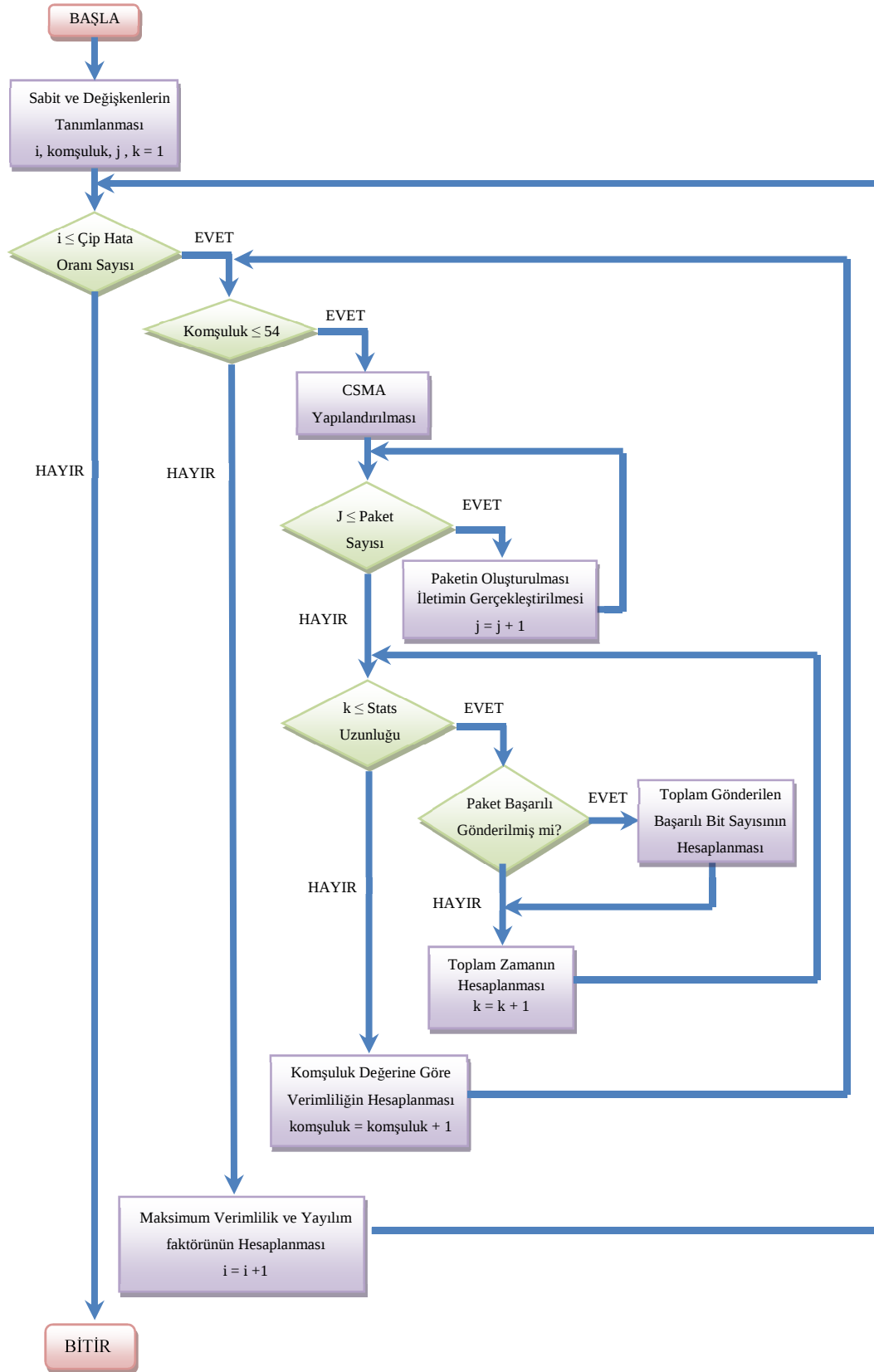
            Max_T=Throughput(j);
            Max_Rate=j;

        end
    end
end

```

Şekil 4.2: Ana fonksiyon

Fonksiyonun algoritma şeması Şekil 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.3: Ana fonksiyon Algoritma Şeması

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere her bir çip hata oranı için 54 farklı komşuluk değeri çalıştırılmıştır. Burada;

1. Çip Hata Oranı [0,0.25] aralığında 0,0.01,0.02... 0.25 değerleri 26 farklı değer için program çalıştırılmaktadır.
2. Komşuluk değeri (neighbour) 1 için 4/5 (4 bitlik sembol / 5 bit büyüklüğünde çip) yayılım faktörünü, komşuluk değeri (neighbour) 2 için 4/6 (4 bitlik sembol / 6 bit büyüklüğünde çip) yayılım faktörünü, komşuluk değeri (neighbour) 3 için 4/7 (4 bitlik sembol / 7 bit büyüklüğünde çip) yayılım faktörünü, ve bu şekilde oranlar devam eder. Komşuluk değeri (neighbour) 54 için 4/58 (4 bitlik sembol / 58 bit büyüklüğünde çip) yayılım faktörünü temsil eder.
3. Her çalıştırılan komşuluk değeri için o anki çip hata oranına göre CSMA IEEE 802.15.4 2003 versiyonuna göre yapılandırılır.
4. Her çalıştırılan komşuluk değeri için 128 adet paket gönderilir.
5. Paketlerin gönderim bilgisini içeren stats değişkeninden toplam başarılı gönderilen bit ve tüm paketlerin gönderimi için geçen zaman bilgisi hesaplanır. Stats (1x128) yığınının içeriği aşağıda verilmiştir.
 - Gönderilme zamanı
 - Alınan Veri Büyüklüğü
 - Gecikme Sayısı (NB)
 - Yeniden Deneme Sayısı

Stats yığınının içeriğine bakılarak paketin kaçınıcı denemeden sonra gönderildiği, alınan pakette başarılı iletilen veri büyüklüğü gibi bilgiler elde edilmiş olur.

6. Çalıştırılan komşuluk değeri için verimlilik hesaplanır.
7. Her komşuluk için hesaplanan verimliliğin maksimum olanı bulunarak test edilen çip hata oranında en iyi veri aktarım oranına sahip yayılım faktörü elde edilir.

4.2.2 CSMA Konfigürasyonu

Fonksiyonda IEEE 802.15.4 slotsuz beacon içermeyen CSMA için konfigürasyon yapılmıştır. Konfigürasyondan yer alan bazı hesaplar ve parametreler Şekil 4.4’de verilmiştir.

```
%250 kbit for codeRate=4/32 (symbol bits / sequence chips)
csma.dataRate = 250e3*(32/4)*(4/(neighbour+4));
%komşuluk değerine göre veri hızı
csma.symbolRate = 62.5e3*(32/4)*(4/(neighbour+4));
%komşuluk değerine göre veri hızı
csma.symbolPeriod = 1/csma.symbolRate ;
%csma sembol periyodu süresi
csma.dataPeriod = 1/csma.dataRate ;
%csma veri periyodu süresi
csma.aMaxBE = 5;
%gecikme üssünde kullanılan maksimum değer
csma.aMaxFrameRetries = 3;
%hata olması durumunda yeniden deneme sayısının maksimum değeri
csma.aUnitBackoffPeriod = 20*csma.symbolPeriod;
%gecikme periyodunun sembol süresi cinsinden değeri
csma.MacAckWaitDuration = 120*csma.symbolPeriod;
%onay mesajının gelmesi için beklenen
%maksimum süre
csma.CCAPeriod = 8*csma.symbolPeriod;
%CCA prosesinde kanal dinleme süresi
csma.macMaxCSMABackoffs = 4;
%kanal erişim hatası verilmeden önce yapılan
%maksimum gecikme sayısı
csma.macMinBE = 3;
%gecikme üssünün minimum değeri
```

Şekil 4.4: CSMA Konfigürasyonu

Şekil 4.4’ de ifade edildiği üzere:

Her bir komşuluk değeri için ayrı veri hızı ve sembol hızı hesaplanmıştır.

Burada:

1. Yayılım faktörü 4/32 için slotsuz beacon içermeyen IEEE 802.15.4’de veri hızı 250 kbit’tir. Ancak komşuluk analizinde bu yayılım faktörleri değişeceğinden (4/5, 4/6 ,4/7,...,4/58) her bir yayılım faktörü için ayrı veri hızı hesaplanması gerekmektedir.

Örneğin 4/5 yayılım faktörüne sahip kodlama kullanılacak komşuluk için komşuluk değeri 1 olduğundan,

$\text{csma.dataRate} = 250 \times 10^3 \times (32/4) \times (4/(\text{neighbour}+4))$; formülü uyarlanırsa:

$\text{csma.dataRate} = 250 \times 10^3 \times (32/4) \times (4/(1+4))$; 'den 1600 kbit olarak hesaplanır. Bu hesaplamaya dayanarak gürültüsüz ortamda standart DSSS kodlamasına kıyasla $(4/5)/(4/32)=6.4$ daha hızlı veri oranı elde edilir.

2. Yayılım faktörü 4/32 için slotsuz beacon içermeyen IEEE 802.15.4'de veri hızı 62.5 kbit'tir. Ancak komşuluk analizinde bu yayılım faktörleri değişeceğinden (4/5, 4/6 ,4/7, ...,4/58) her bir yayılım faktörü için ayrı veri hızı hesaplanması gerekmektedir. Örneğin 4/5 yayılım faktörüne sahip kodlama kullanılacak komşuluk için komşuluk değeri 1 olduğundan,

$\text{csma.symbolRate} = 62.5 \times 10^3 \times (32/4) \times (4/(\text{neighbour}+4))$; formülü uyarlanırsa:

$\text{csma.dataRate} = 62.5 \times 10^3 \times (32/4) \times (4/(1+4))$; 'den 400 kbit olarak hesaplanır. Bu hesaplamaya dayanarak gürültüsüz ortamda standart DSSS kodlamasına kıyasla $(4/5)/(4/32)=6.4$ daha hızlı sembol oranı elde edilir.

3. CSMA konfigürasyonunda kullanılacak parametre değerleri girilmiştir.

4.2.3 Paketin Oluşturulması

Fonksiyonda gönderilecek paketin içeriği oluşturulmuştur. Şekil 4.5’ de paket içeriğinin oluşturulması ile ilgili adımlar gösterilmiştir.

