

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**IEEE 802.15.6 STANDARDI KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞI HABERLEŞMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Müh. Hakan ERDÖL**

**HAZİRAN 2016  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**IEEE 802.15.6 STANDARDI KABLOSUZ VÜCUT ALAN AĞI HABERLEŞMESİ**

**Elektrik Elektronik Müh. Hakan ERDÖL**

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.05.2016**  
**Tezin Savunma Tarihi : 13.06.2016**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. İsmail KAYA**

**Trabzon 2016**

## ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Öncelikle yüksek lisans tezi danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçiminde ve gerekse çalışmaların yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen, akademisyen olma yolunda her türlü bilimsel katkıyı sağlayan sayın hocam Doç. Dr. İsmail KAYA'ya ve aynı şekilde fikirleri ile çalışmalarımnda her zaman destek ve yardımcı olan değerli meslektaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda durup sabırla bana destek olan aileme ve bu süreçte desteklerini esirgemeyen Bilgisayar Mühendisi Eda Sena KARAAĞAÇLI ve Arş. Gör. Ümit ÖZSANDIKCI'ya da ayrıca sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

114E454 numaralı proje kapsamında bu tez çalışmasına maddi destek sunan TÜBİTAK kurumuna teşekkür ederim.

Hakan ERDÖL

Trabzon 2016

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “IEEE 802.15.6 Standardı Kablosuz Alan Ağı Haberleşmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. İsmail KAYA'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim 13/06/2016.

Hakan ERDÖL

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Taraması.....	3
1.3. Haberleşme Teorisi .....	7
1.3.1. Haberleşme Kanalları.....	7
1.3.1.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) Kanal .....	8
1.3.1.2. Rayleigh Kanal.....	9
1.3.2. Modülasyon.....	10
1.3.2.1. Analog Modülasyon .....	10
1.3.2.1.1. Genlik Modülasyonu.....	11
1.3.2.1.2. Frekans Modülasyonu .....	13
1.3.2.2. Sayısal Modülasyon .....	15
1.3.2.2.1. Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying,QPSK) QPSK Modülasyonu .....	16
1.3.2.2.2. Pi/4 Diferansiyel Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Binary Phase Shift Keying, Pi/4 DQPSK ) Modülasyonu .....	17
1.3.2.2.3. Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (Minimum Shift Keying, MSK) Modülasyonu.....	18
1.3.3. Hata Düzeltme Kodları .....	19
1.3.3.1. Bose Chaudhuri Hocquenghem Kodlama.....	19
1.3.4. Hata Algılama .....	20

1.3.4.1.	CRC Hata Algılama Algoritması .....	20
1.3.5.	Heterodin İşlemi.....	21
1.3.5.1.	Üst Çevirici .....	22
1.3.5.2.	Alt Çevirici.....	23
1.3.6.	Eş Zamanlama.....	23
1.3.7.	Kod Yayma Spektrumu.....	24
1.4.	IEEE 802.15.6 Haberleşme Protokolü .....	26
1.4.1.	IEEE 802.15.6 WBAN Veri Paketi Yapısı .....	28
1.4.1.1.	PLCP Girişi .....	28
1.4.1.2.	PHY Başlığı .....	29
1.4.1.3.	HCS ve BCH Eşlik Bitleri .....	30
1.4.1.4.	Fiziksel Katman Servis Veri Ünitesi.....	31
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	32
2.1.	Giriş.....	32
2.2.	Simülasyon Çalışması .....	32
2.2.1.	Monte-Carlo Simülasyonu .....	33
2.2.2.	İşaret Akış Diyagramları .....	33
2.2.2.1.	Ham Verinin İletimi İçin İşaret Akış Diyagramları .....	34
2.2.2.2.	IEEE 802.15.6 WBAN Protokolü İçin İşaret Akış Diyagramları .....	35
2.2.2.3.	IEEE 802.15.4 Standardı İçin İşaret Akış Diyagramları.....	37
2.2.2.4.	Kod Yayma Algoritması ile Geliştirilmiş IEEE 802.15.6 WBAN Protokolü İçin İşaret Akış Diyagramı .....	39
2.2.3.	BCH Kodlama.....	42
2.2.4.	CRC Kodlama .....	42
2.2.5.	Her Veri İçin TBGG ve Rayleigh Kanalları .....	43
2.2.6.	IEEE 802.15.6 İçin Veri Paketinin Oluşturulması .....	44
2.2.7.	Eş Zamanlama İçin Yapılan Çalışmalar.....	45
3.	BULGULAR.....	46
3.1.	Eş Zamanlama Yöntemlerinin Sonuçları .....	46
3.2.	BCH Hata Kodlamanın Bit Hata Oranına Etkisi .....	49
3.3.	CRC Hata Algılamanın Bit Hata Oranına Etkisi .....	51
3.4.	Kod Yayma Algoritmasının Bit Hata Oranına Etkisi .....	53

3.5.	Modülasyon Çeşitlerinin Başarımlarının Karşılaştırılması.....	55
3.6.	Kod Yayma Algoritması Eklenmiş IEEE 802.15.6 ve IEEE 802.15.4..... Protokollerinin Bit Hata Oranı Karşılaştırılması .....	56
3.7.	Hata Dağılım Analizleri .....	58
4.	SONUÇLAR .....	63
5.	ÖNERİLER.....	65
6.	KAYNAKÇA.....	66

ÖZGEÇMİŞ



## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

#### IEEE 802.15.6 Standardı Kablosuz Vücut Alan Ağı Haberleşmesi

Hakan ERDÖL

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. İsmail KAYA  
2016, 65 Sayfa

Bu tez çalışmasında, özellikle tıbbi cihazlar için tasarlanan IEEE 802.15.6 standardını kullanan “Kablosuz Vücut Alan Ağı” (Wireless Body Area Network, WBAN) haberleşme protokolünün fiziksel katmanının çeşitli algoritmalar kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. WBAN protokolünün kablo eşdeğeri güvenilirliği yapılan simülasyon çalışmalarıyla test edilmiştir. WBAN haberleşme protokolünden önce medikal cihazlarda kullanılmak üzere geliştirildiğinden, IEEE 802.15.4 standardını kullanan ZigBEE haberleşme protokolü ile kıyaslama yapılarak bit hata oranı başarımları karşılaştırılmıştır ve kod yayma algoritmasının BER başarımına katkısı incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda WBAN protokolünün BER başarımı kod yayma algoritması ile iyileştirilerek, güvenilirlik ZigBEE ve WBAN protokolünden daha iyi duruma getirilmiştir. Böylece kablo eş değeri güvenilirliğinde haberleşme durumuna daha az SNR değerlerinde ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** IEEE 802.15.6, WBAN, IEEE 802.15.4, Hata düzeltme algoritmaları, BCH kodlama, Kod yayma algoritması.



Master Thesis

SUMMARY

IEEE 802.15.6 Standard Wireless Body Area Network Communication

Hakan ERDÖL

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. İsmail KAYA  
2016, 65 Pages

In this study, it is aimed to optimize Wireless Body Area Network communication protocol in IEEE 802.15.6 standard which is designed especially for medical devices by using various algorithms. Cable-equivalent reliability of WBAN communication protocol is tested with simulation works. BER performances of WBAN communication protocol and former communication protocol which is designed for medical devices- ZigBEE communication protocol in IEEE 802.15.4 are compared. Code spreading algorithm's effects on BER performance for WBAN communication protocol is examined. After simulation work BER performance for WBAN communication protocol become better than ZigBEE and WBAN protocol with code spreading algorithm. Thus, cable-equivalent communication reliability status is reached with less SNR value.

**Key Words:** IEEE 802.15.6, WBAN, IEEE 802.15.4, Error Correction Algorithms, BCH coding, Code Spreading Algorithm.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. IEEE 802 ailesi hiyerarşi diyagramı.....	1
Şekil 2. Haberleşme Sistemi.....	7
Şekil 3. TBGG Kanal .....	8
Şekil 4. Rayleigh Kanal .....	9
Şekil 5. Taşıyıcısı bastırılmış genlik modülasyonu için giriş - çıkış işaretleri.....	11
Şekil 6. Taşıyıcısı bastırılmamış genlik modülasyonunun giriş – çıkış işaretleri .....	12
Şekil 7. Frekans modülasyonu işlemine tabi tutulan işaretin grafiği.....	14
Şekil 8. QPSK yıldız diyagramı .....	16
Şekil 9. QPSK çıkış fazları .....	17
Şekil 10. Pi/4 DQPSK Yıldız diyagramı .....	17
Şekil 11. (a) Lojik 1 için MSK darbesi ve taşıyıcısı.....	18
Şekil 12. (a) Temel banttaki işaretin frekans genlik grafiği, (b) modülasyon sonucunda oluşan frekans genlik grafiği .....	22
Şekil 13. IEEE 802.15.6 için tanımlı dar bant fiziksel katman veri paketi yapısı.....	28
Şekil 14. PHY başlığında bulunan veri dizileri .....	29
Şekil 15. Ham veri iletimi için kullanılan işaret akış diyagramı .....	34
Şekil 16. Ham verinin Rayleigh kanal iletimi için işaret akış diyagramı .....	35
Şekil 17. IEEE 802.15.6 WBAN protokolü TBGG kanal için Simülasyon işaret akış diyagramı.....	36
Şekil 18. Rayleigh kanal için IEEE 802.15.6 WBAN protokolü simülasyonu için işaret ..... akış diyagramı .....	37
Şekil 19. IEEE 802.15.4 standardı için TBGG kanalda veri iletimi işaret akış ..... diyagramı.....	38
Şekil 20. IEEE 802.15.4 standardı için Rayleigh kanalda veri iletimi işaret akış ..... diyagramı.....	39
Şekil 21. Kod yayma algoritması ile iyileştirilmiş IEEE 802.15.6 WBAN protokolü için TBGG kanal simülasyon İşaret akış diyagramı.....	40
Şekil 22. Kod yayma algoritması ile iyileştirilmiş IEEE 802.15.6 WBAN protokolü için Rayleigh kanal simülasyon İşaret akış diyagramı .....	41
Şekil 23. Eş zamanlama işlemi için kullanılan çarpma işleminin örnek üzerinde ..... gösterimi.....	45

Şekil 24. Ham veri iletimi ile BCH kodlama simülasyonlarının TBGG kanalındaki başarımları .....	50
Şekil 25. Ham veri iletimi ile BCH kodlama simülasyonlarının Rayleigh kanalındaki başarımları .....	51
Şekil 26. TBGG kanalda BCH kodlama ile CRC algılama eklenmiş BCH kodlamının ..... bit hata oranlarının karşılaştırılması .....	53
Şekil 27. TBGG kanal için ham veri, IEEE 802.15.6 WBAN protokolü ve ..... IEEE 802.15.4 ile veri iletimi simülasyonu sonuçları .....	54
Şekil 28. Tek taplı Rayleigh kanal için ham veri iletimi, IEEE 802.15.6 WBAN protokolüne göre veri iletimi ve IEEE 802.15.4 standardına göre veri iletimi simülasyon çıktısı .....	55
Şekil 29. Rayleigh kanalında BPSK ve DQPSK modülasyon yapılan ham verinin ve ..... BCH kodlanmış verinin başarımları .....	56
Şekil 30. TBGG kanalda ham verinin, IEEE 802.15.6 WBAN Protokolünün, IEEE 802.15.4 Standardının ve kod yayma algoritması eklenmiş WBAN ..... protokolünün bit hata oranı başarımları .....	57
Şekil 31. Tek taplı Rayleigh kanalda ham verinin, IEEE 802.15.6 WBAN Protokolünün, IEEE 802.15.4 Standardının ve kod yayma algoritması eklenmiş WBAN protokolünün bit hata oranı başarımları .....	58
Şekil 32. Hata dağılım grafikleri için eksen açıklamaları .....	59
Şekil 33. Veri paketinin başındaki hata dağılımı (üstten alta: Ham veri, ..... IEEE 802.15.6, IEEE 802.15.4) .....	59
Şekil 34. Veri paketinin ortalarındaki hata dağılımı (üstten alta: Ham veri, ..... IEEE 802.15.6, IEEE 802.15.4) .....	60
Şekil 35. Veri paketinin sonlarındaki hata dağılımı (üstten alta: Hamveri, ..... IEEE802.15.6, IEEE 802.15.4) .....	60

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. Pi/4 DQPSK için faz değişimi.....	18
Tablo 2. CRC için kullanılan çeşitli üreteç polinomları.....	21
Tablo 3. IEEE 802.15.4 kod yayma spektrumu dönüşüm tablosu .....	24
Tablo 4. IEEE 802.15.6 haberleşme protokolü için veri iletim hızı seçenekleri.....	26
Tablo 5. 2360-2400 MHz frekans bandında dar bant fiziksel katman için veri iletim bilgileri .....	27
Tablo 6. IEEE 802.15.6 standardında bulunan veri hızı seçenekleri.....	30
Tablo 7. Katlama işleminin bit sırasına göre sonuçları .....	46
Tablo 8. Matris çarpımları işleminle eş zamanlama çalışması sonucu.....	47
Tablo 9. Matris toplamlarının mutlak değeri işleminle eş zamanlama çalışması sonucu ...	48
Tablo 10. İlinti işlemi ile eş zamanlama sonuçları .....	48
Tablo 11. CRC hata algılamasının işaret gürültü oranına göre tekrar gönderme isteği sayısı .....	52
Tablo 12. Tek taplı Rayleigh kanal için simülasyon işlem süreleri.....	61
Tablo 13. TBGG Haberleşme kanalı için simülasyon işlem süreleri .....	61