```
%MAC katmanı tanımlamaları
packet.MAC.MPDU.FCF = [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0];
    %çerçeve kontrol alanı (IEEE 802.15.4 de
    %sabit olarak tanımlanmıştır.)
    %çerçeve veri tipi "001" %güvenlik desteği: yok:"0"
    %bekleyen çerçeve "0"(ek veri yok),"onay isteği: var "1"
    %iç PAN: PAN adres içermemelidir "1" ,Bit 7-9 ayrılmış "000"
    %kaynak adres alanı: kısa 16 bit "10",Bit 12-13 ayrılmış "00"
    %hedef adres alanı: kısa 16 bit "10"

packet.MAC.MPDU.DSN = ceil(2*rand(1,8))-1;
    %başlangıç veri dizisi numarası, bu değer rasgele seçilir
    %her veri iletimi için, ACK ile ilişkilendirilmelidir.

sDADR=dec2bin(DADR) ; MSBs='0000000000000000'; sDADR=[MSBs(1:(16-
length(sDADR))) sDADR];
packet.MAC.MPDU.DADR = str2bin(sDADR);
    %kısa adres olarak verilen kaynak adresin başlangıç değeri

payload = ceil(2*rand(1,8*payloadSize))-1;
packet.MAC.MPDU.MSDU = payload;
    %veri yükünün oluşturulması
packet.MAC.MPDU.FCS = calculate_fcs([packet.MAC.MPDU.FCF
packet.MAC.MPDU.DSN packet.MAC.MPDU.DADR packet.MAC.MPDU.SADR
packet.MAC.MPDU.MSDU]);
    %her iletimde hesaplanacak olan çerçeve kontrol dizisi alanı
%PHY katman tanımlamaları
%Sabit tanımlamalar
packet.PHY.PPDU.PRE = zeros(1,32);
    %önsöz

packet.PHY.PPDU.SFD = [1 0 1 0 0 1 1 1];
    %Başlangıç Çerçeve Sınırlayıcısı

pnr=payloadSize+9;
    %PSDU(MPDU) 'nun içerdiği bayt sayısını hesaplanması
    %çerçeve büyüklüğü=
    %FCF 2 bayt, DSN=1 bayt, kaynak adres 2 bayt, hedef adres 2
    bayt
    %MAC veri yükü(MSDU) 2 bayt ve FCS 2 bayt

packet.PHY.PPDU.PSDU = [packet.MAC.MPDU.FCF packet.MAC.MPDU.DSN
...
    packet.MAC.MPDU.DADR packet.MAC.MPDU.SADR ...
    packet.MAC.MPDU.MSDU packet.MAC.MPDU.FCS];
    %PSDU içeriğinin oluşturulması
```

Şekil 4.5: Paket içeriğinin oluşturulması

Paket içeriğinin oluşturulmasında aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

1. Paket içeriğindeki MAC alt katmanı tanımlamaları yapılmıştır. Tanımlaması yapılan alanlar:

MAC MPDU Çerçeve Kontrol Alanı: IEEE 802.15.4 tarafından sabit olarak tanımlanmış bir parametredir. [0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0] bit dizisi olarak tanımlanmıştır.

MAC MPDU Dizi Numarası Alanı: Uygulamada rasgele değerlerden oluşturulmuş 1 baytlık alandır.

Kaynak ve Hedef Adres Alanları: 2 bayt olarak tanımlanmış alanlardır.

MAC MPDU MSDU: Veri yükü alanıdır. Uygulamada 102 bayt olarak (maksimum çerçeve boyutu) olarak tanımlanmıştır.

MAC MPDU Çerçeve Kontrol Dizisi Alanı: CRC hesaplama yöntemiyle elde edilen 2 baytlık alandır.

Paket içeriğindeki fiziksel katman tanımlamaları yapılmıştır. Tanımlaması yapılan alanlar:

Önsöz (Preamble): 4 bayt olarak tanımlanan sabit bir değerdir.

Başlangıç Çerçeve Sınırlayıcısı (SFD) : [1 0 1 0 0 1 1 1] olarak tanımlanan sabit bir alandır.

PHR (Fiziksel Başlık): 1 bayt olarak tanımlanan sabit bir alandır.

2. PSDU(PHY Service Data Unit) Alanı oluşturulmuştur. Bu alanda aşağıdaki alt birimler bulunmaktadır.
 - Çerçeve Kontrol Alanı (FCF)
 - Veri Dizi Numarası (DSN)
 - Kaynak Adres (DADR)
 - Hedef Adres (SADR)
 - MSDU (MAC Service Data Unit)
 - Çerçeve Kontrol Dizisi (FCS)

3. Paket verisi oluşturulmuştur. Paket veri alanında aşağıdaki alt birimler bulunmaktadır.

- Önsöz (Preamble)
- Başlangıç Çerçeve Sınırlayıcısı (SFD)
- Fiziksel Başlık (PHR)
- PSDU (PHY Service Data Unit)

Oluşturulan paketin içerdiği bayt alanları Şekil 4.6' da gösterilmiştir.

MAC Katmanı (MPDU)	:	FCF DSN DADR SADR MSDU(payload) FCS
Bit Sayıları	:	2 1 2 2 x 2
Fiziksel Katman (PPDU)	:	PRE SFD PHR PSDU
Bit Sayıları	:	4 1 1 (9+x)

Şekil 4.6: Paket Birimlerin Büyüklüğü (bayt cinsinden)

4.2.4 Paketin İletiminin Gerçekleştirilmesi

Bu fonksiyon paketin başarılı /başarısız gönderimini kontrol ederek paket iletimini gerçekleştirir. Şekil 4.7' de paket iletiminin gerçekleştirilmesi ile ilgili adımlar gösterilmiştir.

```

%Kanal erişimi yapılması
while (NB<=csma.macMaxCSMABackoffs)
    stats.time = stats.time + delay(BE, csma.aUnitBackoffPeriod);
    stats.time = stats.time + csma.CCAPeriod;
    if (rand<=csma.clearChannelProbability)
        success = 1;
        break;
    end
    NB = NB + 1;
    BE = min( (BE+1), csma.aMaxBE);
end
stats.NB = NB;

%Paket Gönderiminin Gerçekleştirilmesi

while((transmissionRetry<=csma.aMaxFrameRetries)&&((receiveDataResult==0)|
| (receiveAckResult==0)) )

    %Paket iletimi
    transmittedData = transmit_data_neighbour(packet.data,
csma.collissionChannelProbability, csma.ChipErrorRate,neighbour);
    stats.time = stats.time + packet.dataSize*csma.dataPeriod;
    receiveDataResult = receive_data(transmittedData);

    if(receiveDataResult==0)
        stats.time = stats.time +csma.MacAckWaitDuration;
        %max duration for ack wait
        transmissionRetry = transmissionRetry +1;
        continue;
    end

    %Onayın oluşturulması
    ackFCS = calculate_fcs(packet.data(49:72));
    %FCS, FCF+DSN kullanılarak hesaplanır

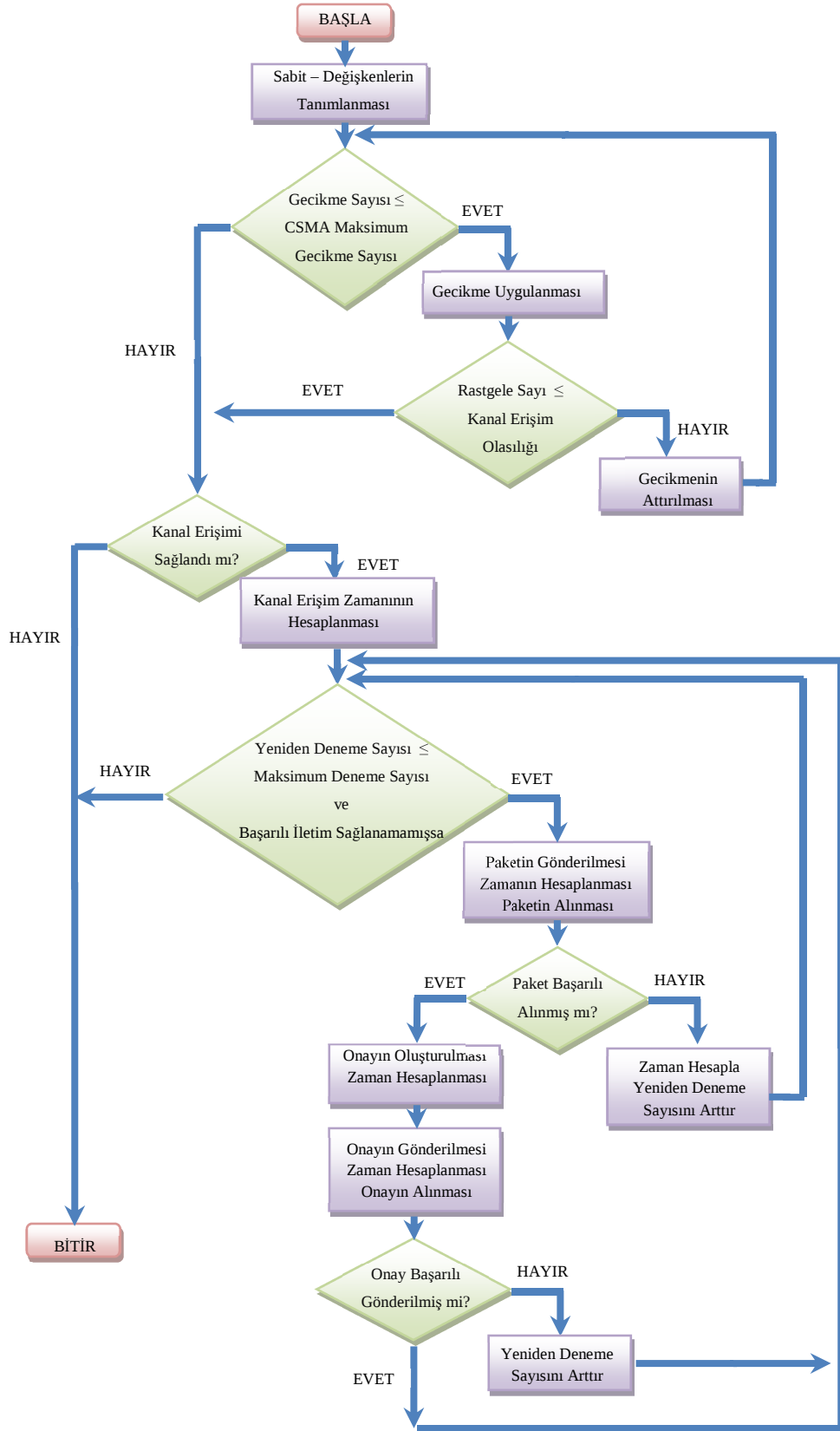
    %Onay Alanları
    %PRE+SFD<--data(1:40); PHR<--[0 0 0 0 0 1 0 1];
    FCF+DSN<--data(49:72); FCS<--ackFCS;

    ackData = [packet.data(1:40) 0 0 0 0 0 1 0 1
packet.data(49:72)ackFCS]
    stats.time = stats.time + csma.MacAckDuration;
    %Onayın gönderilmesinden sonra onay iletim zamanının eklenmesi
    ackData = transmit_data_neighbour(ackData,
csma.collissionChannelProbability, csma.ChipErrorRate,neighbour);
    stats.time = stats.time + 88*csma.dataPeriod;
    %ACK çerçeve uzunluğu 88 bitten oluşmaktadır.

```

Şekil 4.7: Paket İletimin Gerçekleştirilmesi

Paket iletiminin gerçekleştirilmesinin akış şeması Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8: Paket İletimin Gerçekleştirilmesi Algoritma Şeması

Paketin hedef adrese gönderilmesinde Şekil 4.8’de gösterilen adımlar takip edilir.

1. Kanal erişimi gerçekleştirilir. Burada eğer kanal erişiminde gecikme sayısı (NB) değeri CSMA ‘da tanımlanan kanal erişimi yapılmadan maksimum gecikme sayısından küçükse CCA periyodu ve gecikme periyodu toplam süreye eklenerek kanal erişimini başarılı olarak tanımlar.
Eğer kanal erişiminde gecikme sayısı (NB) değeri CSMA ‘da tanımlanan kanal erişimi yapılmadan maksimum gecikme sayısından büyükse gecikme sayısını ve gecikme periyodu üstel değerinin değeri arttırılır. Eğer gecikme periyodu üstel değeri CSMA da tanımlanan maksimum gecikme periyodu üstel değerinden (IEEE 802.15.4’de 3 olarak tanımlanmıştır) büyükse paket gönderimi başarısız olacaktır.
2. Paket verisi çip bitlerine dönüştürülerek iletimi gerçekleştirilir. Paket verisinin sözde rasgele gürültü dizileriyle ifade edilmesi 4.2.5 alt başlığında anlatılacaktır. Paketin hatalı/hatasız gönderimi kontrol edilir. Eğer paket gönderimi başarısız olursa yeniden deneme sayısı arttırılır. Eğer yeniden deneme sayısı, hatalı gönderim durumunda maksimum yeniden deneme sayısından büyük olursa (*aMaxFrameRetries*) paket gönderimi başarısız olacaktır.
3. Onayın iletimi gerçekleştirilir. Onay için çerçeve kontrol dizisi hesaplanır. Onay gönderilir. Onayın hatalı/hatasız gönderimi kontrol edilir. Eğer onay gönderimi başarısız olursa yeniden deneme sayısı arttırılır. Eğer yeniden deneme sayısı, hatalı gönderim durumunda maksimum yeniden deneme sayısından büyük olursa (*aMaxFrameRetries*) paket gönderimi başarısız olacaktır.

4.2.5 Paket Verisinin İşletilmesi

Bu fonksiyon paket verisi işletilerek sözde rasgele gürültü dizilerine dönüştürür. Fonksiyon adımları Şekil 4.9’ da gösterilmiştir.

```

if(rand<collisionProbability)
    data = 0 * data;
end
%Çarpışma olasılığı test edilir.
processedData = data(33:end);
%preamble kısmı çıkartılır

symbolSize = numel(processedData)/4;
%sembol büyüklüğünün bulunması

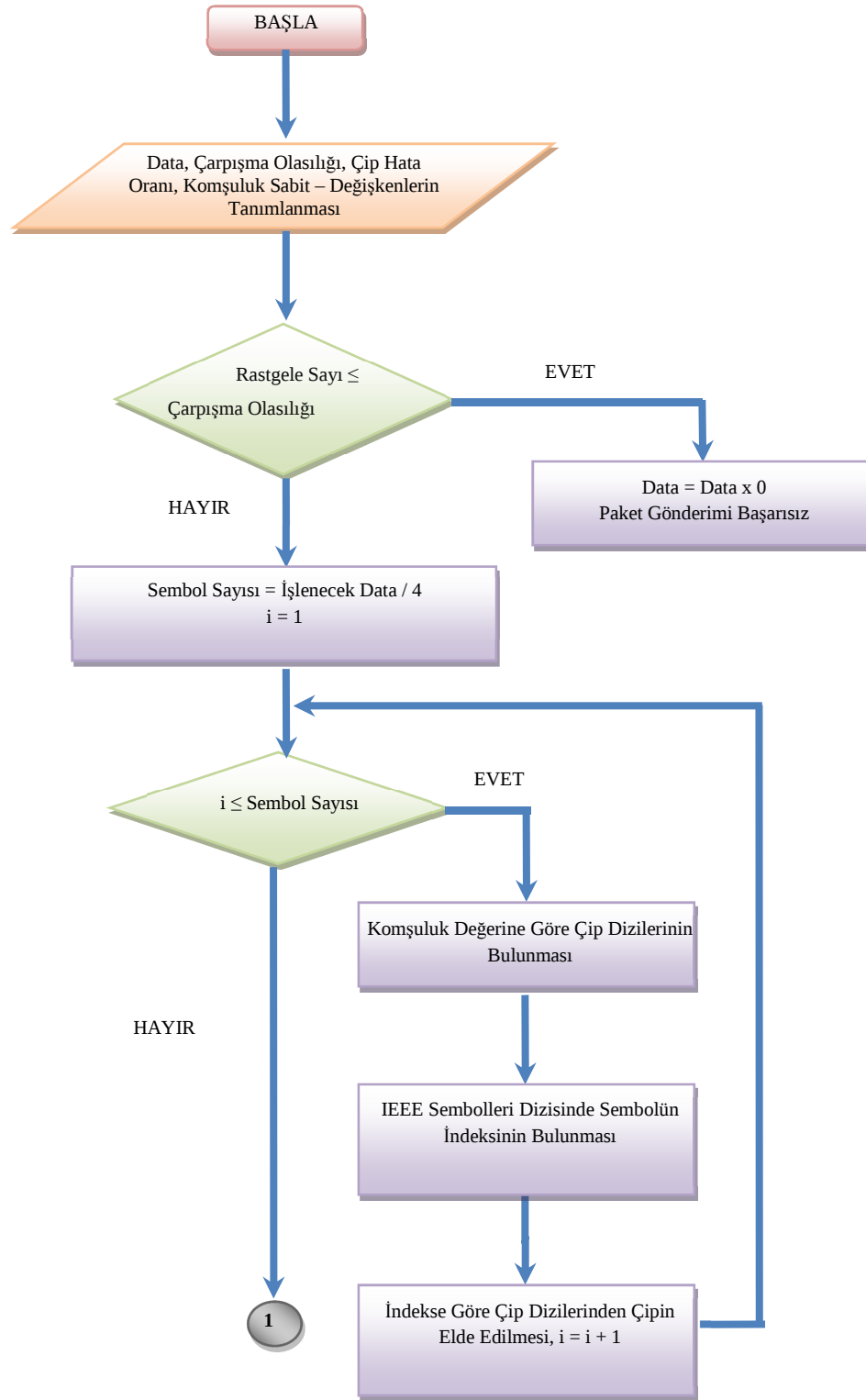
for i=1:symbolSize
    sequence=[sequence chipSequenceNeighbour
        (processedData(4*(i-+1:4*i),neighbour)];
    %Semboller cip bitleriyle eşlenmesi
end;
sequence = xor( sequence, (rand(1,numel(sequence))<chipErrorRate)
);
%gürültü sinyallerinin etkisiyle cip hatası oluşması
sequenceSize=SequenceSizeFind(neighbour,sequence);
%Kaç adet adaptif PN Dizisi üretildiğinin bulunması
for i=1:sequenceSize