## SEMBOLLER DİZİNİ

BCH	Bose Chaudhuri Hocquenghem
BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama ( Binary Phase Shift Keying)
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Çakışmadan Kaçınılmış Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
EKG	Elektro Kardiyografi
FCS	Paket Kontrol Dizisi (Frame Check Sequence)
FFD	Full Function Device (Tam Fonksiyonlu Aygıtlar)
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array)
HBC	İnsan Vücudu haberleşmesi (Human Body Communication)
HCS	Başlık Kontrol Dizisi (Header Check Sequence)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LCM	En Küçük Ortak Kat (Least Common Multiple)
MAC	Media Access Control
MSK	Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (Minimum Shift Keying)
NB	Dar Bant (Narrow Band)
OF	Orta frekans
PCM	Pulse Code Modulation
PHY	Fiziksel Ortama Erişim Katmanı (Physical Layer)
Pi/4 DQPSK	Pi/4 Diferansiyel Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
PLCP	Fiziksel katman yakınsama prosedürü (Physical Layer Convergence Procedure)
PSDU	Fiziksel katman servis veri ünitesi (PHY Service Data Unit)
PWM	Pulse Width Modulation
QPSK	Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
RFD	Reduced Function Device (Azaltılmış Fonksiyonlu Aygıtlar)
RFID	Radyo Frekansı ile Tanımlama (Radio Frequency Identification)

SAR	Özgöl Emilim Oranı (Specific Absorption Rate)
TBGG	Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü (Additive white Gaussian noise)
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UWB	Ultra Geniş Bant (Ultra Wide Band)
WBAN	Kablosuz vücut alan ağı (Wireless Body Area Network,)
WCDMA	Geniş Bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Wideband Code Division Multiple Access)
A	Genlik seviyesi
B	Bant genişliği
C	Kanal kapasitesi
c	Işık hızı
f	Frekans
h	Kanal katsayısı
m	Modülasyon indisi
N, N <sub>0</sub>	Gürültü gücü
S	İşaret gücü
$\lambda$	Dalga boyu
$\mu$	Ortalama değer
$\sigma$	Standart sapma

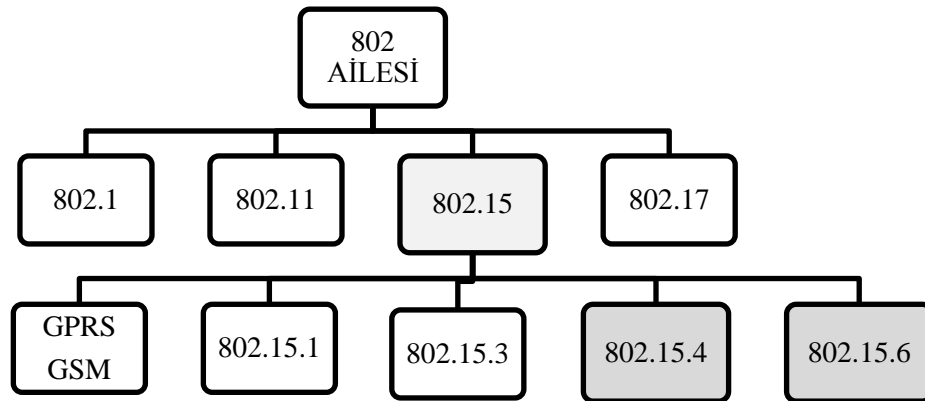
## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte haberleşme sistemlerinde önemli buluşlar olmuştur. Haberleşme sistemleri, kablolu haberleşme ve kablosuz haberleşme olarak iki ana başlık altında toplanabilir. Haberleşme sistemlerini geliştirenler ve kullanıcılar tarafından ele alınır; kablolu haberleşme sistemleri geliştirilmesi kolay uygulanması daha zor sistemler, buna karşılık olarak kablosuz haberleşme sistemlerinde bu durum tam tersi olarak düşünülebilir.

IEEE 802.15 standardı, 802 Yerel ve Metropolitan Alan Ağları Standardı Komitesi (802 Local and Metropolitan Area Network Standards Committee) tarafından belirlenmiştir. Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), 150 ülkede 400.000 bini aşkın üyesi vardır ve üye sayısı her geçen gün artmaktadır. IEEE üye sayısının çok olması ve uluslararası standartlar taşıması nedeniyle, mühendislik açısından elektronik, telekomünikasyon, elektrik gücü ve tüketiciler için elektronik ürünleri kapsamaktadır. Ayrıca temel ve uluslararası standartları belirler, uzman görüşlerini toplar ve ortaya koyar [1].

IEEE 802 bünyesinde birçok standart barındırmaktadır. Bu standartlar çeşitli amaçlar için özelleştirilmiştir. IEEE 802 ailesi kablosuz iletişimi içeren standartlardan oluşmaktadır [2].



Şekil 1. IEEE 802 ailesi hiyerarşi diyagramı

IEEE 802.15.4 (LR-WPAN) Düşük Hız-Kablosuz Kişisel Alan Ağları 2003 yılında IEEE Std 802.15.4-2003 adı altında IEEE tarafından yayınlanmıştır. Daha sonraki yıllarda eksikleri gidermek ve iyileştirme çalışmaları yapmak amacıyla IEEE 802.15.4a ve IEEE 802.15.4b standartları yayınlanmıştır [3].

IEEE 802.15.4 standardı telsiz izleme, radyo dalgaları ile kablosuz iletişim, kontrol sistemleri, telekom servisleri, tıbbi ve endüstriyel uygulamaları hedeflemiştir. Standartta ortama erişim CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) teknolojisi ile sağlanmaktadır. Ağ topolojisi yapısı olarak yıldız ve uçtan uca ağ topolojisi yapısı kullanılmıştır. Ortam Erişim Kontrolü Katmanı (Media Access Control, MAC) ve Fiziksel Ortama Erişim Katmanı (Physical Layer, PHY) ile katmanlar arası etkileşim sağlanır. Sistemin en önemli öğeleri aygıtlardır. 16 bit ve 64 bit adreslemeyi destekleyen standartta Tam Fonksiyonlu Aygıtlar (FFD-Full Function Device) ve Azaltılmış Fonksiyonlu Aygıtlar (RFD-Reduced Function Device) arasında haberleşme sağlanır. 64 bit adreslemeyi tam fonksiyonlu aygıtlar haberleşmek için kullanırken, 16 bit adreslemeyi azaltılmış fonksiyonlu aygıtlar haberleşmek için kullanır. Tam fonksiyonlu aygıtlar ağdaki diğer tüm aygıtlar ile iletişim kurabilirler. Ancak azaltılmış fonksiyonlu aygıtlar kendi aralarında iletişim kuramazlar. Koordinatör görevini üstlenmiş tam fonksiyonlu aygıtlar ile iletişim kurabilirler [4].

Haberleşme standartlarının kendi aralarında farklı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin IEEE 802.15.4 kablosuz haberleşme standardını kullanan ZigBEE protokolü uzak mesafe, düşük veri iletim hızı sağlarken, IEEE 802.11 standardını kullanan Wi-Fi, WiMAX gibi protokoller yakın mesafede yüksek veri iletim hızı sağlamaktadır. Bunların dışında kablolu haberleşme sistemlerinde İletim Kontrol Protokolü/İnternet Protokolü (Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP) veri iletiminin doğruluğu hakkında geri bildirim alırken, Kullanıcı Veri Birimi Protokolü (User Datagram Protocol, UDP) daha yüksek veri iletim hızı için iletilen verinin doğruluğunu kontrol etmeden haberleşme yapmak için tasarlanmıştır.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde haberleşme kanalının, iletilen sinyale etkisi kablolu haberleşme sistemlerine nazaran daha fazla olduğundan, veri kaybını engellemek için farklı tedbirler almak gereklidir. Örneğin, kablolu sistemlerde genellikle her kablodan bir verici ve bir alıcı haberleşirken, kablosuz haberleşme sistemlerinde alıcı antende aynı frekans bandında haberleşen tüm elektromanyetik işaretler toplanmaktadır. Farklı vericilerden gelen işaretlerin toplanmasının yanı sıra tek vericiden çıkan işaretlerin



çevredeki materyallerden yansıyarak alıcıya gecikmeli olarak ulaşması da, semboller arası girişim gibi farklı sorunlar oluşmasına neden olur.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde yaşanan bu tarz sorunlar için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların başında hata düzeltme algoritmaları, kod yayma algoritmaları, kanal ya da frekans bandı değiştirilerek daha temiz haberleşme kanalına geçme vb. gibi yöntemler gelmektedir. Bunların eşliğinde kablosuz haberleşme protokolü olan IEEE 802.15.6 standardını kullanan “Wireless Body Area Network (WBAN)” haberleşme protokolü kablo güvenilirliğinde haberleşmeyi vaat etmektedir.

Özellikle sağlık hizmetleri sektöründe insan vücudundan alınan işaretlerin kaybı tolere edilemeyeceği için, sağlık hizmetleri sunan cihazlarda kablosuz haberleşme sistemlerine ender rastlanmaktadır. WBAN haberleşme protokolünün tasarlanmasındaki en büyük motivasyon tıbbi cihazların kablosuz hale getirilmesidir. WBAN protokolü yeterince uygulanabilir olduğunda doktorlar ve diğer sağlık görevlileri açısından kullanım kolaylığı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu sayede tıbbi cihazlarda kablosuz haberleşmenin daha sık kullanılacağı ön görülmektedir.

Piyasada IEEE 802.15.6 WBAN protokolü için geliştirilmiş alıcı verici entegrasi üreten fazla üretici bulunmamaktadır. Bu nedenle şu an için WBAN protokolünün uygulanabilirliği düşüktür. Bu tez çalışmasındaki gibi güvenilirliği arttıracak çeşitli yöntemlerin öne sürülmesi ile birlikte WBAN protokolünün yeni sürümlerinde seri üretimlerinin ve kullanımının artacağı ön görülmektedir.

Bu tezin genel bilgiler kısmında haberleşme ile ilgili tez çalışmasında kullanılan bilgiler verilmiştir.

## **1.2. Literatür Taraması**

Kwak ve arkadaşları, içerisinde tıbbi ve endüstriyel alanları da barındıran çeşitli alanlarda düşük güç aygıtları ile çalışabilen 802.15.6 standardını incelemişlerdir. Hala standardın gelişmekte olan ve henüz kesinleşmemiş protokolleri üzerinde çalışmışlardır. İletişimde ve haberleşme sektöründe önde gelen çeşitli kurum ve gruplar WBAN'nın ihtiyaçlarını karşılamak için MAC protokolleri önermişlerdir. Kwak ve arkadaşları önerilenin bu protokollerin analizini yaparak BAN gereksinimlerinin enerji verimliliğini karşılaştırmışlardır [5].

Ullah ve Kwak'ın çalışmasında tıbbi alandan eğlenceye günümüzde birçok yerde giderek önemi artan (WBAN) kablosuz kişisel alan ağından bahsedilmiştir. WBAN teknolojisinin tıbbi alanda çalışan personeller için gerçek zamanlı ve güvenilir veri iletimi sağladığı üzerinde durulmuştur. Bu teknoloji ile bugüne kadar görülmemiş yöntemlerle hastaların sağlık durumunun izlenmesi öngörülmüştür. IEEE 802.15.6 standardı WBAN kablosuz iletişimi geliştirmek için çıkarılmıştır. Bunu açıklamak için WBAN'ın amacı olan düşük güç kullanarak tıbbi ya da tıbbi olmayan uygulamalarda kablosuz iletişim ele alınmıştır. Çalışmanın içeriğinde farklı frekans bantları ve veri hızları için sistem çalıştırılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Sonuç olarak paket boyutları optimize edilerek farklı WBAN uygulamaları için IEEE 802.15.6 standardının üst sınırları belirlenmeye çalışılmıştır [6].

Rashwand ve arkadaşları IEEE 802.15.6 tabanlı WBAN kablosuz kişisel alan ağının performans değerlendirmesi için analitik bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında olasılık yaklaşımı kullanarak belirli bir standart oluşturmuşlardır. Bir simülasyon modeli ile analitik sonuçlar elde etmişlerdir. Sonuçlara göre öncelikli düğümler ağıltan ötürken, doygunluk seviyesinin altında kalan düğümler çoğunlukla yüksek yetkili dağıtım ünitesi tarafından değerlendirilmiştir [7].

Sarkar ve arkadaşları IEEE 802.15.6 standardının kısa menzilli alanlarda herhangi bir canlı dokusu çevresinde 10 Mbps hıza kadar, son derece düşük güç gereksinimi ile kablosuz iletişimi ele almışlardır. Bu çalışmada doygunluk koşulu altında CSMA/CA tabanlı WBAN ile güvenilirlik analizi ve işlem hacmi için ayrık zamanlı Markov modeli geliştirilmiştir. IEEE 802.15.6 standardı Markov chain-based analizinin mevcut literatürü, paketin aktarımı sonrası çerçeve bekleme süresini dikkate almaz. Bu çalışmada, aktarım sonrası düğümün bekleme süresinde Markov chain metodunun yapısını modifiye ederek hesaba katılır. Bunlarla birlikte, taşıma kapasitesindeki artışa bağlı olarak düğümdeki güvenilirliğin hızla düştüğü gösterilmiştir [8].