processedData=processedDataFind(i,neighbour,processedData,sequence

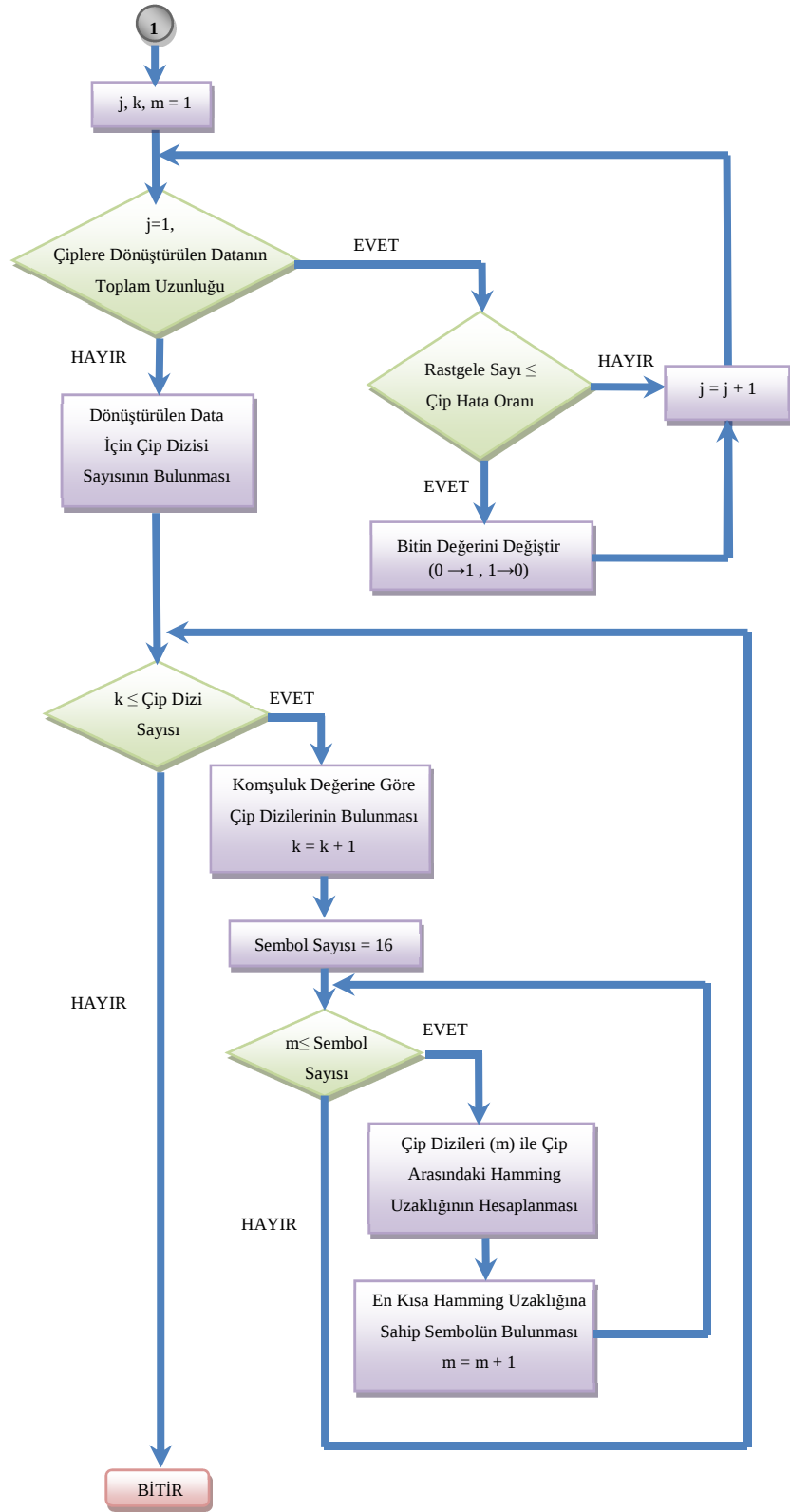
```

Şekil 4.9: Paket Verisinin İşletilmesi

Paketin verisinin işletilmesinde Şekil 4.10' da gösterilen algoritma şeması takip edilmiştir.



Şekil 4.10: Paket Verisinin İşletilmesi Algoritma Şeması



Şekil 4.9: Paket Verisinin İşletilmesi Algoritma Şeması (devamı)

Paketin verisinin işletilmesinde Şekil 4.9'da gösterilen adımlar takip edilir.

1. Rasgele bir sayı üretilerek çarpışma olasılığı test edilir. Eğer üretilen sayı çarpışma olasılığından büyükse çarpışma gerçekleşir ve paket gönderilemez.
2. Paket verisinden önsöz (preamble) kısmı çıkartılarak sembollere dönüştürülecek veri elde edilir. (processData)
3. Sembol sayısı hesaplanır. Her 4 bilgi biti bir sembol olarak ifade edildiğinden processData'nın uzunluğu 4'e bölünür.
4. Elde edilen sembol sayısınınca sırasıyla her 4 bilgi biti (1 sembol) o komşuluğa göre uygun çip bitleriyle chipSequenceNeighbour fonksiyonu ile eşlenir. Bu fonksiyonun adımları 4.2.7 bölüm başlığı altında ele alınacaktır.
5. Sembollerden elde edilen sözde rasgele gürültü dizileri büyüklüğü kadar rasgele sayı üretilerek çip hata oranı ile karşılaştırılır. Elde edilen rasgele sayı çip hata oranından büyükse ortamdaki gürültü sinyalleri nedeniyle ilgili bitin bozulmaya uğradığı kabul edilir. Örneğin elde edilen 2'inci sözde rasgele dizisinin 5.biti için elde edilen rasgele sayı çip hata oranından büyükse; bu bitin değeri 1 ise 0, 0 ise 1 olarak gürültü nedeniyle bozulmaya uğrar.
6. Aşağıdaki formülde rasgele gürültü dizisi c^t , iletim fonksiyonu τ , r^t çip dizisinin üretilmesini ve n komşuluk değerini ifade eder. İletim sırasında c^t çipin durumu için üretilen olasılık değerine göre ς ile tanımlanan bir etkiye uğrar.

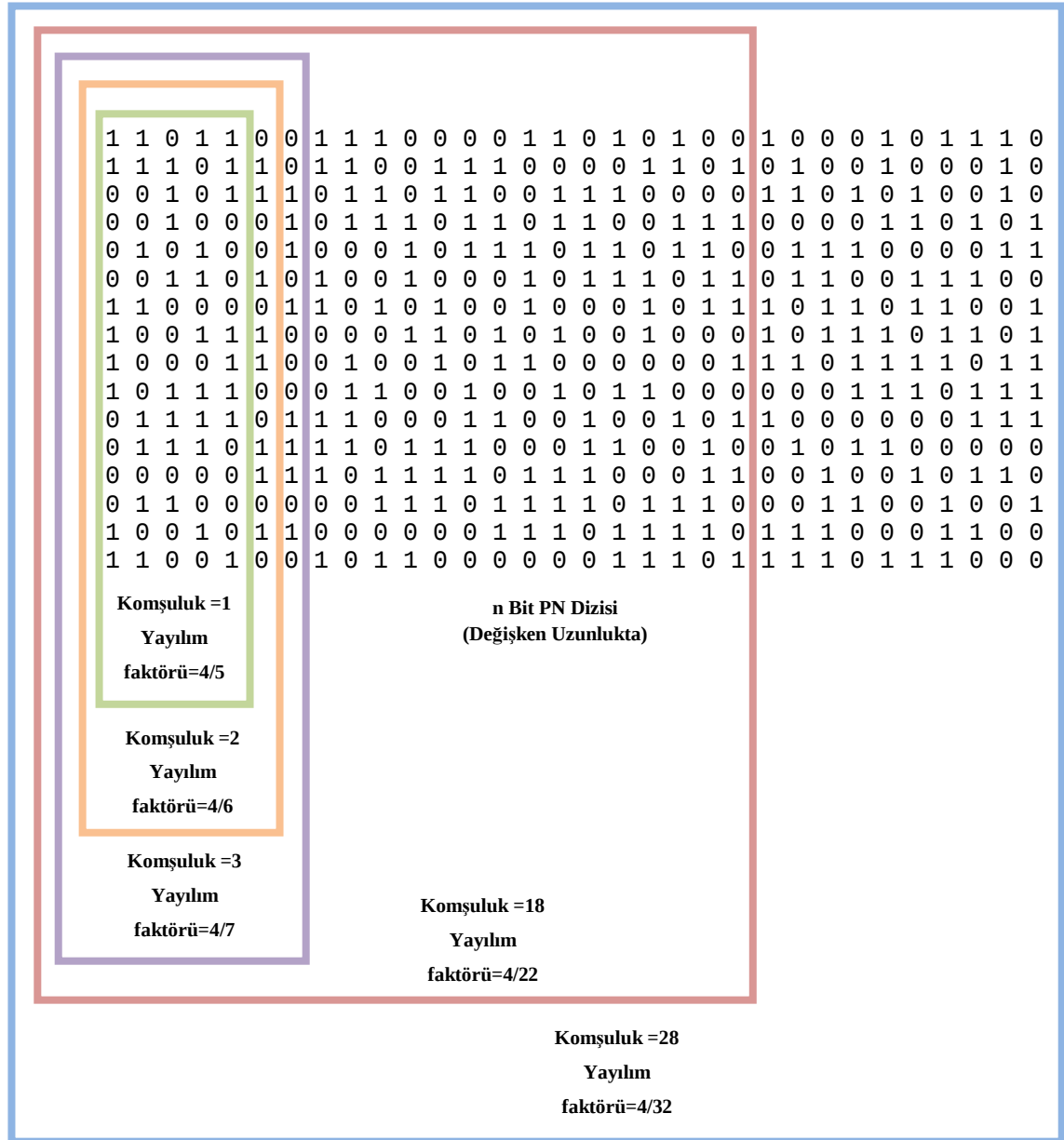
$$\begin{aligned}
 \tau(c_i^t) &= w_i \oplus c_i^t \\
 &= r_i^t \quad n = 1 \text{ ise } i = 1,2,3,4,5 \\
 &\quad n = 2 \text{ ise } i = 1,2,3,4,5,6 \\
 &\quad n = 3 \text{ ise } i = 1,2,3,4,5,6 \\
 &\quad \dots \\
 &\quad n = 54 \text{ ise } i = 1,2,3,4,5,6, \dots, 58
 \end{aligned}$$

$$w_i = \begin{cases} 1, & rad_i^t \geq p \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.2)$$

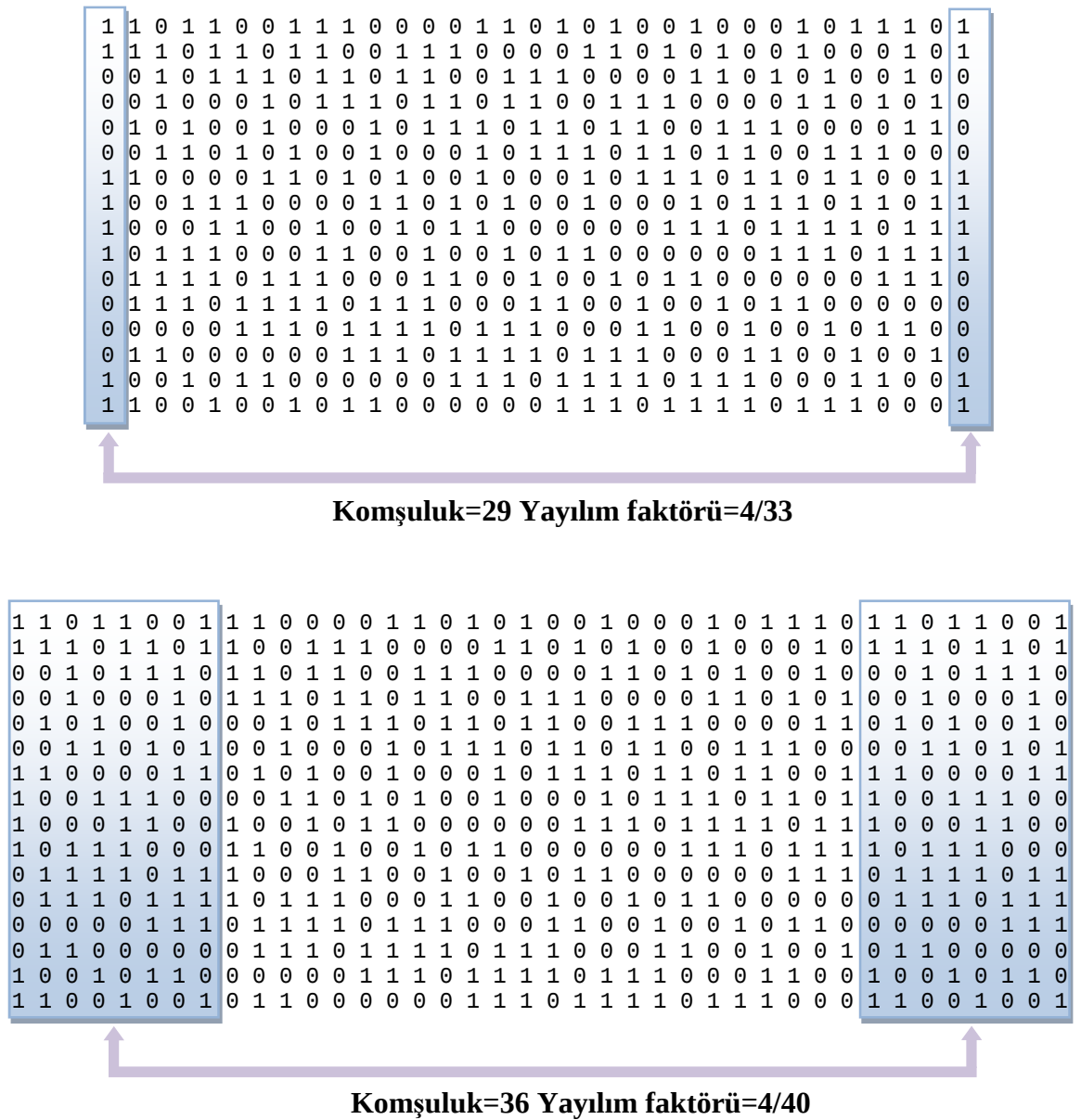
(4.2) de verilen denklemde i sözde rasgele gürültü dizisini indeks bilgisini, rad_i^t t zamanda üretilen $[0,1]$ aralığındaki rasgele değeri ve w_i sözde rasgele gürültü

4.2.7 Adaptif Çip Bitleri Dizisinin Bulunması

Bu fonksiyon o anki komşuluk değerine göre Adaptif PN dizilerinin üretim mekanizmasını tanımlar. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 'de adaptif PN dizilerinin nasıl üretildiği gösterilmiştir.



Şekil 4.11: İlk 28 komşuluk için Adaptif PN dizisi üretme mekanizması



Şekil 4.12: 29 ve 36 Komşuluklarında Adaptif PN dizisi üretme mekanizması

IEEE 802.15.4 standardı 32 bit uzunluğunda sabit sözde rasgele gürültü dizisi tanımlamıştır. Her 4 bilgi biti (bir sembol) bu 32 bit sözde rasgele gürültü dizilerine çevrilerek gönderilirler. Fonksiyonda Adaptif PN dizileri yayılım faktörleri 4/5, 4/6, 4/7, ..., 4/58 olacak şekilde tasarlanmıştır. Adaptif PN dizisi üretme mekanizmasında;

1. Çip bit uzunluğu 32 den küçük ve eşit olan PN dizileri standartta tanımlanan PN dizisinden kaç bit uzunluğu kadar tanımlanmışsa o kadar alınmasıyla elde edilir. Örneğin Şekil 4.9'da görüldüğü üzere; komşuluk değeri 1 için çip bit uzunluğu 5

olan sözde rasgele gürültü dizisi (Yayılım faktörü:4/5) standartta tanımlanan PN dizisinin ilk 5 bitinin alınmasıyla elde edilir.

2. Çip bit uzunluğu 32 den büyük olan PN dizileri standartta tanımlanan PN dizisinden kaç bit uzunluğu kadar fazlaysa PN dizisi sol taraftan o kadar bit alınarak elde edilir. Örneğin Şekil 4.10'da görüldüğü üzere; komşuluk değeri 29 için çip bit uzunluğu 33 olan sözde rasgele gürültü dizisi(Yayılım faktörü:4/33) standartta tanımlanan PN dizisine ek olarak soldaki ilk bitinin en sağa eklenmesi ile elde edilir.

Sembolü s^t ve c^t 4 bilgi bitini tanımlayan PN dizisi ve t zaman birimini göstermek üzere sembollerin PN dizilerine dönüştürülmesi aşağıdaki bir M fonksiyonu ile tanımlanabilir.

$$M(s^t) = c^t \quad (4.3)$$

4.2.8 Adaptif Çip Dizi Sayısının Bulunması

Bu fonksiyonda tanımlanan yayılım faktörüne göre kaç adet PN dizisinin üretildiği bulunur. Örneğin yayılım faktörü 4/5 olan çip dizilerinin sayısını bulmak için aşağıdaki formülден yararlanılır.

$$sequenceSize = numel(sequence)/5 \quad (4.4)$$

4.2.9 Adaptif Çip Dizilerinin Sembollere Dönüştürülmesi

Bu fonksiyonda üretilen çip dizileri hamming uzaklık vektörü kullanılarak sembollere dönüştürülmesi sağlanır. Şekil 4.13' de PN dizilerinin sembollere dönüştürülmesi kodları verilmiştir.

```
chipSequences=chipSequenceFind(neighbour);
%0 anki komşuluk değerine göre adaptif çip dizilerinin bulunması
IEEEsymbols=[0 0 0 0; 1 0 0 0; 0 1 0 0; 1 1 0 0;
              0 0 1 0; 1 0 1 0; 0 1 1 0; 1 1 1 0;
              0 0 0 1; 1 0 0 1; 0 1 0 1; 1 1 0 1;
              0 0 1 1; 1 0 1 1; 0 1 1 1; 1 1 1 1];
%IEEE 802.15.4 standardındaki sembol dizisinin tanımlanması
symbolSize=16;
d=[]; %hamming distance vector
%Her sembol için hamming uzaklığının hesaplanması
for j=1:symbolSize
    d=[d sum( xor(sequence,chipSequences(j,:)))];
end
[value idx]=min(d);
```

Şekil 4.13: PN dizilerinin sembollere dönüştürülmesi

PN dizilerinin sembollere dönüştürülmesinde Şekil 4.13’de gösterilen adımlar takip edilir.

1. Fonksiyona girilen komşuluk değerinde göre PN dizileri elde edilir.
2. IEEE 802.15.4 standardında yer alan sembol dizisi tanımlanır.
3. Her sembol için hamming uzaklığı hesaplanarak minimum hamming uzaklığına sahip sembol gönderilir. Alıcı devresine sinyal ulaştığında k-bit uzunluğundaki çip dizileri alıcı tamponunda depolanır. Daha sonra bu diziler 16 geçerli PN dizileriyle karşılaştırılır ve minimum hamming uzaklığına sahip sembol hesaplanır. Hamming uzaklığı alınan çip dizisi ile geçerli bir 16 PN dizileri arasındaki farklılıkların sayısını ifade eder. Hamming uzaklığı (4.3) ile belirtilen denklemdeki gibi hesaplanır.

$$d^j = \sum_{i=0}^k [r_i^t \oplus v_i^j], \text{ burada } d^j \in d^{\rightarrow}, v^j \in v^{\rightarrow}, j \in \{1, 2, \dots, 16\} \text{ ve } k \in \{5, 6, \dots, 58\} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5) ‘de d^j j’inci PN dizisi ile alınan dizi arasındaki uzaklığı, r_i^t t zamanda alınan dizinin i’inci çip değerini ve v_i^j j’inci geçerli PN dizisinin i’inci çip değerini ifade eder. Değerler arasındaki fark genellikle gürültülü kablosuz kanal nedeniyle oluşur. Bir başka deyişle, semboller alınan sinyal ile gerçek (transfer) edilen sinyal arasındaki hamming uzaklığının diğerlerinden daha küçük olduğu kadar doğru tanımlanabilir.

Hamming uzaklığının hesaplanmasından sonra semboller (e^t) PN dizisi ile minimum hamming uzaklığını kullanan aşağıdaki fonksiyonun tersiyle hesaplanabilir.

$$e^t = M^{-1}(v^{\rightarrow}, d^{\rightarrow}) \quad (4.6)$$

4.2.10 Paket Verisinin Kontrol Edilmesi

Bu fonksiyonda gönderilen verinin herhangi bir çarpışma ve hata olmadan başarılı alınmışsa 1 değerini gönderir.