Ullah ve Tovar'ın çalışmasında 802.15.6 standardının kaynak tahsisi için kullandığı farklı protokolleri tanıtılmıştır. Farklı öncelikleri ile düğümleri farklılaştırarak kanala hızlı ve öncelikli erişimi sağlayan CSMA/CA protokolü seçilmiştir. Bu çalışmada çıktı, enerji tüketimi, farklı öncelikli sınıf için farklı protokollerdeki gecikmeler ve sonlu sayıdaki düğümlerin doymuş ve kayıplı kanal durumlarını hesaplamak için basit bir analitik model oluşturulmuştur. Modelin hassasiyeti simülasyonlar ile doğrulanmıştır. Elde edilen sonuç,

tıbbi ve tıbbi olmayan uygulamalar için standart öncelikli parametrelerin tasarımında kullanılabilir [9].

Al-Mazroa ve Rikli'nin çalışmasında IEEE 802.15.6 standardı WBAN'ın özel gerekliliklerini tam karşılayan en uygun standart olarak ortaya çıkışından bahsedilmektedir. Bunun yanı sıra 802.15.6 standardı birçok MAC katmanı teknolojisi için tavsiye edilecek şekilde esnek tasarlanmıştır ve özelleşmiş senaryoları için en verimli WBAN-MAC tekniklerini nasıl birleştirileceği incelenmiştir. Çalışmanın amacı farklı MAC tekniklerini birleştirerek sensörler, bunların sayısı ve enerji gereksinimleri türlerine göre adapte etmektir. Önerilen tekniğin performansı çıktı, gecikme ve enerji tüketimi gibi standart performans ölçütleri ile değerlendirilmiştir [10].

Dou ve Chang'ın çalışmasında 802.15.6 kablosuz kişisel alan ağlarının hassasiyeti ve en az güç gereksinimini ölçmek için bir model önerilmiştir. Minimum iletim gücünün alıcı ve verici antenleri arasındaki yol kaybına bağlı olup olmadığını tespit etmeye çalışılmışlardır. WBAN için önerilen 2.45 GHz ve kanal yayılım modeli önerilmiştir [11].

Sarestoniemi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada IEEE 802.15.6 standart tabanlı iletişimin somut performans değerlendirmesi yapılmıştır. Parkinson hastaları üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, 802.15.6 standardının fiziksel katmanda ultra geniş bant enerji dedektörü kullanılarak en hızlı ve en güvenilirlikle iletişim ölçütleri değerlendirilmiştir. Ayrıca anten yerleşimi, konumu ve özellikleri gibi etkilerin kablosuz iletişimi nasıl etkilediği araştırılmıştır [12].

Lee ve arkadaşlarının çalışmasında IEEE 802.15.6 standardının WBAN sistemleriyle fiziksel katman tasarımları üzerine eğilimi gösterilmiştir. Birçok şirket ve araştırma enstitüleri WBAN kablosuz haberleşme sistemlerinde temel teknolojik ihtiyaçları sağlamak için fiziksel katman mimarilerini önermişlerdir. Çalışmada önerilerin frekans bantları, modülasyon indeksleri ve diğer temel teknik özellikleri incelenmiştir [13].

Xu ve arkadaşları çalışmalarında IEEE 802.15.6 MAC protokolünün performans indekslerini analiz etmişlerdir. Matlab ve OPNET simülasyon programları kullanılarak iki simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Pil kurtarma etkileri dikkate alınarak yapılan çalışmada en fazla %13 oranında tasarruf sağlanabildiği gösterilmiştir [14].

An ve arkadaşları IEEE 802.15.6 standardının MAC protokolü üzerindeki performansını incelemişlerdir. İletişimde düğümlerin boşa kalma durumları göz önüne alınarak, CSMA/CA teknolojisiyle taşıyıcı algılamalı çoklu erişimin performansını değerlendirmek için bir Markov modeli sunulmuştur. Çalışmada düğüm sayısı artırılarak,

kullanım önceliğine sahip düğümlerin performansının diğer düğümlerin performansına oranı ölçülmüştür. Sonuçları doğrulamak için OPNET simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır [15].

Mathew ve arkadaşlarının çalışmasında IEEE 802.15.6 standardında WBAN kablosuz kişisel alan ağı için Dar Bant Fiziksel Katman Mimarisinin (NPL), Field Programmable Gate Arrays (FPGA) uygulaması sunulmuştur. 2.4 GHz ISM bandında çalışan üç fiziksel katman arasında iletişim kurabilen soyut düzeyde donanım uygulaması tasarlanmıştır. Özel tıbbi uygulamalarda yüksek güvenilirlik elde etmek ve veri iletimi esnasında sınırlamaları önlemek için BCH kodlayıcı ve kod çözücü tasarımı entegre edilmiştir [16].

Xiao ve arkadaşlarının çalışmalarında IEEE 802.15.4 standardının güvenlik açısından açıkları ele alınmıştır. Bu protokolle iletişim esnasında oluşabilecek saldırı ve tehditlere karşı nasıl önlemler alınacağı anlatılmıştır [17].

Callaway ve arkadaşlarının çalışmasında IEEE 802.15.4 standardının özellikleri hangi alanlarda kullanıldığı açıklanmıştır. Bu standart kullanılarak gerçekleştirilen ağ topolojisi ve ev otomasyonları örnek verilmiştir [18].

Lu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada IEEE 802.15.4 standardının MAC katmanının yeterliliği değerlendirilmiştir. Performans değerlendirilmesi yapılırken yıldız topolojisine sahip bir ağ yapısı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir [19].

Lee yaptığı çalışmada farklı veri yoğunluklarında ve farklı ortamlarda iletişim ağı kurarak IEEE 802.15.4 standardının çalışma performansını değerlendirmiştir [20].

Bougard ve arkadaşlarının çalışmasında IEEE 802.15.4 standardının düşük güç seviyesi kullanarak yoğun radyo sinyalleri altında kablosuz ağlarda enerji potansiyeli incelenmiştir. Farklı veri yoğunlukları kullanılarak düğüm başına düşen ortalama güç hesaplanmaya çalışılmıştır [21].

Howitt ve arkadaşlarının çalışmasında IEEE standartları için geliştirilmiş Chipcon CC2420 çipi kullanılarak enerji maliyetleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Elde edilen veriler ile bir önceki model karşılaştırılmıştır ve enerji gereksinimleri farkları incelenmiştir [22].

Neugebauer ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada IEEE 802.15.4 standardının yıldız topolojisi kullanan ağlarda taşıyıcı frekansı ele alınarak optimum düzeyde çalışması için nasıl bir yol izlenmesi gerektiği incelenmiştir. Çalışma sonucunda güç tasarrufu ve minimum mesaj gecikme süresi hesaplanmıştır [23].

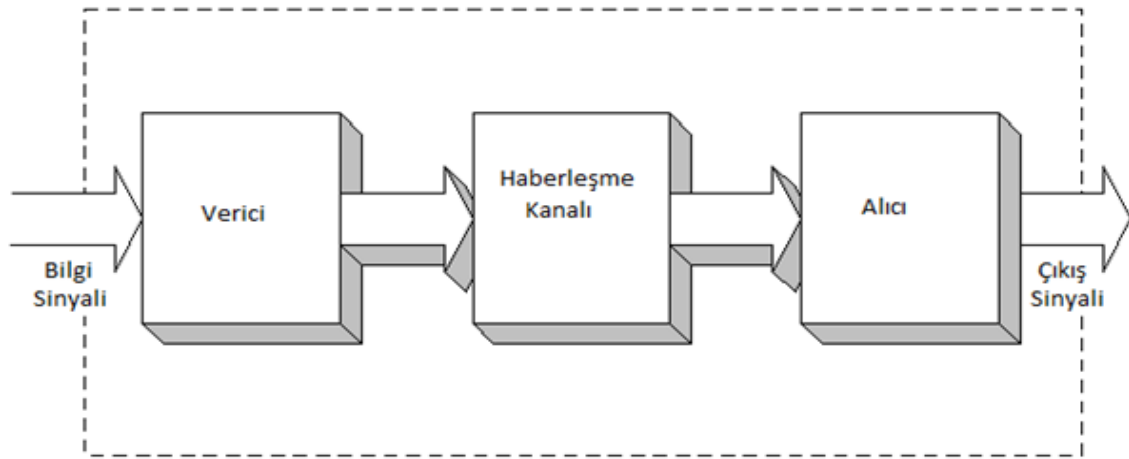
Zheng ve Lee'nin yaptıkları çalışmada IEEE 802.15.4 standardının genel yapısı ve özellikleri üzerinde durulmuştur. Bu standart ile yapılabilecek birkaç senaryo oluşturmuşlar ve bu senaryoların sonuçlarına göre hata oranı performans değerlerini incelemişlerdir [24].

### 1.3. Haberleşme Teorisi

Elektronik haberleşmenin temeli bilgiyi bir yerden başka bir yere aktarmaktır. Böylece elektronik haberleşme; gönderme, alma ve iki ya da daha çok konum arasındaki bilginin elektronik devreler kullanılarak işlenmesi olarak özetlenebilir. Bilginin gerçek kaynağı insan sesi, vücut bilgileri gibi analog olabileceği gibi ikilik düzende ya da alfa numerik sayılar da olabilir. Analog işaretler sinüs ya da cosinüs işareti gibi zamanla genliği değişebilen sürekli işaretlerdir. Analog bir işaret sonsuz sayıda değerler içermektedir. Sayısal işaretlerde ise genlik, ayrık seviyeler olacak şekilde değişmektedir. En yaygın sayısal işaret iki seviyesi olan ikilik düzende sayılardır. Analog ya da sayısal olan her türlü bilgi elektronik haberleşme sistemi ile gönderilirken elektromanyetik enerjiye dönüştürülmelidir.

#### 1.3.1. Haberleşme Kanalları

Haberleşme sistemi alıcı, kanal, verici olarak üç ana bileşenle ifade edilebilir. En basit haliyle bir haberleşme sistemi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Haberleşme Sistemi

Şekil 2'de görüldüğü gibi iletişim sisteminde verici, bilgi sinyalini fiziksel kanal üzerinden iletim için uygun hale getirerek bir ya da daha fazla alıcıya ulaştırır. Alıcı-verici

arasındaki fiziksel ortam ise haberleşme kanalı olarak adlandırılır ve bu kanal, kablosuz uzay ortamı olabileceği gibi kablo ortam da olabilir.

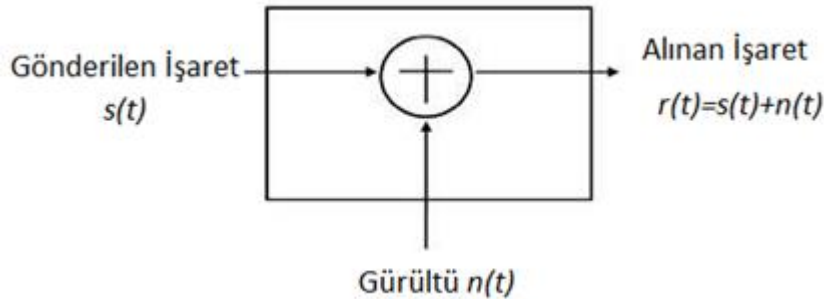
### 1.3.1.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) Kanal

Beyaz Gauss gürültülü (AWGN) kanal modeli, beyaz Gauss gürültüsünün gönderilen işarete işareti bozma yönünde toplamsal olarak eklendiği kanal modelidir. Gauss gürültüsü istatistiksel olarak bağımsızdır, diğer bir deyişle rastlantısaldır. Gürültüyü meydana getiren bileşenler Gauss olasılık yoğunluk işlevine sahiptir ve birbirleriyle ilintisizdirler. AWGN kanal modeli için Gauss dağılım fonksiyonu eşitlik (1.1)'de verilmiştir.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1)$$

Eşitlik (1.2)'de  $\mu$  değişkeninin ortalama değerini ve  $\sigma$  ise standart sapmayı ifade etmektedir.

Gürültünün beyaz olması, bütün frekans bantlarında etki göstermesi anlamına gelmektedir. Buna bağlı olarak, AWGN kanalın güç spektral yoğunluğu tüm frekanslar için sabit olmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü üzere alınan işaret  $s(t)$ , gönderilen işaretin  $r(t)$ ,  $\pi/2$  güç spektrum yoğunluğunu sahip gürültüyle  $n(t)$ , toplamından oluşmaktadır.