```

receivedSfd = data(1:8);
receivedFcs = data(end-15:end);
%Alınan çerçeve sınır belirleyicisi
%ve çerçeve kontrol dizisinin tanımlanması
calculatedFcs=calculate_fcs(data(17:end-16));
%Geçerli çerçeve kontrol dizisinin hesaplanması
if( isequal(receivedSfd, [1 0 1 0 0 1 1 1])&&...
    isequal(calculatedFcs,receivedFcs) )
    result = 1;
end
%Alınan çerçeve sınır belirleyicisi ve çerçeve kontrol dizisi,
%Geçerli çerçeve sınır belirleyicisi ve çerçeve kontrol dizisi
%ile eşleşirse 1 değerini gönder

```

Şekil 4.14: Paket Verisinin Kontrol Edilmesi

Paket verisinin kontrol edilmesinde Şekil 4.14’de gösterilen adımlar takip edilir.

1. Alınan çerçeve sınır belirleyicisi ve çerçeve kontrol dizisi tanımlanır.
2. Geçerli çerçeve kontrol dizisi hesaplanır.
3. Alınan çerçeve sınır belirleyicisi ve çerçeve kontrol dizisi, geçerli çerçeve sınır belirleyicisi ve çerçeve kontrol dizisi ile eşleşirse 1 değerini, eşleşmezse 0 değerini gönderir.

4.3. Uygulama Sonuçları

IEEE 802.15.4 haberleşmesi karşılıklı olarak veri iletiminde bulunan noktadan noktaya (peer to peer) düğümler için test edilmiştir. Haberleşmede gürültüsüz ortamdan(çip hata oranı =0) ,%0.25 değerine kadar çip hata oranını oluşturan 26 farklı gürültülü ortamda maksimum uzunluklu IEEE 802.15.4 çerçevelerin iletimiyle elde edilmiştir. Her bir gönderimde 102 oktet mesaj bilgisini içeren 128 oktet çerçeve uzunluğu kullanılmıştır. Bu çerçeveler PAN adresleri içermeyecek şekilde kısa kaynak ve hedef adreslemesini(short source and destination addressing mode) destekler.

Uygulamada her bir çip hata oranı için 4/5,4/6,4/7,...,4/58 yayılım faktörleri için 30 defa koşturulmuş ve bunlara ilişkin ortalama değerler alınmıştır. Tablo 4.1’ de her bir koşturulma için en iyi veri aktarım oranına sahip olan yayılım faktörleri verilmiştir.

Tablo 4.1: En İyi Veri Aktarım Oranına Sahip Yayılım Faktörleri

Chip Error Rate	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)
Adım	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0,01	11	12	12	12	11	12	12	11	11	11
0,02	15	15	16	15	16	15	16	16	15	15
0,03	16	16	17	16	17	17	16	17	16	16
0,04	19	20	19	20	20	20	20	19	20	21
0,05	20	22	22	19	20	20	23	20	20	23
0,06	25	25	24	25	22	24	25	25	25	22
0,07	28	25	26	27	27	24	26	25	26	26
0,08	27	27	29	27	31	27	29	30	26	26
0,09	29	30	29	32	31	30	30	32	30	29
0,1	31	35	31	31	31	31	34	33	34	33
0,11	31	35	36	40	38	38	37	36	37	37
0,12	43	39	39	35	37	39	42	41	40	35
0,13	46	45	39	44	43	43	43	45	45	42
0,14	48	44	47	48	47	45	48	50	43	44
0,15	48	48	52	51	52	49	53	50	49	46
0,16	52	54	55	55	56	57	49	53	52	56
0,17	57	57	58	57	56	55	52	57	57	58
0,18	56	58	58	58	57	58	57	58	56	57
0,19	58	58	58	55	58	58	58	57	58	57
0,2	58	58	58	58	57	57	58	58	57	57
0,21	58	58	57	58	57	58	58	58	58	58
0,22	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
0,23	58	58	58	58	58	56	58	58	58	58
0,24	58	58	58	57	58	58	58	58	57	58
0,25	58	55	57	56	55	55	52	57	57	55

Tablo 4.1: En İyi Veri Aktarım Oranına Sahip Yayılım Faktörleri (Devam)

Chip Error Rate	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)
Adım	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0,01	11	11	12	12	11	12	12	11	11	12
0,02	16	15	15	15	16	16	16	16	16	15
0,03	16	16	16	16	16	16	16	16	17	17
0,04	18	20	20	20	20	20	20	19	20	16
0,05	20	20	20	20	22	20	20	20	22	20
0,06	23	25	23	25	22	23	23	25	23	24
0,07	27	25	28	27	27	26	26	26	27	25
0,08	30	26	26	30	26	30	27	30	26	30
0,09	29	30	29	31	30	29	30	30	29	31
0,1	31	31	33	31	31	33	31	34	30	31
0,11	36	38	34	35	31	35	36	40	34	38
0,12	43	38	40	37	37	41	42	37	37	38
0,13	40	43	41	42	43	43	46	37	44	43
0,14	49	45	44	47	48	49	43	48	49	47
0,15	48	48	48	50	50	51	54	47	49	45
0,16	52	57	52	52	56	51	55	52	58	53
0,17	52	57	57	55	55	51	57	56	56	58
0,18	58	55	57	57	56	58	58	58	58	58
0,19	58	58	58	56	58	57	57	56	56	58
0,2	58	56	58	57	58	56	58	57	58	56
0,21	58	58	58	58	57	58	57	58	58	58
0,22	58	58	58	57	58	57	58	58	57	58
0,23	57	58	57	58	57	58	58	57	58	58
0,24	57	57	58	58	58	56	58	58	58	57
0,25	58	52	58	58	58	53	57	58	58	53

Tablo 4.1: En İyi Veri Aktarım Oranına Sahip Yayılım Faktörleri (Devam)

Chip Error Rate	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Code Rate (4/..)	Ortalama
Adım	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
0,01	12	12	11	11	11	12	12	12	12	12	11,56667
0,02	16	16	16	16	15	16	17	16	15	16	15,63333
0,03	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16,2
0,04	18	20	20	20	20	19	20	19	20	20	19,56667
0,05	22	20	22	21	22	20	20	20	22	22	20,8
0,06	25	23	27	25	25	22	25	22	25	25	24,06667
0,07	26	24	28	27	25	25	26	27	26	27	26,16667
0,08	30	30	28	27	28	29	30	26	27	27	28,06667
0,09	30	28	30	30	31	31	31	30	30	31	30,06667
0,1	31	31	30	35	35	35	35	35	31	33	32,36667
0,11	36	35	36	38	37	35	36	36	37	35	36,1
0,12	40	44	35	40	37	39	35	41	39	38	38,93333
0,13	42	43	43	41	40	44	44	45	41	44	42,8
0,14	47	48	48	44	44	48	47	49	45	47	46,66667
0,15	50	48	48	52	54	47	53	48	49	48	49,5
0,16	54	51	57	57	52	52	49	54	56	52	53,7
0,17	58	58	54	56	54	56	55	52	57	56	55,8
0,18	58	56	58	58	58	57	57	58	56	58	57,33333
0,19	58	58	58	58	57	58	58	56	56	58	57,4
0,2	57	58	58	58	58	58	58	57	57	57	57,46667
0,21	58	57	58	58	57	58	58	58	58	58	57,8
0,22	58	58	58	58	58	57	58	58	58	58	57,86667
0,23	58	58	57	58	58	57	56	58	58	58	57,66667
0,24	57	58	58	58	58	58	54	57	58	58	57,56667
0,25	58	58	57	58	58	56	38	56	57	56	55,73333

Adaptif kod üretme mekanizmasıyla teoride veri aktarım hızındaki artış/azalış Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Yayılım Faktörlerinin Standartla Karşılaştırılması

Komşuluk	Yayılım faktörü	IEEE 802.15.4 Standardı	Fark Oranı
1	4/5	4/32	$\frac{4/5}{4/32} \cong 6,4$
2	4/6	4/32	$\frac{4/6}{4/32} \cong 5,333$
3	4/7	4/32	$\frac{4/7}{4/32} \cong 4,571$
4	4/8	4/32	$\frac{4/8}{4/32} \cong 4$
5	4/9	4/32	$\frac{4/9}{4/32} \cong 3,556$
6	4/10	4/32	$\frac{4/10}{4/32} \cong 3,2$
7	4/11	4/32	$\frac{4/11}{4/32} \cong 2,909$
8	4/12	4/32	$\frac{4/12}{4/32} \cong 2,667$
9	4/13	4/32	$\frac{4/13}{4/32} \cong 2,462$
10	4/14	4/32	$\frac{4/14}{4/32} \cong 2,286$
11	4/15	4/32	$\frac{4/15}{4/32} \cong 2,133$
12	4/16	4/32	$\frac{4/16}{4/32} \cong 2$
13	4/17	4/32	$\frac{4/17}{4/32} \cong 1,882$
14	4/18	4/32	$\frac{4/18}{4/32} \cong 1,778$
15	4/19	4/32	$\frac{4/19}{4/32} \cong 1,684$
16	4/20	4/32	$\frac{4/20}{4/32} \cong 1,6$
17	4/21	4/32	$\frac{4/21}{4/32} \cong 1,524$

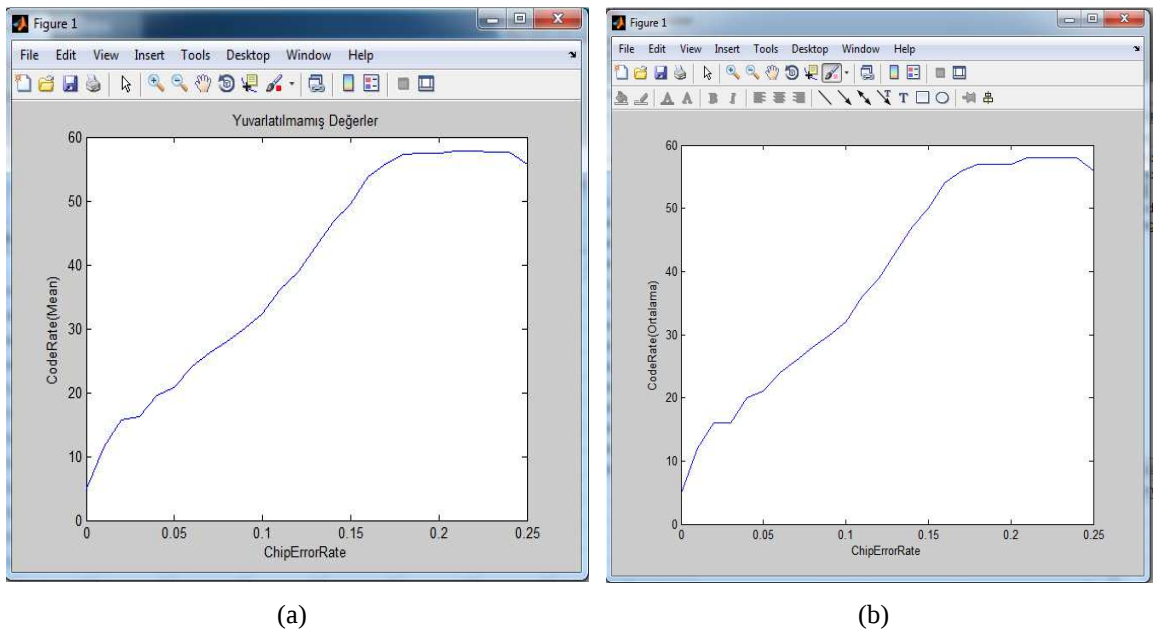
Tablo 4.2: Yayılım Faktörlerinin Standartla Karşılaştırılması (Devam)

Komşuluk	Yayılım faktörü	IEEE 802.15.4 Standardı	Fark Oranı
18	4/22	4/32	$\frac{4/22}{4/32} \cong 1,455$
19	4/23	4/32	$\frac{4/23}{4/32} \cong 1,391$
20	4/24	4/32	$\frac{4/24}{4/32} \cong 1,333$
21	4/25	4/32	$\frac{4/25}{4/32} \cong 1,28$
22	4/26	4/32	$\frac{4/26}{4/32} \cong 1,231$
23	4/27	4/32	$\frac{4/27}{4/32} \cong 1,185$
24	4/28	4/32	$\frac{4/28}{4/32} \cong 1,143$
25	4/29	4/32	$\frac{4/29}{4/32} \cong 1,103$
26	4/30	4/32	$\frac{4/30}{4/32} \cong 1,067$
27	4/31	4/32	$\frac{4/31}{4/32} \cong 1,032$
28	4/32	4/32	$\frac{4/32}{4/32} \cong 1$
29	4/33	4/32	$\frac{4/33}{4/32} \cong 0,97$
30	4/34	4/32	$\frac{4/34}{4/32} \cong 0,941$
31	4/35	4/32	$\frac{4/35}{4/32} \cong 0,914$
32	4/36	4/32	$\frac{4/36}{4/32} \cong 0,889$
33	4/37	4/32	$\frac{4/37}{4/32} \cong 0,865$
34	4/38	4/32	$\frac{4/38}{4/32} \cong 0,842$

Tablo 4.2: Yayılım Faktörlerinin Standartla Karşılaştırılması (Devam)

Komşuluk	Yayılım faktörü	IEEE 802.15.4 Standardı	Fark Oranı
35	4/39	4/32	$\frac{4/39}{4/32} \cong 0,821$
36	4/40	4/32	$\frac{4/40}{4/32} \cong 0,8$
37	4/41	4/32	$\frac{4/41}{4/32} \cong 0,78$
38	4/42	4/32	$\frac{4/42}{4/32} \cong 0,762$
39	4/43	4/32	$\frac{4/43}{4/32} \cong 0,744$
40	4/44	4/32	$\frac{4/44}{4/32} \cong 0,727$
41	4/45	4/32	$\frac{4/45}{4/32} \cong 0,711$
42	4/46	4/32	$\frac{4/46}{4/32} \cong 0,696$
43	4/47	4/32	$\frac{4/47}{4/32} \cong 0,681$
44	4/48	4/32	$\frac{4/48}{4/32} \cong 0,667$
45	4/49	4/32	$\frac{4/49}{4/32} \cong 0,653$
46	4/50	4/32	$\frac{4/50}{4/32} \cong 0,64$
47	4/51	4/32	$\frac{4/51}{4/32} \cong 0,627$
48	4/52	4/32	$\frac{4/52}{4/32} \cong 0,615$
49	4/53	4/32	$\frac{4/53}{4/32} \cong 0,604$
50	4/54	4/32	$\frac{4/54}{4/32} \cong 0,593$
51	4/55	4/32	$\frac{4/55}{4/32} \cong 0,582$
52	4/56	4/32	$\frac{4/56}{4/32} \cong 0,571$
53	4/57	4/32	$\frac{4/57}{4/32} \cong 0,561$
54	4/58	4/32	$\frac{4/58}{4/32} \cong 0,552$

Tablo 4.2’ de görüldüğü üzere alternatif yayılım faktörleri standart DSSS kodlamasına kıyasla teoride gürültüsüz ortamda 6,4 kata kadar daha hızlı veri aktarımını gerçekleştirir. Şekil 4.15’de zamanla artan gürültüye göre kullanılması gereken veri oranları verilmiştir. Bu oranlar bahsedilen adaptif kod üretme mekanizmasıyla üretilmiştir. Verilen çip hata oranına en uygun yayılım faktörü bulunmuştur. Bu oran maksimum veri iletimini gerçekleştiren sembol dizisinin iletim dizisinin boyutuna oranını ifade eder.



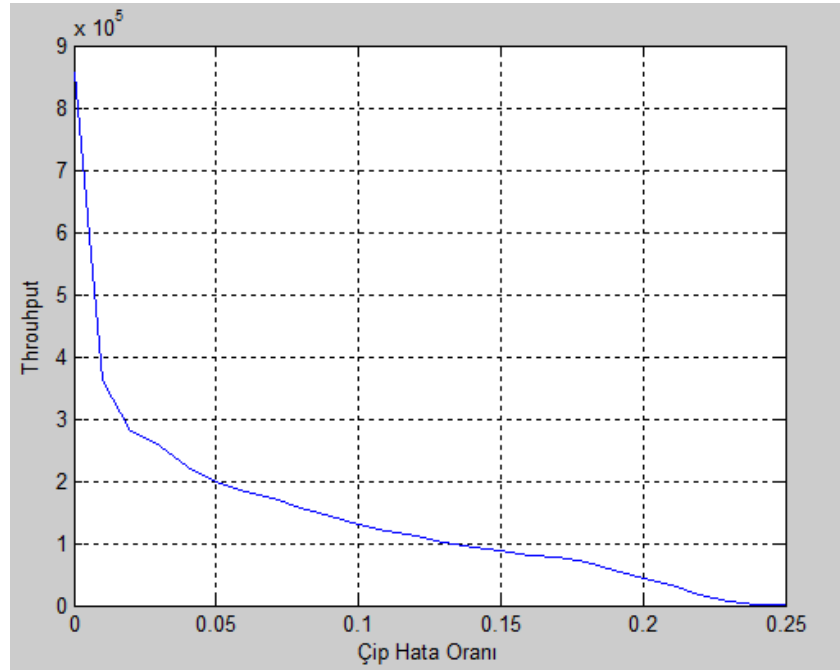
Şekil 4.15: Yuvarlatılmış ve Yuvarlatılmamış Değerlerde Çip Hata Oranı –Yayılım Faktörü Grafikleri

Her bir çip hata oranına göre elde edilen maksimum verimlilik (veri aktarım oranı) miktarları Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3: Çip Hata Oranı Maksimum-Verimlilik Tablosu

Çip Hata Oranı	Maksimum Veri aktarım oranı (4/..)	Maksimum Veri aktarım oranı (4/32)
0	857621,4405	145662,3
0,01	362824,1424	146118,7
0,02	280207,7521	144822,1
0,03	257575,7576	144373,7
0,04	221125,1027	142732,2
0,05	199637,6064	145015,1
0,06	182334,9091	145357,4
0,07	171699,6702	136136,1
0,08	156724,3459	136107,8
0,09	142279,9556	138498,7
0,1	131398,9825	118686,6
0,11	120159,034	100977,6
0,12	111010,7325	82889,27
0,13	102080,5479	55241,98
0,14	94048,49375	33543,29
0,15	87828,11092	16599,87
0,16	81231,91787	5724,805
0,17	78018,93106	1903,127
0,18	69678,1734	536,6218
0,19	57622,92206	0
0,2	42674,78582	0
0,21	31613,79287	0
0,22	16260,95647	0
0,23	7206,92775	0
0,24	2503,989198	0
0,25	602,0917153	0

Şekil 4.16’da veri aktarım oranı çip hata oranı grafiği verilmiştir.

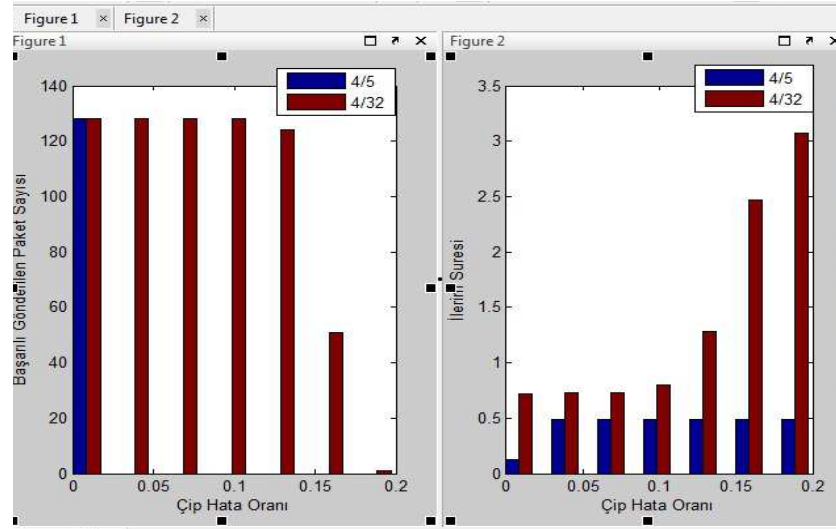


Şekil 4.16: Çip Hata Oranı – Veri Aktarım Oranı (Throuhput) Grafiği

Grafiğe göre çip hata oranı arttıkça verimlilik miktarı düşmüştür. Çip hata oranının 0 olduğu ortamda 857621,4405 gibi bir verimlilik oranı elde edilirken hata oranı 0.25'e yükseltildiğinde bu oran 602,0917153 düşmüştür. Bu nedenle $\frac{857621,4405}{602,0917153} \approx 1424,40$ kat düşmüştür.

4.3.1 4/5 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

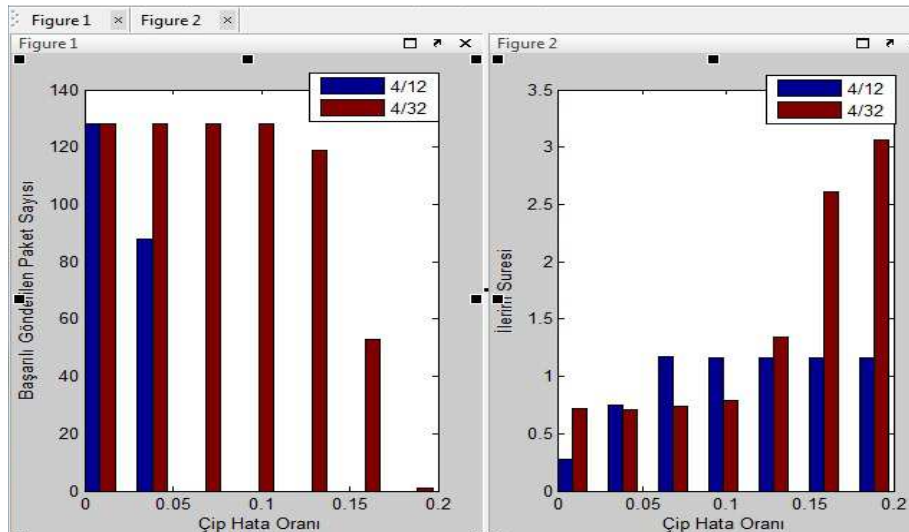
Bu alt bölümde paket gönderimi için adaptif sözde rasgele dizileri 5 bit uzunluğunda oluşturulmuştur. Her bir çip hata oranı için 128 paket gönderilmiştir. Çip hata oranı 0 iken 4/5 yayılım faktöründe 4/32 yayılım faktörüne göre daha kısa sürede paketlerin gönderimini gerçekleştirmiştir. Bu anlamda çip hata oranı 0 iken 4/5 yayılım faktörüne sahip gürültü dizilerinin daha verimli işlediği söylenebilir. Ancak çip hata oranı 0'dan farklı durumlarda 4/5 yayılım faktörüne sahip gürültü dizileri daha kısa sürede IEEE 802.15.4 standartlarına göre maksimum deneme sayısını aştığından iletim gerçekleştirememiştir. Bu durum Şekil 4.17 'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.17: 4/5 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

4.3.2 4/12 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

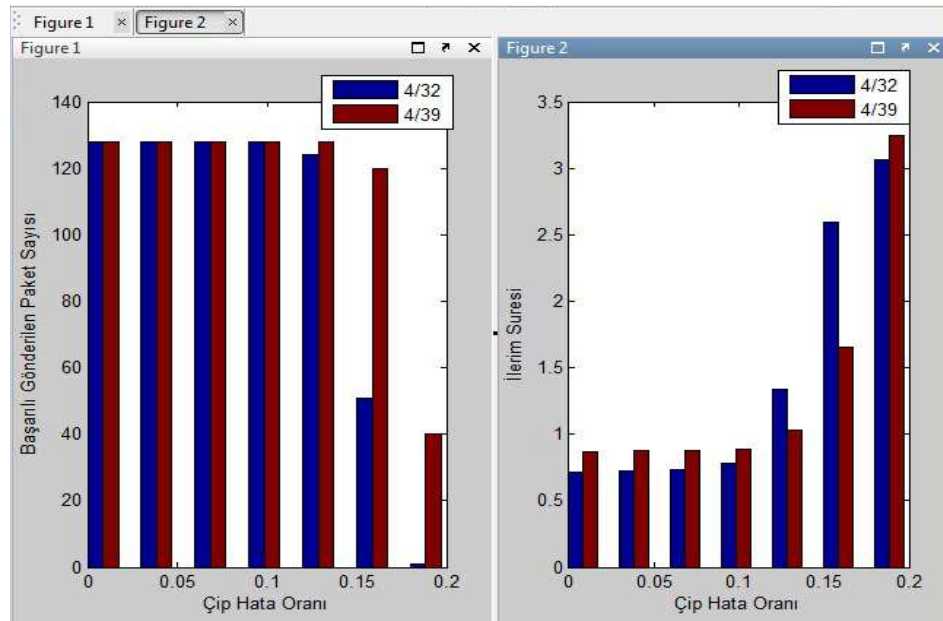
Bu alt bölümde paket gönderimi için adaptif sözde rasgele dizileri 12 bit uzunluğunda oluşturulmuş ve her bir çip hata oranı için 128 paket gönderilmiştir. Çip hata oranı 0 iken 4/12 yayılım faktöründe 4/32 yayılım faktörüne göre daha kısa sürede paketlerin gönderimini gerçekleştirmiştir. Çip hata oranı 0.3 olarak artırıldığında 4/12 gürültü dizileri 88 paket gönderebilmiştir. Çip hata oranının 0.3' den büyük olduğu durumlarda 4/12 yayılım faktörüne sahip gürültü dizileri daha kısa sürede IEEE 802.15.4 standartlarına göre maksimum deneme sayısını aştığından iletim sağlanamamıştır. Bu anlamda çip hata oranı 0 ve 0.3 iken 4/12 yayılım faktörüne sahip gürültü dizilerinin verimli işlediği söylenebilir. Bu durum Şekil 4.18' deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.18: 4/5 ve 4/32 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

4.3.3 4/32 ve 4/39 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