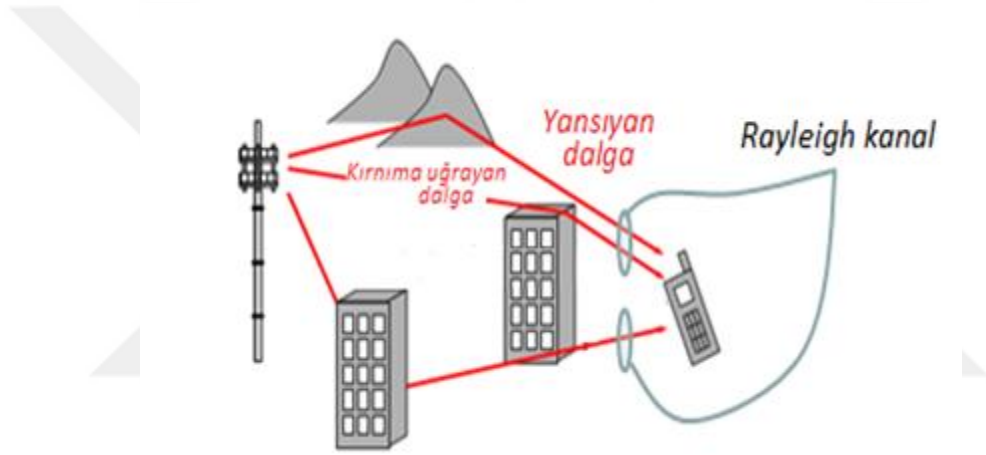


Şekil 3. TBGG Kanal

$n(t)$  toplamsal gürültü işaretini temsil etmektedir. TBGG kanal, karakteristiği zamanla değişmeyen statik bir kanal olarak kabul edilir.

### 1.3.1.2. Rayleigh Kanal

Alıcıyla vericinin birbirini direk görmediği durumda oluşan kalan türüdür. Bu durumda çoklu yayılımla yansıyarak kırınımına ve saçınımına uğrayan işaretler alıcıya ulaşır [25]. Alıcıya ulaşan bu işaretlerin birbirinden bağımsız ve de birbirine özdeş olduğu kabul edilir. Sembolik olarak Rayleigh kanal Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Rayleigh Kanal

Alınan işaretin genlik ve fazında meydana gelen değişimler eşitlik (1.2)'de verilen Rayleigh dağılım fonksiyonu ile modellenebilir.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & 0 \leq x \leq \infty \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Eşitlik (1.2)'de denklemden,  $\sigma$  standart sapmayı ifade etmektedir.

### 1.3.2. Modülasyon

Modülasyon teknikleri, özellikle kablosuz haberleşme sistemleri için çok önemlidir. Analog ya da sayısal işaretleri benzer işaretlere karışmadan uzak noktalara aktarabilmek için modülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Modülasyon işlemi, bilgi işaretinin yüksek frekanslı bir taşıyıcı ile gönderilmesi ile yapılır. Bilgi işareti, taşıyıcı işaretinin genlik, frekans, faz vb. özelliklerinden hangisini değiştiriyorsa bilgi işareti, o özelliğin modülasyon tekniği işlemine tabi tutulmuştur denir [26].

Modülasyon işlemiyle, bilgi işareti yüksek frekansla taşınarak ihtiyaç duyulan anten boyutunun küçülmesini sağlar.  $\lambda$  dalga boyu,  $c$  ışık hızı ( $3 \cdot 10^8$  m/s) ve  $f$  frekans olmak üzere bir frekans bandındaki işaretin dalga boyu eşitlik (1.3)'teki formülle hesaplanmaktadır:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{metre}) \quad (1.3)$$

Eşitlik (1.3)'te hesaplanan dalga boyundaki işareti gönderebilmek için anten boyunun dalga boyunun dörtte biri uzunluğunda olması gerekir. Bu durumda anten boyu frekansla ters orantılı şekilde değişmektedir [27].

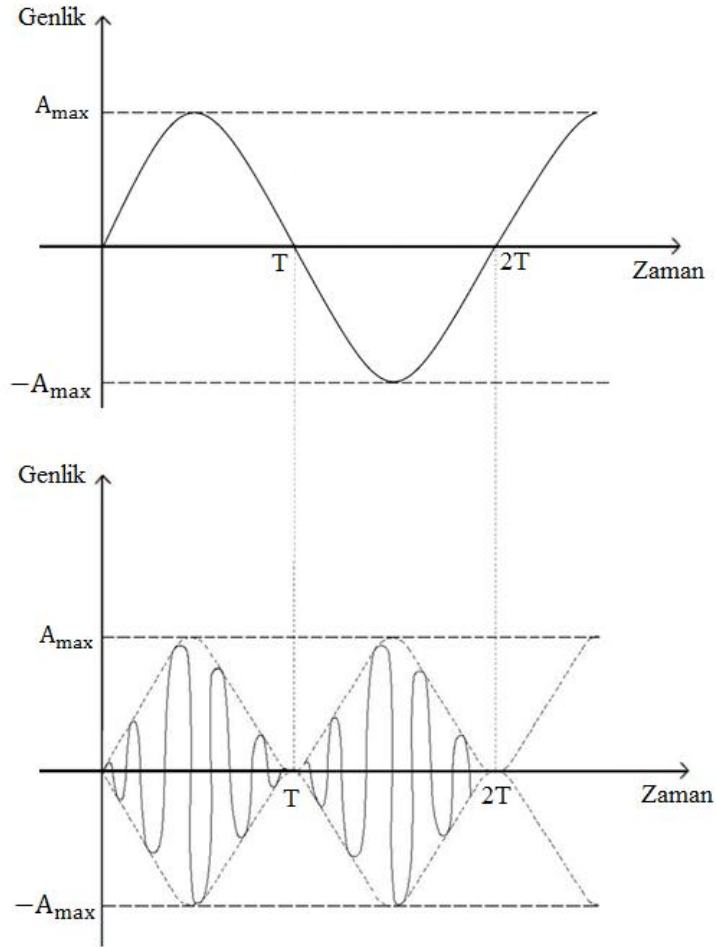
#### 1.3.2.1. Analog Modülasyon

Analog bilginin analog taşıyıcı ile gönderildiği modülasyon türüdür. Haberleşme sistemleri için ilk tasarlanmış modülasyon türü analog modülasyonlardır. Analog kelimesi giriş işareti kuantalanarak ya da yuvarlanarak sayısal işarete dönüştürülmeden, analog olarak işleme tabi tutulmasından gelmektedir. İletim hızının düşük olması ve özellikle genlik modülasyonunun gürültüden fazla etkileniyor olmasından dolayı bu konuda çalışan mühendisleri sayısal modülasyonların kullanımına ve geliştirilmesine itmiştir. Günümüzde kullanım alanları azalsa dahi hala radyo vb. uygulamalarda kullanılmaktadır.



### 1.3.2.1.1. Genlik Modülasyonu

Genlik modülasyonu, girişteki işaretin genliğine göre taşıyıcı işaretin genliğinin değiştirilmesiyle oluşur. Alıcı devresinin çok basit olması nedeniyle hobi amaçlı uygulamalarda sıklıkla karşılaşılmaktadır. Genlik modülasyonu zaman domeninde incelendiğinde iki başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki taşıyıcısı bastırılmış genlik modülasyonudur. Giriş işaretinin bir sinüs dalgası olduğu düşünülürse taşıyıcısı bastırılmış genlik modülasyonu işaretin zamanla değişimi zaman eksenindeki çıktısı Şekil 5'te verilmiştir.

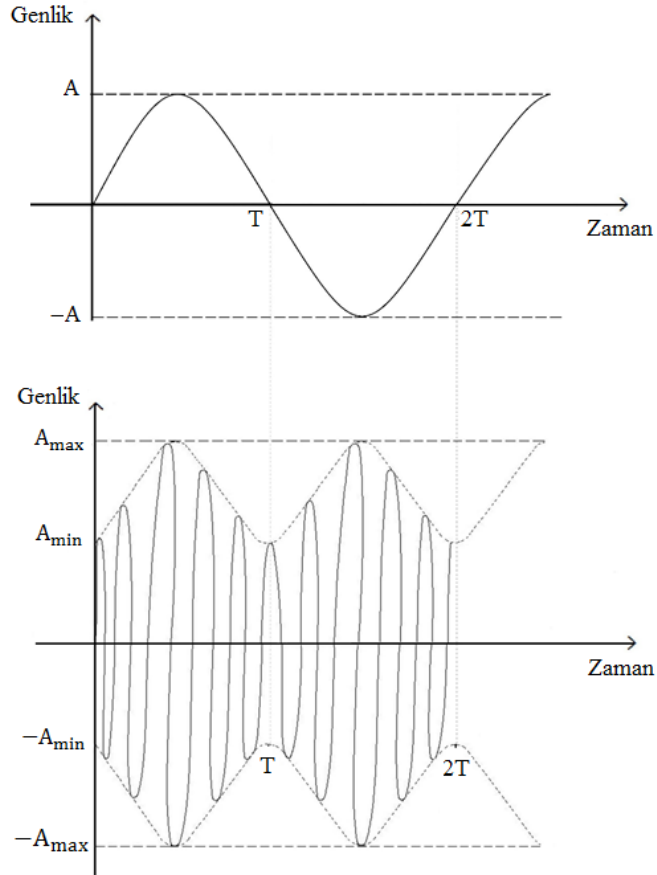


Şekil 5. Taşıyıcısı bastırılmış genlik modülasyonu için giriş - çıkış işaretleri

Taşıyıcısı bastırılmış genlik modülasyonunun formülü eşitliği (1.4)'te verilmiştir.

$$y(t) = S * \cos(w_s t) * A * \cos(w_t t) \quad (1.4)$$

Bu modülasyonun dezavantajı Şekil 5'teki grafikte bulunan sıfır geçiş bölgeleri gürültüden fazla etkilenip bilgi kaybına neden olmaktadır. Bu bilgi kaybını engellemek için modülasyon işleminde, modüleli işaret zaman ekseninden pozitif ve negatif yönde uzaklaştırılarak taşıyıcısı bastırılmamış genlik modülasyonu elde edilmektedir. Giriş işaretinin yine sinüs dalgası olduğu düşünülürse, taşıyıcısı bastırılmamış genlik modülasyonlu işaretin zamanla değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Taşıyıcısı bastırılmamış genlik modülasyonunun giriş – çıkış işaretleri

Taşıyıcısı bastırılmamış genlik modülasyonunun formülü eşitlik (1.5)'te verilmiştir.

$$y(t) = (1 + mA_m * \cos(w_m t)) * A * \cos(w_c t) \quad m \leq 1 \quad (1.5)$$

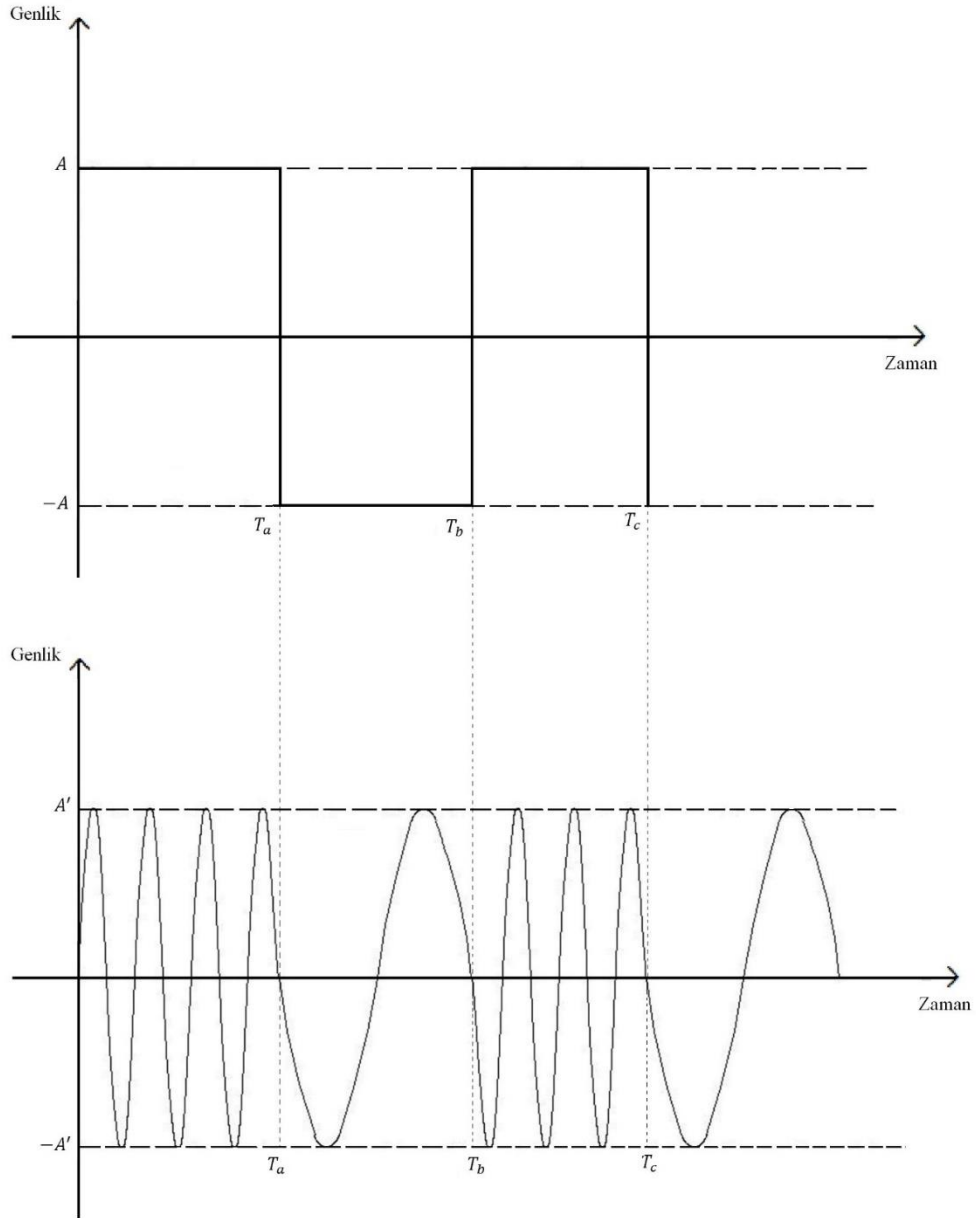
$A_m$ , bilgi işaretinin genliği ve  $A$  taşıyıcı işaretinin genliğidir.  $w_m$  bilgi işaretinin,  $w_c$  taşıyıcı işaretin açısal frekansıdır.

Bu modülasyonun dezavantajı ise işaretin işaret gürültü oranına katkısı olmayan  $A_{min}$  genliğinin artırılması işaret açısından bakıldığında bir enerji kaybı olarak nitelendirilebilir. Haberleşme sistemlerinde enerji verimi oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle taşıyıcısı bastırılmamış genlik modülasyonunda eşitlik (1.6) denkleminde verilen işaret enerjisinin toplam enerjiye oranı olan modülasyon indisi “m” en uygun şekilde ayarlanmalıdır.

$$m = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \quad (1.6)$$

#### 1.3.2.1.2. Frekans Modülasyonu

Genlik modülasyonuna göre ticari sistemlerde daha sık karşılaşılan frekans modülasyonu için Şekil 7’de girişe göre frekans modülasyonlu işaret görülmektedir.



Şekil 7. Frekans modülasyonu işlemine tabi tutulan işaretin grafiği

$m(t)$  giriş işaretinin fonksiyonu,  $k_f$  frekans sapması ve  $f_c$  taşıyıcı merkez frekansı olmak üzere Frekans modülasyonunun en temel haliyle modülasyon formülü eşitlik (1.7)'de verilmiştir.

$$y(t) = A * \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau) \quad (1.7)$$

Frekans modülasyonu, genlik modülasyonuna göre gürültüden daha az etkilendiği için radyo yayınlarında, endüstride uzun hatlarda, vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin

bir fabrikada 1 km'lik bir kablodan analog işaret modülasyon yapmadan ya da genlik modülasyonu kullanılarak gönderilmesi, ortamdaki gürültüden ve kablo direncinden dolayı çıkışta daha düşük genlik gözlemlenmesine ve yanlış veri iletimine neden olacaktır. Bunun yerine frekans modülasyonu ile aynı işaretin gönderilmesi durumunda gürültü, modülasyon işlemi uygulanmış işaretin genliğinin düşmesine neden olsa da frekansı değiştiremeyeceği için iletilen sinyal daha doğru olacaktır.

### 1.3.2.2. Sayısal Modülasyon

Sayısal modülasyon, sayısal bilgi sinyalinin çeşitli taşıyıcı sinyaller vasıtasıyla iletim ortamına uygun dalga formlarına dönüştürülme işlemidir. Ayrıca, sinüs ya da PWM, PCM vb. taşıyıcı sinyalin sayısal bilgi sinyaline göre yeniden şekillendirilmesi olarak da ifade edilebilir. İletilmek istenen işaret 1 ve 0'lardan oluşan sayısal veri bütünüdür. Bilgi işaretinin analog olması durumunda ise sinyal analog- dijital çeviriciler vasıtasıyla sayısal sinyale dönüştürülür.

Son zamanlarda yaygın kullanılan haberleşme cihazlarının büyük bir çoğunluğu sayısal modülasyon tekniklerini kullanmaktadır. Sayısal modülasyon giriş işaretinin kuantalanarak sayısal hale getirildikten sonra modülasyon yapılması nedeniyle "sayısal modülasyon" adını almaktadır. Sayısal modülasyon teknikleri hata düzeltme algoritmaları kullanılarak daha güvenilir işaret iletimine olanak sağlamaktadır. Bunun yanında kaynak kodlama yöntemleri ile veri sıkıştırılarak daha hızlı işaret iletimi gerçekleştirilebilmektedir [28].

Sayısal modülasyonun analog modülasyona göre kanal kapasitesi ve gürültüye dayanıklılığı daha yüksektir. Ayrıca hata düzeltme tekniklerine sahip olan sayısal modülasyonla güvenli, gizli iletim ve çoklu erişime izin vermektedir.

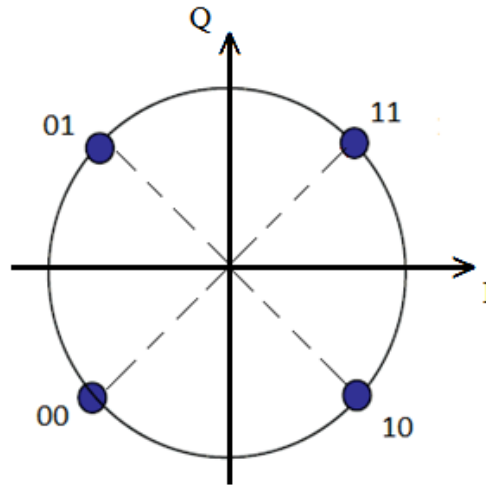
Sayısal modülasyonda faz, frekans ve genlik tabanlı pek çok farklı teknik bulunmaktadır. Bunlardan Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK),  $\pi/4$  Diferansiyel Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama ( $\pi/4$  DQPSK) ve Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (MSK) aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bunlara karşılık olarak sayısal modülasyonun da analog modülasyona karşı bazı dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin analog işaretin sayısal işarete dönüştürülmesindeki yuvarlamanın (kuantalama) oluşturduğu veri kaybı bulunmaktadır. Alıcı, verici devreleri analog modülatörlere göre biraz daha karışıktır. Giriş işareti sayısal işaret yani kare

dalgalardan oluştuğu için frekans bandında sinc fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Bu yüzden frekans bandında oldukça fazla yer işgal etmektedir. Bunu engellemek için modülasyon öncesinde ya da sonrasında bir filtre kullanılarak diğer frekans bandındaki harmoniklerden işareti arındırmak gereklidir [29]. Kullanılan filtreler günümüz teknolojisinde fiziksel filtre yerine sayısal filtrelere dönüşmüştür. Sayısal filtreler daha hızlı tasarlanabilmekte, transfer fonksiyonu daha kolay tespit edilebilmekte ve üretim maliyeti bulunmamaktadır [30].

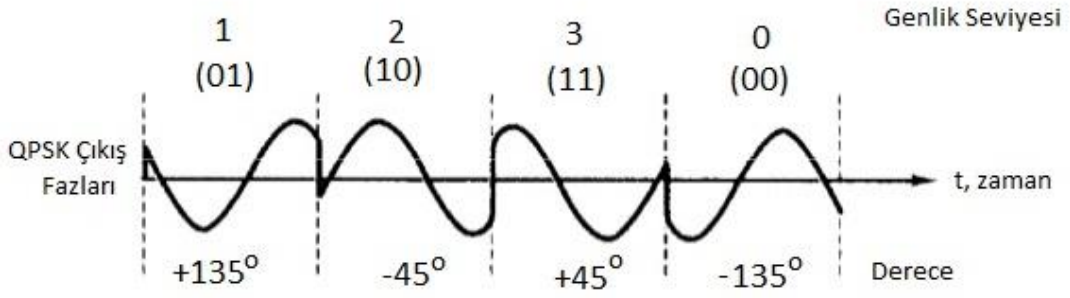
### 1.3.2.2.1. Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying,QPSK )QPSK Modülasyonu

Faz Kaydırmalı Anahtarlama tekniğinde, iletilmek istenen bilgi sinyaline bağlı olarak taşıyıcı sinyalin fazı değişir. İkilik sistemde M seviye sayısı, n bitle temsil edildiği düşünülürse  $M = 2^n$ 'dir. Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK),  $n=2$  bitle kodlanmış  $M=4$  farklı genlik seviye değerine sahip bilgi işareti, taşıyıcı sinyalde meydana getirilen 4 farklı faz kaymasıyla modüle edilerek iletilir. I ve Q bileşenleri birbirine dik (ortogonal) sinüs ve kosinüs bileşenleridir. Şekil 8'de QPSK için yıldız diyagramı verilmiştir.



Şekil 8. QPSK yıldız diyagramı

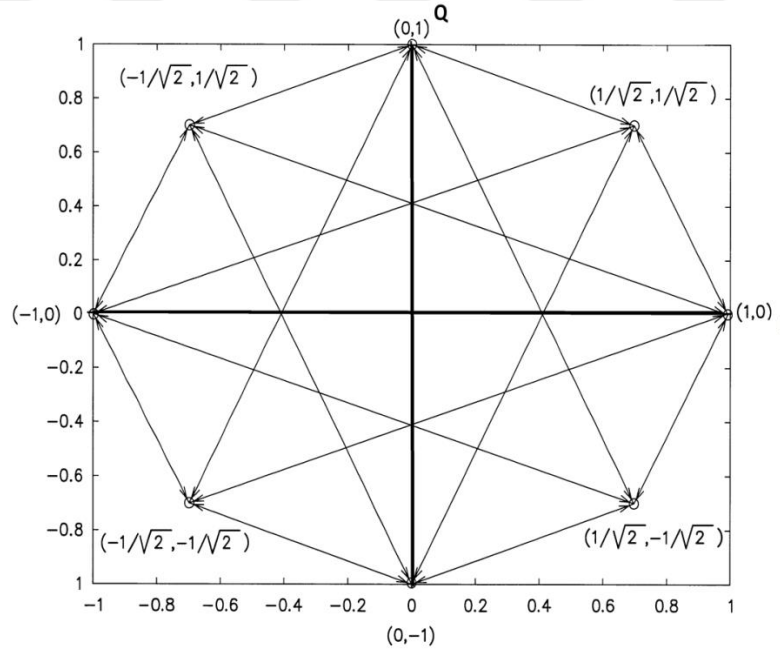
Görüldüğü gibi, bilgi işaretindeki olası 4 durum “11”, “01”, “00”, “10” için taşıyıcı sinyalde muhtemel fazlar sırasıyla belirtildiği gibidir:  $+45^\circ$ ,  $+135^\circ$ ,  $-135^\circ$ ,  $-45^\circ$ . Örnek bir işaret için QPSK modülasyonun işaretin zamanla değişimi Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. QPSK çıkış fazları

### 1.3.2.2.2. Pi/4 Diferansiyel Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Binary Phase Shift Keying, Pi/4 DQPSK ) Modülasyonu

Pi/4 Diferansiyel Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama, bilgi işaretindeki sembolü oluşturan bitlerin iletileceği fazın, önceki sembole karşılık gelen faz değişimine göre diferansiyel olarak değiştirilmesidir. Pi/4 DQPSK için yıldız diyagramı Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Pi/4 DQPSK Yıldız diyagramı

DQPSK düzleminde iletilmesi istenen sembolün fazı, bulunulan faza önceki sembolün Tablo 1.'de belirtilen ikili bit deseni karşılık gelen  $k\pi/4$  ( $k=1,3,5,7$ ) kadar faz değişiminin

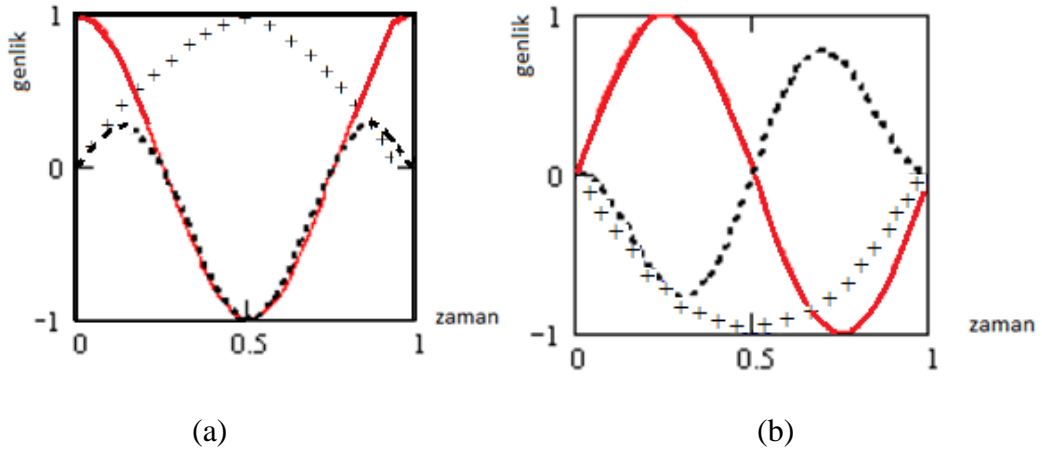
eklenmesiyle elde edilir. Bu, Şekil 10.'da görüldüğü gibi toplamda 8 durum olduğu anlamına gelmektedir.

Tablo 1.  $\pi/4$  DQPSK için faz değişimi

Faz Değişimi	Bit (paterni) Deseni
$\pi/4$	00
$3\pi/4$	01
$7\pi/4$	10
$5\pi/4$	11

### 1.3.2.2.3. Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (Minimum Shift Keying, MSK) Modülasyonu

Minimum Kaydırmalı Anahtarlama, faz modülasyonunun özel bir halidir. MSK, Q kanalının yarım periyot sembol süresi geciktirilmesiyle gerçekleştirilen ofset QPSK'ya benzer bir yöntemdir. Faz modülasyonunda faz kaydırılması sonucu oluşan süreksizlikleri ortadan kaldırmak amaçlı geliştirilmiştir. Şekil 11'de lojik 1 ve lojik 0 için MSK darbesi, taşıyıcı ve modülasyon işlemi uygulanmış işaret gösterilmiştir.



Şekil 11. (a) Lojik 1 için MSK darbesi ve taşıyıcısı  
(b) Lojik 0 için MSK darbesi ve taşıyıcısı [31]

Düz çizgi ile gösterilen eğri taşıyıcı sinyal (yarım sinüs şeklindedir), + işaretleri ile oluşan eğri MSK darbe sinyali ve kesik çizgi ile gösterilen eğri ise bu iki sinyalin çarpımı sonucu elde edilen modülasyon taşıyıcı işaretidir.



### 1.3.3. Hata Düzeltme Kodları

Hata kodlama algoritmaları; bir verinin gönderici tarafında kodlanarak, alıcı tarafta kod çözme anında hataların düzeltilmesi görevini yapmaktadırlar. En genel kullanılan hata düzeltme algoritmasında, bilgi verisine veriye göre değişen fazlalık bitleri eklenerek (alıcı tarafta kodlama algoritması bilindiği göz önünde bulundurularak) alıcı taraftaki kod çözücünde eklenen bitlerin kodu çözülerek bilgi verisinin sağlanmasının yapılmasıdır. Bilgi verisi gibi fazlalık eklenen bitlerin de gürültü sonucunda değişebileceğinden belli bir gürültü seviyesinin üstünde hata düzeltme algoritmaları etkisini kaybetmektedir.

Hata kodlama algoritmalarının birbirine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin Reed-Solomon hata düzeltme kodları aralıklı hataları düzeltmede başarılıyken turbo kodlama hata patlamalarında (ardışık hatalı bitlerin oluşması) daha başarılıdır [32,33].

#### 1.3.3.1. Bose Chaudhuri Hocquenghem Kodlama

Bose Chaudhuri Hocquenghem hata düzeltme algoritmasıdır. BCH kodlama, adını bu kodlamayı bulan kâşiflerden almıştır. BCH algoritmasını özet olarak açıklamak gerekirse vericideki bilgi mesajı kodlanarak sendrom matrisi oluşturulmaktadır. Bu matris ile birlikte veriye eşlik bitleri eklenmektedir. Alıcı kısımda sendrom matrisi tekrar çarpılır. Çarpım sonucunda bir sütun matris elde edilmektedir. Bu sütun matris sendrom matrisindeki bir sütunla aynı ise o sütundaki bitin hatalı olduğu anlaşılmaktadır ve değiştirilmektedir. Çarpım sonucunda bulunan sütun matrisinin elemanlarının tümü sıfır ise gelen veride hata yok anlamına gelmektedir [34,35].

BCH kodlamada  $k$  mesaj uzunluğu,  $n$  kodlanmış veri uzunluğu,  $m \geq 3$ ,  $t < 2^{m-1}$  olmak üzere; blok uzunluğu  $n = 2^m - 1$  ve eşlik bitlerinin sayısı  $n - k < mt$  olmalıdır. Örnekle açıklamak gerekirse, ilk element  $GF(2^4)$  için  $1 + \alpha + \alpha^4 = 0$  olsun.  $\alpha, \alpha^3, \alpha^5$  için en küçük polinomlar sırasıyla  $\phi_1(x) = 1 + x + x^4$ ,  $\phi_3(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4$  ve  $\phi_5(x) = 1 + x + x^2$  olmaktadır. Çift hata düzeltecek BCH kodun uzunluğu  $n = 2^4 - 1 = 15$  olarak üreteç fonksiyonu  $g(x) = \text{LCM}[\phi_1(x), \phi_3(x)] = (1 + x + x^4)(1 + x + x^2 + x^3 + x^4) = (1 + x^4 + x^6 + x^7 + x^8)$  olmaktadır. LCM işlemi en küçük ortak kat işlemidir.  $n-k = 8$  olduğundan bu kodlama (7,15) kodlama anlamına gelmektedir. BCH hata düzeltme algoritması en basit haliyle şu şekilde çalışır;

- Verici kısımda veri üreteç polinomuyla çarpılarak daha uzun boyuttaki kodlanmış veri elde edilir.
- Kodlanmış veri ile çarpıldığında sıfır matrisi elde edilen, eşlik denetleme matrisi bulunur.
- Alıcı kısımda alınan seri ile eşlik denetim matrisi çarpıldığında sıfır matrisi elde edilmelidir. Elde edilen matrise sendrom (Syndrome) matrisi denilmektedir.
- Sendrom matrisi hata olması durumunda hatanın yerini bulmaktadır.

İkilik düzende veriler iletildiğinden dolayı veri ya 0 ya da 1 olacaktır. Hatanın bulunması durumunda o bitin değeri değiştirilmektedir. Böylece hata düzeltilmiş olur [36].

### **1.3.4. Hata Algılama**

Hata düzeltme algoritmaları fazla sayıda gelen hatalı verinin hepsini düzeltmede başarısız olabilirler. Bu tür sorunlarda hata algılama algoritmaları kullanılarak güvenilirlik iyileştirilebilir. Hata algılama algoritmaları başta CRC (Cyclic Redundancy Check) algoritması olmak üzere veri dizisindeki hatanın varlığını denetleme amacıyla kullanılmaktadırlar. Hatanın hangi bitte olduğu bilgisine hata algılama algoritmalarında ulaşılamadığı için hata düzeltme algoritmalarından ayrı bir başlık altında açıklanmalıdırlar. Hata algılama algoritmaları, hata düzeltme algoritmalarının düzeltilmediği hataları tespit edebilir ve bu durumda vericiye veriyi tekrar gönder isteğinde bulunabilir. Hata düzeltme algoritmaları gibi hata algılama algoritmalarının da bir sınırı bulunmaktadır. Bu sınır aşıldığında yine de hata bulabilir ama gelen veride hata olmasına rağmen hatasız veri olarak algılayabilir. Bu riske girmemek adına teorik hata algılama sınırına riayet edilmesi tavsiye edilmektedir [37].

#### **1.3.4.1. CRC Hata Algılama Algoritması**

Hata algılama yöntemleri arasında en sık kullanılan yöntemlerden biri CRC hata algılama algoritmasıdır. CRC hata algılama algoritmasındaki üreteç polinomu hem alıcı hem de verici tarafından bilinmektedir. Belli bir dizinin CRC üreteç polinomuna bölünmesi sonucunda bölümünden kalan polinom CRC kodu olarak adlandırılır. Veri alışverişi sağlandığında alıcı taraf alınan veriyi üreteç polinomuna böler ve bölümünden kalan sonucu gelen veri paketindeki ilgili dizi ile karşılaştırır (HCS, FCS). Karşılaştırma sonucunda iki

dizinin birbirinden farklı olması durumunda alıcı, vericiden aynı paketi tekrar göndermesini talep etmektedir.

CRC hata algılama algoritması için sık kullanılan üreteç polinomu ve kullanıldıkları alanlar Tablo 2.'de verilmiştir [38].

Tablo 2. CRC için kullanılan çeşitli üreteç polinomları

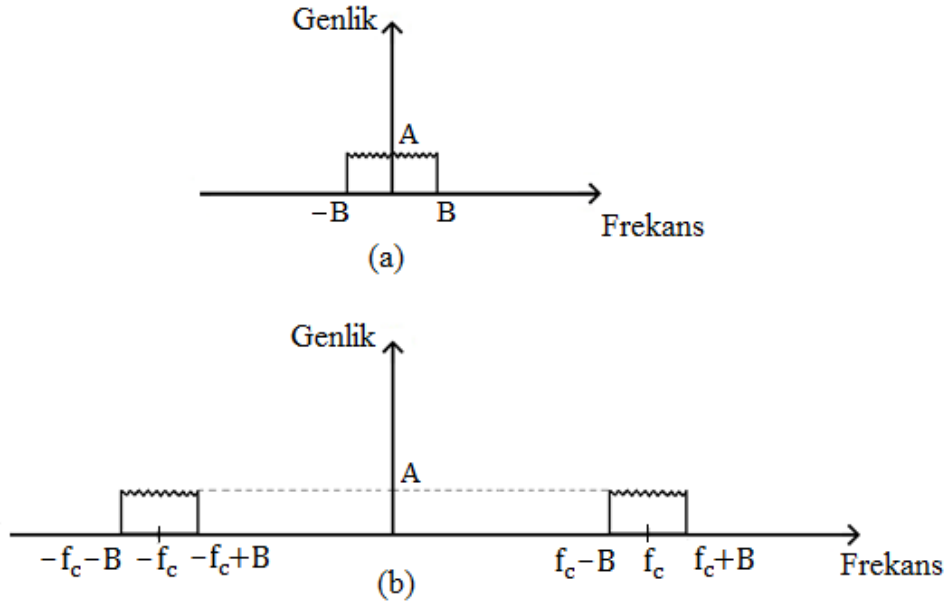
CRC yöntemi	Üreteç polinomu	Kullanılan alan
CRC-1	$x+1$	Eşlik biti
CRC-4	$x^4 + x + 1$	
CRC-5-EPC	$x^5 + x^3 + 1$	2. kuşak RFID
CRC-8-WCDMA	$x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + x + 1$	WCDMA
CRC-15-CAN	$x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$	Arabalar için geliştirilen Denetleyici Alan Ağı (Controller Area Network)
CRC-16-ANSI	$x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$	USB
CRC-16-CCITT	$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$	Bluetooth
CRC-16-DECT	$x^{16} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^3 + 1$	Kablosuz telefonlar
CRC-32-IEEE	$x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$	Ethernet, WiFi, vb.

### 1.3.5. Heterodin İşlemi

Heterodin işlemi iki farklı frekanstaki işaretin çarpılması işlemine verilen isimdir. Haberleşme sistemlerinde modülasyon teknikleri kullanılırken taşıyıcı işaretin frekansı bilgi işaretinin frekansına göre daha yüksektir. Modülasyon işlemi yapabilmek için bu iki işaretin çarpılması gerekmektedir. Zaman uzayında yapılan çarpma işlemi (10) denklemine göre frekans uzayında toplama işlemine neden olmaktadır.  $f_1$ , birinci işaretin frekansı,  $f_2$  ikinci işaretin frekansı olmak üzere; iki işaretin çarpımı eşitlik (1.8) 'de verilmiştir.

$$\cos(2\pi f_1 t) * \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} (\cos(2\pi t(f_1 + f_2)) + \cos(2\pi t(f_1 - f_2))) \quad (1.8)$$

Eşitlik (1.9) formülünden gözlenebileceği gibi iki farklı işaretin çarpılması frekanslarının toplamları ve farkları olarak iki farklı sonuç çıktısı vermektedir. Bu eşitliğe göre frekans uzayında gösterilen bir bilginin taban banttaki genlik frekans grafiği Şekil 12.(a)'da, taşıyıcı ile çarpımının sonucunda oluşan işaretin frekans genlik grafiği Şekil 12.(b)'de verilmiştir.



Şekil 12. (a) Temel banttaki işaretin frekans genlik grafiği, (b) modülasyon sonucunda oluşan frekans genlik grafiği

### 1.3.5.1. Üst Çevirici

Haberleşme sistemlerinde bilgi verisinin antenden gönderilmeden önce yüksek frekansa çıkartılması gerekmektedir. Bunun iki nedeni vardır: Birincisi anten boyutunu küçültmek, ikincisi ise etraftaki diğer elektromanyetik işaretlerle karışmaması için farklı frekans bandına geçmektir. Elektronik haberleşme devrelerinde frekansı yükselten kısma üst çevirici (up-converter) adı verilir. Üst çevirici, bilgi verisini taşıyıcı bir frekansla çarparak Şekil 12'deki gibi frekans ekseninin yükselme işlemi yapmaktadır. Bazı iletişim sistemlerinde temel bantta olan bilgi işareti radyo frekansına çıkartılmadan önce ön işlemler için orta frekansa (IF) çıkartılmaktadır. Yüksek frekanslı işaretler üzerinde işlem yapmak daha maliyetli ve zor olduğu için IF frekansı kullanılmaktadır.  $f_c$  taşıyıcı işaretin frekansı ve  $f_1$  bilgi işaretinin frekansı olmak üzere çarpma işlemi eşitlik (1.9)'da verilmiştir.

$$\cos(2\pi f_1 t) * \cos(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} (\cos(2\pi t(f_1 + f_c)) + \cos(2\pi t(f_1 - f_c))) \quad (1.9)$$

Eşitlik (1.10)'da verilen eşitlikte kırmızı yazılan işaret fonksiyonu süzme işlemi ile yok edilir. Yeşil işaret ise düşük gürültülü yükselteç ile genliği yükselttilerek antene gönderilir.