Uygulama 0 ile 0.25 aralığındaki çip hata oranları için 30 koşturma sonucunda maksimum verimliliği sağlayan adaptif sözde rasgele gürültü dizisinin uzunluğunu 39 (yaklaşık değer) olarak belirlemiştir. Bu alt bölümde paket gönderimi için adaptif sözde rasgele dizileri 39 bit uzunluğunda oluşturulmuş ve her bir çip hata oranı için 128 paket gönderilmiştir. Çip hata oranları 0,0.3,0.6 ve 0.9 değerleri için 4/32 yayılım faktörüne sahip sözde rasgele gürültü dizileri, 4/39 yayılım faktörüne sahip gürültü dizilerine göre daha hızlı veri iletimini sağlamışlardır. Ancak 0.12,0.15 ve 0.18 değerleri için 4/39 yayılım faktörüne sahip gürültü dizileri 4/32 yayılım faktörüne sahip gürültü dizilerine göre daha çok paket göndermeyi başarmıştır. Bu sonuçlara bakarak ortamdaki gürültü seviyesi artırıldığında bit uzunluğu artırılarak üretilen sözde rasgele gürültü dizilerinin paket gönderiminde daha başarılı olduğu söylenebilir. Şekil 4.19'da 4/32 ve 4/39 gürültü dizilerinin karşılaştırılması verilmiştir.

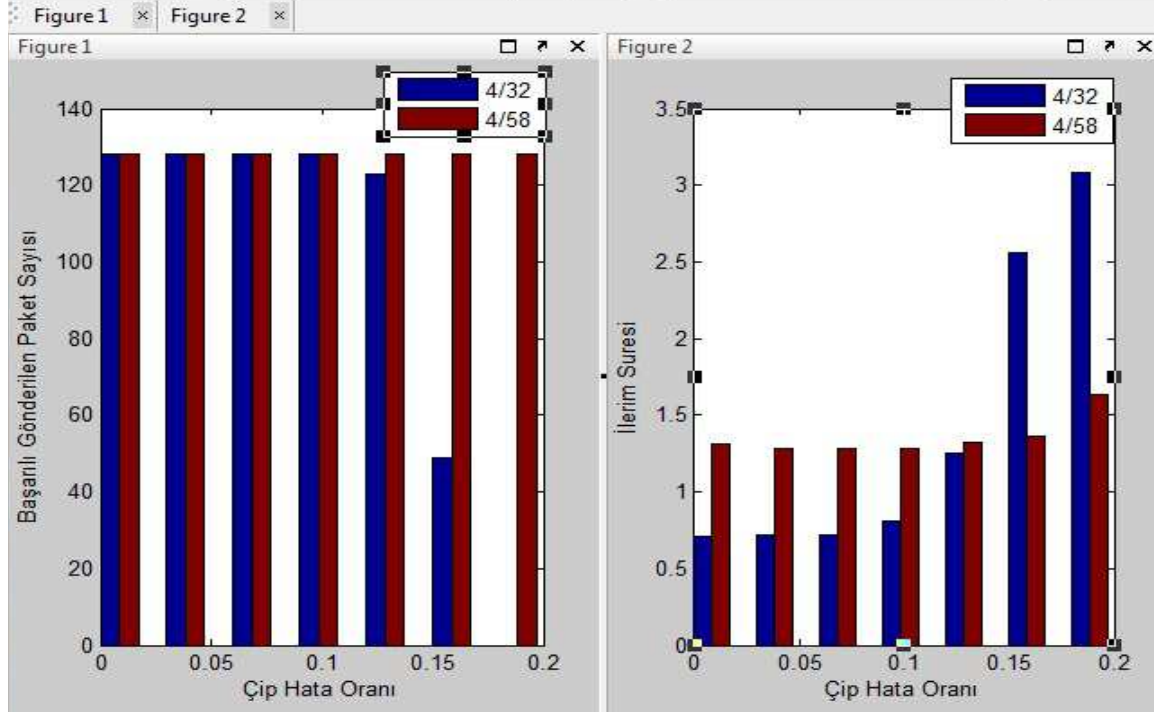


Şekil 4.19: 4/32 ve 4/39 Yayılım faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

4.3.4 4/32 ve 4/58 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

Şekil 4.20' de uygulama için oluşturulan en fazla bit uzunluğuna sahip (4/58 yayılım faktörüne sahip) gürültü dizisi ile 4/32 yayılım faktörüne sahip gürültü dizilerinin kıyaslaması verilmiştir. 4/58 yayılım faktörüne sahip gürültü dizileriyle oluşturulan bütün paketler, bütün çip hata oranları için gönderimi başarılıdır. Ancak uygulama içerisinde daha fazla eşleştirme yapıldığından 4/32 yayılım faktörüne sahip gürültü

dizilerine göre daha yavaş iletim gerçekleştirmiştir. Çip hata oranı 0.18 iken 4/32 yayılım faktörüne sahip gürültü dizileri paket gönderememişlerdir.



Şekil 4.20: 4/32 ve 4/58 Yayılım Faktörlerine Sahip Gürültü Dizileri Karşılaştırması

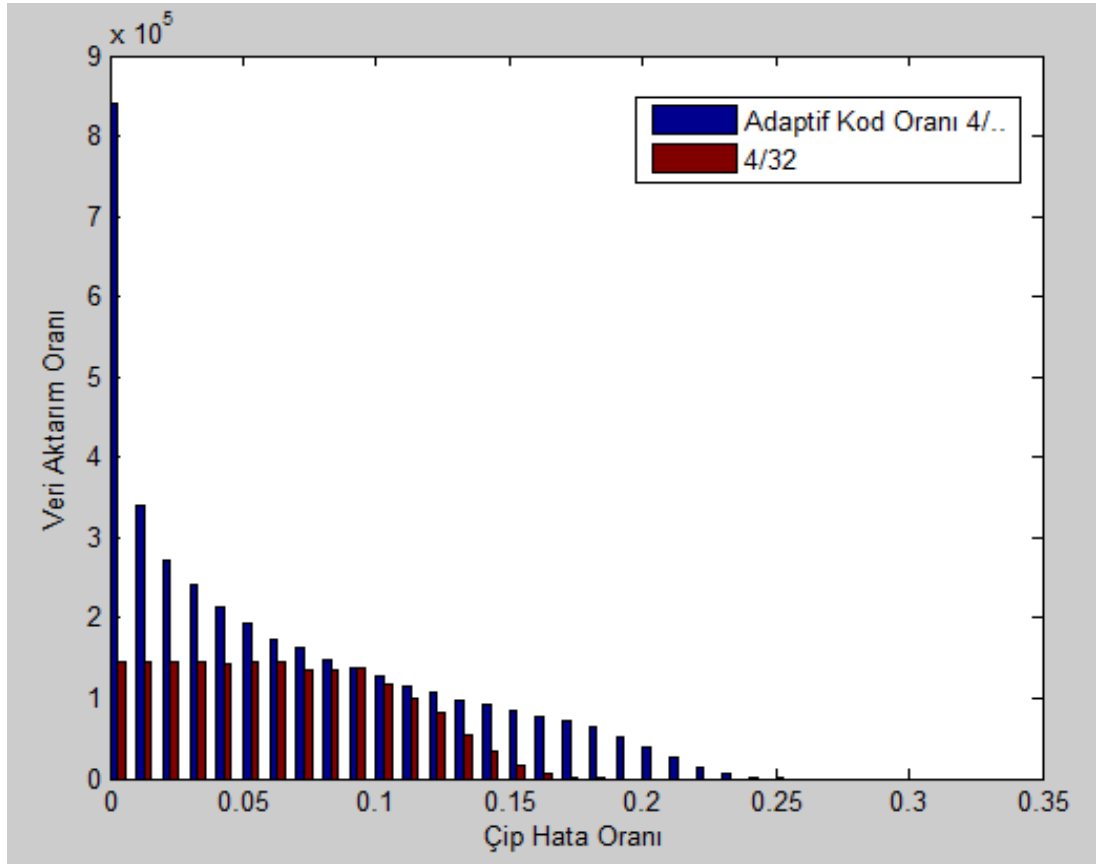
4.3.5 Hata Oranlarına Göre Adaptif Yayılım Faktörleri ve IEEE 802.15.4 Protokolü Yayılım Faktörünün Karşılaştırması

Uygulamada her bir çip hata oranı için (0, 0.01, 0.02, ..., 0.25) üretilen adaptif yayılım faktörlerinden (4/5, 4/6, 4/7, ..., 4/58) en iyi veri aktarım oranına sahip olan 30 koşturma için ortalama yayılım faktörü değeri Tablo 4.4' de verilmiştir.

Tablo 4.4: Her bir ip hata oranı için ortalama yayılım faktörü

Sıra	ip Hata Oranı	Yayılım faktörü
1	0	5
2	0,01	12
3	0,02	16
4	0,03	16
5	0,04	20
6	0,05	21
7	0,06	24
8	0,07	26
9	0,08	28
10	0,09	30
11	0,1	32
12	0,11	36
13	0,12	39
14	0,13	43
15	0,14	47
16	0,15	50
17	0,16	54
18	0,17	56
19	0,18	57
20	0,19	57
21	0,2	57
22	0,21	58
23	0,22	58
24	0,23	58
25	0,24	58
26	0,25	56

Her bir hata oranı için adaptif yayılım faktörlerinin ve IEEE 802.15.4 standardı 4/32 yayılım faktörünün kıyaslanması grafiğı Şekil 4.21’ de verilmiştir.



Şekil 4.21: Her bir çip hata oranı için adaptif yayılım faktörleri ve DSSS(4/32) karşılaştırması

Şekil 4.21’ de görüldüğü üzere üretilen adaptif sözde rasgele gürültü dizileri her bir çip hata oranı için daha yüksek veri aktarım oranına sahiptir. Özellikle çip hata oranı 0 ile 0.05 değerleri arasında veri aktarım oranı DSSS(4/32) kodlamasına göre çok yüksektir.

Çip hata oranı 0 için $\frac{857621,4405}{145662,3} \cong 6$ kat daha yüksek veri aktarım oranı elde edilmiştir.

5. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç ve Öneriler

Uygulama, IEEE 802.15.4 haberleşmesinde slotsuz CSMA/CA kullanan ve karşılıklı olarak veri iletiminde bulunan noktadan noktaya (peer to peer) düğümler için test edilmiştir.

IEEE 802.15.4 standardı DSSS yapısı yayılım faktörü 4/32'den farklı olarak geliştirilen algoritma ile 4/5, 4/6, 4/7,..., 4/58 olmak üzere 54 farklı adaptif sözde rasgele gürültü dizileri oluşturulmuştur.

Her bir sözde rasgele gürültü dizisi farklı çip hata oranları (0, 0.01, 0.02, ..., 0.25) ile test edilerek en iyi veri aktarım oranını sağlayan yayılım faktörleri elde edilmiştir.

Adaptif sözde rasgele gürültü dizileri bit uzunluğu arttıkça paket gönderiminde daha başarılı olduğu görülmüştür. Ancak bit uzunluğu arttıkça paket gönderim süresinin uzadığı görülmüştür.

Her bir çip hata oranı için 128 paket ve her paketin uzunluğu 102 oktet uzunluğunda olduğundan toplam $128 \cdot 102 \cdot 8 \cdot 26 = 2715648$ bit veri gönderilerek uygulama test edilmiştir. Çok büyük boyutlarda veri transferi yapıldığından uygulamanın tamamlanması yaklaşık 12 saat sürmektedir.

IEEE 802.15.4 protokolü, basit karmaşıklıkta donanım ve yazılımlarla gerçekleştirilebilen düşük veri iletimi sağlayan haberleşme standardıdır. Gürültülü ortamlarda veri iletimi başarılıdır. Ancak standartta kullanılan DSSS(32,4) modülasyon tekniği ortamdaki gürültü seviyesinin değişmesinden bağımsız olarak paket gönderir. Dolayısıyla gürültü seviyesi azken daha yüksek bir yayılım faktörü ile gürültü seviyesi fazlayken daha düşük bir yayılım faktörüne sahip gürültü dizileriyle daha hızlı veri

iletimi sağlanabilir. Performansta artışın hangi durumlarda ve ne oranlarda olduğu uygulama çalışmalarıyla elde edilmiştir.

Ortamdaki gürültü seviyeleri gözetilerek üretilen adaptif PN dizileriyle IEEE 802.15.4 protokolünde MAC parametrelerinde dikkate değer artışlar sağlanmaktadır. Ortamdaki gürültü seviyesi az olduğu durumlarda 6 kata kadar başarı sağlanmaktadır.

Önerilen metodun uygulamasında, adaptif yayılım faktörlerini içeren tablo kayıtlarının kullanılması öngörülmüştür. Gelecek çalışmalarda, adaptif yayılım faktörünü üretme mekanizması matematiksel olarak modellenmesi ve gerçek-zamanlı sistemlere uygun yapıda çalıştırılması hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

1. Sönmez, İ., 2007. IEEE 802.15.4 Standardına Uyumlu RF Haberleşme Uygulaması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 114 s.
2. Yamaç, E., 2007. IEEE 802.15.4 LR-WPAN Standardı İle Oluşturulan Uygulamalar, Güvenlik Durumları ve Olası Güvenlik Açıklıkları İçin Bazı Çözüm Önerileri. Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 57 s.
3. Öztaş, Ş., Belen, M., Kaya, İ., Kaya, A., Zigbee teknolojisi kullanılarak kablosuz kafe otomasyon sistemi tasarımı, Kentucky University, 203-206
4. IEEE, (2003), IEEE std. 802.15.4 - 2003: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs)
5. Goyal, M., Prakash, S., Xie, W., Bashir, Y., Hosseini, H., Durresi, A., Wisconsin, U., Evaluating the impact of signal to noise ratio on IEEE 802.15.4 PHY-Level packet loss rate. pp 279-283. *13th International Conference on Network-Based Information Systems, 2010, USA*