### 1.3.5.2. Alt Çevirici

Alıcı kısma radyo frekansı olarak gelen işaret alt çevirici (down-converter) yardımıyla temel banda düşürülmektedir. Alt çevirici, gelen radyo frekansını yine taşıyıcı işaretin frekansıyla çarpmaktadır. Bu çarpım eşitlik (1.10)'da verilmiştir.

$$\cos(2\pi t(f_1 + f_c)) * \cos(2\pi f_c t) = \frac{1}{2} \left( \cos(2\pi t(f_1 + f_c + f_c)) + \cos(2\pi t(f_1 + f_c - f_c)) \right) \quad (1.10)$$

Çarpım sonucunda elde edilen işaret alçak geçiren süzgeçten geçirilmektedir. Böylece kırmızı ile yazılan yüksek frekans bileşeni elenmiş olur. Filtreden genliği değişmeden ya da az değişerek geçen yeşil ile yazılan işaret yükselttilerek işleme tabi tutulur. İşlemler sonucunda alıcı gönderilen işareti almış olur.

### 1.3.6. Eş Zamanlama

Haberleşme sistemleri eşzamanlı ve eş zamansız olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Günümüz teknolojisinde asenkron haberleşme oldukça sık kullanılmaktadır. Asenkron haberleşme yapan sistemlerde de vericiden gelen işaretin çıkış süresi bilinmediği için alıcı kısımda eş zamanlama (senkronizasyon) işlemi yapılması gereklidir. Eş zamanlama işlemi için farklı yöntemler kullanılmaktadır. IEEE 802.15.6 haberleşme protokolünün fiziksel katmanında kullanılan yöntem, bilgi verisinden önce gönderilen ve alıcı kısım tarafından da bilinen bir veri dizisi veri paketinin başına yerleştirilmektedir. Alıcı kısım bilgi verisini almadan önce aldığı bütün verilerle bu veri dizisinin ilintisini (korelasyonunu) değerlendirmektedir. İlinti işleminin sonucu haberleşme kanalındaki gürültü, bayılma vb. gibi bozucu etkenlere göre başarıyı etkilenmektedir. Bozucu etkenlerin çok fazla olması

durumunda eş zamanlama başarısız olup, ilgili veri paketindeki bilgi kaybedilememektedir [34].

Eş zamanlama için ilinti işleminden farklı işlemler de kullanılmaktadır. IEEE 802.15.6 haberleşme protokolünde, alıcı kısımda daha düşük enerji tüketimi için alınan veri paketi bir sonraki veri paketinin ne kadar süre sonra gönderileceği bilgisini de içermektedir. Bu bilgi alıcı ve verici kısımlarındaki RF kısımlarını, paketler arası bekleme süresi boyunca uyku moduna geçirerek enerji tasarrufu ve bir dahaki veri paketinin geleceği zaman bilgisi olduğu için eş zamanlama kolaylığı sağlamaktadır [39].

### 1.3.7. Kod Yayma Spektrumu

IEEE 802.15.4 standardında bulunan kod yayma spektrumu, mesaj bitlerinin sayısını belli bir tabloya göre arttırarak aynı bilgiyi daha fazla bitle göndermektedir. Kod yayma spektrumunda, giriş sembollerinin boyutu arttırılarak işlem yapılmaktadır. Bu nedenle aynı bilgi boyutu daha fazla bitle gönderilmektedir. Sembollerin daha fazla bitle temsil edilmesi de sembollerin sabit veri iletim hızında daha geç iletilmesine neden olmaktadır. IEEE 802.15.4 standardında önerilen kod yayma spektrumu için dönüşüm tablosu Tablo 3.'te verilmiştir [27].

Tablo 3. IEEE 802.15.4 kod yayma spektrumu dönüşüm tablosu

Bilgi Verisi	Spektrum çıktısı
0000	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
0001	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
0010	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
0011	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
0100	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

Tablo 3'ün devamı

0101	00110101001000101110110110011100
0110	11000011010100100010111011011001
0111	10011100001101010010001011101101
1000	10001100100101100000011101111011
1001	10111000110010010110000001110111
1010	01111011100011001001011000000111
1011	01110111101110001100100101100000
1100	00000111011110111000110010010110
1101	01100000011101111011100011001001
1110	10010110000001110111101110001100
1111	11001001011000000111011110111000

Tablo 3.'te verilen kod yayma spektrumu kullanıldığında 4 bit uzunluğundaki bilgi verisi 32 bit uzunluğuna çıkmaktadır. Alıcı kısımda gelen veriler bilgiye çevrilirken ilinti işlemi yapılmaktadır. Alınan veri Tablo 3.'te verilen 16 farklı algoritma çıktısı ile ilinti işlemine tabi tutularak gelen bilgi verisinin kestirimi yapılmaktadır. İşaret gürültü oranı tarafından bakıldığında; 4 bitlik enerjiye sahip bilgi verisi, 32 bitlik enerji dönüştürülmektedir. Bu işlemde yapılan 8 katlık enerji artışı işaret gürültü oranında 8 ile 10 dB arasında kazanç sağlamaktadır. Bu nedenle işaret gürültü oranı açısından bakıldığında oldukça başarılı bir yöntemdir.

Bunun dışında gelen her 32 bitlik veri parçası 16 farklı spektrum çıktısı ile ilinti gerçekleştirildiğinden alıcı kısımda işlemcide fazladan iş yükü ve gecikme süresi söz konusu olmaktadır.

#### 1.4. IEEE 802.15.6 Haberleşme Protokolü

Moore yasası bilgisayarların ve mikrobilgisayarların her iki yılda bir işlem güçlerinin iki katına çıkacağını ön görmüş ve son 50 yılda bu oran yasanın ön gördüğü orandan fazla uzaklaşmamıştır [40,41].

Elektronik cihazların boyutlarının küçülmesi ve işlem güçlerinin artmasıyla birlikte, insan vücudunun etrafında haberleşebilecek küçük ve taşınabilir cihazlar geliştirilmektedir. Bu cihazlardan bazıları giyilebilmektedir, bazıları ise tıbbi operasyonlarla birlikte insan vücuduna yerleştirilebilmektedir. Bu cihazların topladıkları insan vücudu sinyallerini uzaktaki başka bir cihaza aktarabilmeleri gereklidir ki insan vücudundaki biyolojik işaretler incelenebilsin. Bu aktarım için, IEEE 802.15.6 standardı insan vücudunun üstünde veya deri altında, kısa menzilli kablosuz haberleşmeyi destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. IEEE 802.15.6 standardı, endüstriyel, bilimsel ve tıbbi radyo frekans bandlarının (Industrial, Scientific, & Medical radio frequency band, ISM) dışında farklı frekans bandlarını da kapsamaktadır. ISM bandlarının dışında bandları kapsamaması, diğer protokolleri kullanan farklı işaretlerden arındırılmış daha temiz bir haberleşme kanalında haberleşmeye olanak sağlamaktadır. Düşük menzilde ve temiz kanalda çalışabilmesi cihazın düşük çıkış gücüyle çalışabilmesine olanak sağlamaktadır. Düşük güçle çalışması insan vücudu tarafından özel soğurma oranını (specific absorption rate, SAR) düşürmekte ve pil ömrünü uzatmaktadır. Frekans bandlarına ve fiziksel katman tipine göre veri iletim seçenekleri Tablo 4.'te verilmiştir [39].

Tablo 4. IEEE 802.15.6 haberleşme protokolü için veri iletim hızı seçenekleri

Fiziksel katman	Frekans bandı (MHz) ya da modülasyon türü	Veri iletim hızı 0 (kb/s)	Veri iletim hızı 1 (kb/s)	Veri iletim hızı 2 (kb/s)	Veri iletim hızı 3 (kb/s)	Veri iletim hızı 4 (kb/s)	Veri iletim hızı 5 (kb/s)	Veri iletim hızı 6 (kb/s)	Veri iletim hızı 7 (kb/s)
Dar Bant (Narrow band, NB)	402 - 405	75.9	151.8	303.6	455.4	Yok	Yok	Yok	Yok
	420 - 450	75.9	151.8	187.5	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
	863 - 870	101.2	202.4	404.8	607.1	Yok	Yok	Yok	Yok



Tablo 4'ün devamı

Dar Bant (Narrow band, NB)	902 - 928	101.2	202.4	404.8	607.1	Yok	Yok	Yok	Yok
	950 - 958	101.2	202.4	404.8	607.1	Yok	Yok	Yok	Yok
	2360 - 2400	121.4	242.9	485.7	971.4	Yok	Yok	Yok	Yok
	2400 - 2483.5	121.4	242.9	485.7	971.4	Yok	Yok	Yok	Yok
Ultra Geniş Band (UWB)	Non-coherent	394.8	789.7	1579	3159	6318	12 636	Yok	Yok
	Differential y coherent	487	975	1950	3900	7800	15 600	557	1114
	FM	202.5	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
İnsan Vücutlu Haberleşmesi (Human body communications, HBC)	21	164	328	656	1312.5	Yok	Yok	Yok	Yok

ISM bandının dışında kalan ve çalışmaların gerçekleştiği 2360 MHz-2400 MHz frekans bandı için modülasyon türünün değişiminin veri iletimi üzerindeki etkisi Tablo 5.'te verilmiştir.

Tablo 5. 2360-2400 MHz frekans bandında dar bant fiziksel katman için veri iletim bilgileri

Paket bileşeni	Modülasyon türü ( $M$ )	Sembol hızı $= 1/T_s$ (ks/s)	Kodlama oranı ( $k/n$ )	Yayımlı çarpanı ( $S$ )	Darbe şekli	Bilgi verisi hızı (kb/s)
PLCP Başlığı	$\pi/2$ -DBPSK ( $M = 2$ )	600	19/31	4	SRRC	91.9
PSDU	$\pi/2$ -DBPSK ( $M = 2$ )	600	51/63	4	SRRC	121.4
PSDU	$\pi/2$ -DBPSK ( $M = 2$ )	600	51/63	2	SRRC	242.9
PSDU	$\pi/2$ -DBPSK ( $M = 2$ )	600	51/63	1	SRRC	485.7
PSDU	$\pi/4$ -DQPSK ( $M = 4$ )	600	51/63	1	SRRC	971.4

### 1.4.1. IEEE 802.15.6 WBAN Veri Paketi Yapısı

Çalışmanın yapıldığı, IEEE 802.15.6 standardında tanımlı dar bant fiziksel katman için oluşturulan veri paketi yapısı Şekil 13.'te gösterilmiştir.

Fiziksel katman yakınsama prosedürü (Physical Layer Convergence Procedure, PLCP)				Fiziksel katman servis veri ünitesi (PHY Service Data Unit, PSDU)					
PLCP Girişi (Preamble)	PHY Başlığı (Header)	HCS	BCH Eşlik bitleri	Paket Kontrol (Frame control)	Alıcı (Recipient) ID	Gönderici (Sender) ID	BAN ID	MAC Ana bloğu (Framebody, Payload)	FCS
90 bit	15 bit	4 bit	12 bit	4 byte	1 byte	1 byte	1 byte	0-255 byte	2 byte
PLCP başlığı (PLCP Header)				MAC başlığı (MAC Header)					

Şekil 13. IEEE 802.15.6 için tanımlı dar bant fiziksel katman veri paketi yapısı

#### 1.4.1.1. PLCP Girişi

Fiziksel katman yakınsama prosedürü (Physical Layer Convergence Procedure, PLCP) bloğunun ilk veri dizisi olan PLCP girişi, alıcı ve verici tarafından bilinen bir dizi içerir. Veri paketinin ilk dizisi olan PLCP girişi alıcı kısmının eş zamanlanması için kullanılır. 90 bit uzunluğunda olan bu dizi kendi altında iki blok daha içerir. Bunlar dizi 1 (sequence #1) ve dizi 2 (sequence #2).

Dizi 1, 67 bit uzunluğunda bir veri dizisidir ve kanal numarasına göre değişmektedir. Çalışmanın yapıldığı 2360 MHz – 2400 MHz frekans bandında bant genişliği 1 MHz olan 40 adet kanal bulunmaktadır. 2360 MHz -2361 MHz frekans aralığındaki kanalın numarası sıfır olmak üzere, frekans arttıkça kanal numarası da artmaktadır. Kanal numarası modulo 2 işlemine tabi tutularak elde edilen sonuca göre dizi 1 değişmektedir. Kısacası iki çeşit dizi 1 dizisi bulunmaktadır ve kanal numarası çift ise ilk çeşit kanal numarası tek ise ikinci çeşit kullanılmaktadır. Kanal numarası çift ise kullanılan seri 1 dizisi eşitlik (1.11)'de verilmiştir.

$$\text{Seri 1} = [0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1] \quad (1.11)$$

Eğer kanal numarası tek ise oluşturulacak seri 1 bit dizisi eşitlik (1.12)'de verilmiştir.

$$\text{Seri 1} = [010101100110111011010010011100010111100101000110000100000111111010101] \quad (1.12)$$

PLCP girişinde bulunan seri 2 bit dizisi 27 bit uzunluğunda olup sabit olarak tanımlanmıştır. PLCP giriş bloğunda bulunan seri 2 bit dizisi eşitlik (1.13)'te verilmiştir.

$$\text{Seri 2} = [010101101101101101101101] \quad (1.13)$$

PLCP giriş bloğu eş zamanlamanın yanı sıra referans gerilimini (offset gerilimi) yeniden düzenlemek için de kullanılmaktadır. Böylece taşıyıcı işaretinin üzerindeki fazlalık gerilim kaldırılabilir.

#### 1.4.1.2. PHY Başlığı

Fiziksel katman başlığı Şekil 14'te verilen bit dizilerini içermektedir.

Veri Hızı	Rezerve	Veri uzunluğu	Rezerve	Peşi sıra gönderme	Çırpıcı (Scrambler Seed)
3 bit	1 bit	8 bit	1 bit	1 bit	1 bit

Şekil 14. PHY başlığında bulunan veri dizileri

Veri hızı bilgisini içeren blok üç bitten oluşmaktadır. Bu da sekiz farklı hızda veri gönderimine olanak sağlamaktadır. IEEE 802.15.6 standardında belirtilen veri hızı seviyelerinin, PHY başlığında bulunan veri hızı bit dizisine göre değişimi Tablo 6.'da verilmiştir.

Tablo 6. IEEE 802.15.6 standardında bulunan veri hızı seçenekleri

Veri hızı bitleri	402 - 405 MHz	420 - 450 MHz	863 - 870 MHz, 902 - 928 MHz, 950 - 958 MHz	2360 - 2400 MHz, 2400- 2483.5 MHz
R0–R2	Veri hızı (kbps)	Veri hızı (kbps)	Veri hızı (kbps)	Veri hızı (kbps)
000	75.9	75.9	101.2	121.4
100	151.8	151.8	202.4	242.9
010	303.6	187.5	404.8	485.7
110	455.4	Rezerve	607.1	971.4
001	Rezerve	Rezerve	Rezerve	Rezerve
101	Rezerve	Rezerve	Rezerve	Rezerve
011	Rezerve	Rezerve	Rezerve	Rezerve
111	Rezerve	Rezerve	Rezerve	Rezerve

Veri uzunluğu bloğunda bulunan 8 bitlik kısım, MAC ana bloğundaki bilgi verisinin bayt uzunluğu bilgisini vermektedir. 8 bitlik veri olduğu için en fazla 255 verisi girilebilmektedir. Bu nedenle kodlanmış veri uzunluğu en fazla 255 byte olabilmektedir.

Peşi sıra gönderme bloğu tek bitlik bir bloktur. Bu blok içindeki bit 1 olduğu zaman paketlerin art arda gönderileceği anlamına gelmektedir. 0 bilgisi atandığında veri paketleri arasında gecikme olacağı anlamına gelmektedir.

Çırpıcı bloğundaki tek bitlik veri 1 olduğunda veri çırpıcısı aktif hale gelmekte, 0 yapıldığında devreden çıkmaktadır.

#### 1.4.1.3. HCS ve BCH Eşlik Bitleri

Başlık denetleme serisi (Header Check Sequence, HCS), kendinden önce gelen PLCP girişi ve PHY başlığı serilerinin CRC-4 hata algılama algoritmasında bulunan üretici kullanarak elde edilen eşlik bitlerini içermektedir. HCS'den önce gelen 109 bitlik kısım  $1 + x + x^4$  polinomuna bölünerek kalan sonuç 4 bitlik HCS dizisinin içine yazılır. Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse HCS eşitlik (1.14)'te verilmiştir.

$$\text{HCS} = \text{Mod}(\text{PLCP Girişi} + \text{PHY Başlığı}, 1 + x + x^4) \quad (1.14)$$

BCH 51,63 veya BCH 19,31 ile kodlanmış veri paketinde 12 bitlik BCH eşlik biti bulunmaktadır. 12 bitlik ilk eşlik biti "BCH eşlik bitleri" bloğuna kaydedilmektedir.

#### 1.4.1.4. Fiziksel Katman Servis Veri Ünitesi

Bu katmanda bulunan veri blokları kullanıcıların kimliği ve örneklenen analog işaretlerin bulunduğu bilgi verisini kapsamaktadır. Bu veriler duruma göre değişebilecekleri için simülasyon ve fiziksel çalışmalarda bu kısım rastgele atanmıştır. Veri bloklarının sonunda bulunan paket denetleme serisi (Frame Check Sequence, FCS) çalışma yöntemi olarak HCS ile aynıdır. Fakat MAC ana bloğu kısmında bulunan kısmın CRC-16 üretici ile bölümünün sonucunda çıkan 16 bitlik kalan polinom FCS dizisine yazılmaktadır. FCS dizisinin oluşturmak için  $1 + x^5 + x^{12} + x^{16}$  polinomu kullanılmıştır. FCS dizinin matematiksel ifadesi eşitlik (1.15) 'te verilmiştir.

$$FCS = \text{Mod}(\text{MAC}, 1 + x^5 + x^{12} + x^{16}) \quad (1.15)$$

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Giriş**

Yüksek lisans tez dönemi sürecinde; IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde bulunan dar bant için tanımlanan fiziksel katmanın içerdiği tüm özellikler kullanılarak veri iletimi simülasyonu yapılmıştır ve kablo eşdeğeri güvenilirliği test edilmiştir. Buna ek olarak, medikal cihazlar için daha önceden geliştirilen IEEE 802.15.4 standardını kullanan ZigBEE protokolü ile veri iletimi simülasyonu yapılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmaların baz alınacağı referans bir başarımlı olması için işlem uygulanmadan ham verinin iletimi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları için MATLAB 2014b yazılımı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar ile IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün vadettiği kablo eşdeğerinde güvenilirlik fiziksel katman açısından incelenmiştir. İyileştirilme yolları araştırılmıştır.

### **2.2. Simülasyon Çalışması**

Haberleşme sistemi simülasyonlarında MATLAB gibi gelişmiş yazılımlar kullanılarak yazılan iyi simülasyon programları oldukça gerçeğe yakın sonuçlar verebilmektedir. MATLAB, haberleşme kanallarındaki gürültünün olasılık yoğunluk fonksiyonlarında, kodlayıcıların kodlama oranları ve üreteç polinomlarında, oluşturulan kaynak özelliklerinde vb. parametrelerde ihtiyacı karşılayacak kütüphanelere sahip olduğu için simülasyon çalışmalarında MATLAB yazılımı kullanılmıştır. MATLAB haricinde OMNet++ programı da denenmiştir fakat OMNet++ fiziksel katmandan ziyade ağ katmanı simülasyonu için geliştirilmiş bir programdır.

Simülasyon çalışmasının avantajı olarak donanım maliyetinin olmaması, donanımsal sorunların çözümünde kaybedilen iş gücünün olmaması, algoritmada ya da senaryoda değişiklik yaparken kolaylık sağlamasıdır. Bunlara karşılık simülasyon çalışmasının hiçbir zaman pratik çalışmaya birebir benzetimi mümkün değildir. Pratik çalışmalarda birçok farklı parametre çalışmaya katılmaktadır. Fiziksel dünyada bu parametreler her an değişmekte olup bu değişime ayak uyduran bir sistem tasarlanmasının mümkün olmadığı düşünülmektedir. Bu

çalışmada kullanılan toplamsal beyaz Gauss gürültüsü ve tek taplı Rayleigh kanal fiziksel dünyada hiçbir zaman tek başlarına haberleşme kanalında bulunmazlar [42-44].

Yine de simülasyon çalışmaları iki veya daha fazla farklı standardı, yöntemi veya algoritmayı karşılaştırırken gerçeğe çok yakın bilgiler vermektedir. Bunun nedeni bir yöntem için ihmal edilen parametrelerin diğer yöntem için de ihmal edilmiş olmasıdır. Böylece yalnızca yöntemler karşılaştırılmış olur.

Simülasyon çalışmalarında 1683 bitlik ham veri hata kodlama veya kod yayma algoritmalarıyla genişletilerek veri paketi oluşturulmaktadır. Veri paketine Şekil 13.'te gösterilen fiziksel katman yakınsama prosedürü ve fiziksel katman veri servis ünitesinde bulunan sabit bloklar eklenerek veri iletimi çeşitli kanallar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmasında her bir paket veri için bütün işlemler tekrar yapılmış olup toplamda her senaryo için 3000 paket veri gönderilmiştir.

### **2.2.1. Monte-Carlo Simülasyonu**

Monte-Carlo simülasyonu, sonucu net belirlenemeyen bir sorunun rastgele veriler kullanılarak yaklaşık çözümünü bulma yöntemidir [45]. Rastgele kullanılan verilerin miktarı arttırıldıkça sonuca yakınlık artacağı için daha hassas ve dolayısıyla daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Simülasyon çalışmasında özellikle düşük işaret gürültü oranı seviyelerinde yüksek hata bulunmaktadır. Yüksek hatanın olduğu işaret gürültü oranı seviyelerinde, simülasyonun 3000 veri paketini aynı işlemde geçirmesi yerine belli bir hata değerine ulaşıldığında simülasyonun durdurulup bir sonraki işaret gürültü oranı için tekrar aynı işlemlere başlanması simülasyon süresini oldukça kısaltmaktadır. Bu hata limiti tez çalışması kapsamında 4000 hatalı bit olarak ayarlanmıştır. Eğer bir işaret gürültü oranı için yapılan hatalı bitlerin toplamı 4000 biti aşarsa o anlık döngüdeki işaret gürültü oranı için simülasyon bitip yeni işaret gürültü oranına geçilmektedir [48-50].

### **2.2.2. İşaret Akış Diyagramları**

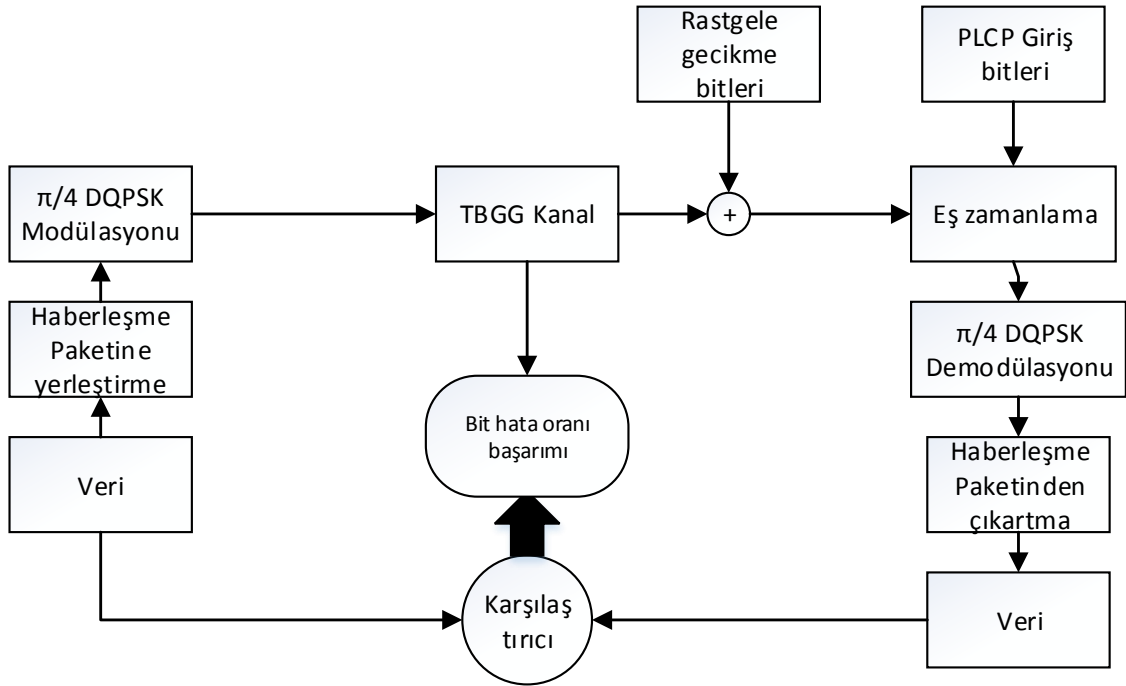
Simülasyon çalışmasına başlamadan önce çalışmalarının yapılacağı işaret akış diyagramları hazırlanmıştır. Simülasyon çalışmalarında TBGG kanalda ve tek taplı Rayleigh kanalda; ham verinin iletimi, IEEE 802.15.6 WBAN haberleşme protokolü kullanılarak veri iletimi, IEEE 802.15.4 standardı kullanılarak veri iletimi ve IEEE 802.15.6 WBAN

protokolünü kod yayma algoritması ile iyileştirerek veri iletimi senaryoları gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.2.1. Ham Verinin İletimi İçin İşaret Akış Diyagramları

Yapılan simülasyon çalışmalarında referans olmak üzere ham veri iletimi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ham veri iletimi yapılırken veri paketi herhangi bir hata düzeltme ya da hata algılama algoritmaları kullanılmadan TBGG ve frekans seçmesiz Rayleigh haberleşme kanallarındaki bit hata oranı başarımları incelenmiştir. Bilgi verisi yalnızca veri paketine yerleştirilip, eş zamanlama işlemi ve modülasyon işlemi yapılarak veri iletimi simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