6. Couto, D., Aguayo, D. , Bicket, J., Morris, R., 2003. A high veri aktarım oranı path metric for multi-hop wireless routing, **in Proceedings of ACM MobiCom**.
7. Ci, S., Sharif, H. , Nov. 2002, A link adaptation scheme for improving veri aktarım oranı in the IEEE 802.11 wireless LAN, **in Proceedings IEEE LCN02**, pp. 205208.
8. Kim, B.S., Fang, Y., Wong., T.F., 2005, Veri aktarım oranı enhancemenl through dynamic fragmentation in wireless LANs , **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, (54), no. 4, pp.1415-1425.
9. Tourrihes, J., 2000, Dwell adaptive fragmentation: How to cope with short dwells required by multimedia wireless LANs, **in Proceedings IEEE GLOBE-COM00, (1)**, pp. 5761.
10. Ci, S., Sharif, H., Nov.2000, Adaptive approaches to enhance veri aktarım oranı of IEEE 802.11 wireless LAN with bursty channel, **in Proceedings IEEE LCN00**, pp. 4445.

11. Qiao, D., Choi, S., Jun. 2001, Goodput enhancement of IEEE 802.11a wireless LAN via link adaptation, **in Proceedings IEEE ICC01**, (7), pp. 1995–2000.
12. Qiao, D. , Choi, S., Shin, K.G. , , Dec. 2002, Goodput analysis and link adaptation for IEEE 802.11 a wireless LANs, **IEEE Transactions Mobile Computing**, (1), pp. 278291.
13. Yang, L., Alouini, M.S., 2004, On the average outage rate and average outage duration of wireless communication systems with multiple cochannel interferers, **IEEE Transactions Wireless Communications**, (3), pp.1142-1153.
14. Ko, Y.C., Burr, M.R. , Alouini, M.S., Abdi, 2002, A., Average outage duration of interference-limited wireless communication systems, *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference*, pp.1284-1288.
15. Sato, T. , Kawabe , M., Kato, T. , Fukasawa, A. , 1993, Veri aktarım oranı analysis method for hybrid ARQ schemes over burst error channels. **IEEE Transactions Vehicular Technology**, (42), pp.110-118.
16. Wang, H.S. , Chang, P.C. , 1996, On verifying the first-order Markovian assumption for a Rayleigh fading channel model, **IEEE Trans. Veh. Technol.**, 45, pp. 353-357.
17. Shu, F. ,Sakurai, T. , 2011. A new analytical model for the IEEE 802.15.4 CSMA-CA protocol, **Computer Networks**, (55), pp. 2576–2591.
18. Goyal, M., 2011, A stochastic model for beaconless IEEE 802.15.4 MAC operation, **Computer Communications**, (34), pp. 1460–1474.
19. Misic, J. ,Shafi, S. , Misic, V. , 2005, The impact of MAC parameters on the performance of 802.15.4 PAN, **Ad Hoc Networks**, 3, pp. 509–528.
20. Zhu, J. , Tao, Z. , Lv, C., 2012, Performance evaluation for a beacon enabled IEEE 802.15.4 scheme with heterogeneous unsaturated conditions, **International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)**, (66), pp. 93–106.
21. Badia, L. , Baldo, N., Levorato, M. , Zorzi, M., 2010. . A markov framework for error control techniques based on selective retransmission in video transmission over wireless channels. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)**, 28 (3):488–500.

22. Lee, C. Y. , Cho, H., Hwang, G. U., Doh, Y., Park, N., 2011. Performance modeling and analysis of ieee 802.15.4 slotted csma/ca protocol with ack mode. **International Journal of Electronics and Communications**, 65(2):123–131.
23. Park, P., 2013. Duty-cycle optimization for ieee 802.15. 4 wireless sensor networks. **Computer Communications**, 10(1):12–44.
24. Marco, P.D., Park, P., Johansson, K. H., 2012. Analytical modeling of multi-hop ieee 802.15.4 networks. **IEEE Transaction Vehicular Technology**, 61(7): 3191–3208.
25. Du, W., Navarro, D., Mieleveville, F.,2014. . Performance evaluation of ieee 802.15.4 sensor networks in industrial applications. **International Journal of Communication Systems**, Early View, DOI: 10.1002/dac.2756.
26. Wang, F., Li, D., Zhao, Y.,2011. Analysis of CSMA/CA in IEEE 802.15.4. **IET Communications**, 5(15):2187–2195.
27. Zubair, S., Fisal, N., Abazeed, M.B., Salihu, B.A., Khan, A.S., 2013. Lightweight distributed geographical: a lightweight distributed protocol for virtual clustering in geographical forwarding cognitive radio sensor networks. **International Journal of Communication Systems** Early View, DOI: 10.1002/dac.2635
28. Ullah, N., Chowdhury, M. S. , Khan, P., Ullah, S., Kwak, K. S., 2012. Throughput and delay limits of chirp spread spectrum-based ieee 802.15.4a. **International Journal of Communication Systems**, 25(1):1–15.
29. Faridi, A., Palattella, M. R., Lozano, A., Dohler, M., Boggia, G., Grieco, L. A. , Camarda, P., 2010. Comprehensive evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC layer performance with retransmissions. **IEEE Transactions Vehicular Technology**, 59(8):3917–3932.
30. Ech-Chaitami, T., Mrabet, R., Berbia, H., 2011. Interoperability of LoWPANs based on the IEEE 802.15.4 standard through IPv6. **International Journal Computer Science**, 8 (2):315–323.
31. <http://www.mathworks.com/help/comm/ug/bit-error-rate-ber.html#bq422mf>
(Erişim Tarihi: 04 şubat 2014)

32. Karasulu, B. , Toker, L. , Korukoğlu, S., Zigbee-IEEE 802.15.4 standardı temelli kablosuz algılayıcı ağları, Ege Üniversitesi ,Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir
33. Mutagi, R. N., 1996.Pseudo noise sequences for engineers. **Elektronics & Communication Engineering Journal**, pp. 79-87.
34. Ökdem, S.,2014. A Light-Weight Link Quality Measurement Method for IEEE 802.15.4 MAC Operations, **IEEE Transactions On Communications**.
35. Moncunill-Geniz, F.X, Demodulation Capabilities of a DSSS Super Regenerative Receiver .(Web page: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275921 Erişim Tarihi: 12 Mart 2014).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı : Sibel ARSLAN
 Uyruğu : Türkiye (TC)
 Doğum Tarihi ve Yeri : 20 Ocak 1988, Sivas
 Medeni Durumu : Bekâr
 Telefon : +90 346 224 45 45
 Fax : +90 346 225 67 74
 e-mail : sibel.arslan2@icisleri.gov.tr
 Yazışma Adresi : Sivas Valiliği Hükümet Konağı
 Bilgi İşlem Şube Müdürlüğü 2.Kat Sivas/Merkez

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği	2011
Lisans	Kocaeli Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği	2011
Lise	Kongre Lisesi Y.D.A, Sivas	2006

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2012- Halen	Sivas Valiliği Bilgi İşlem Şube Müdürlüğü	Müdür V.
2011-2012	Kocaeli Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce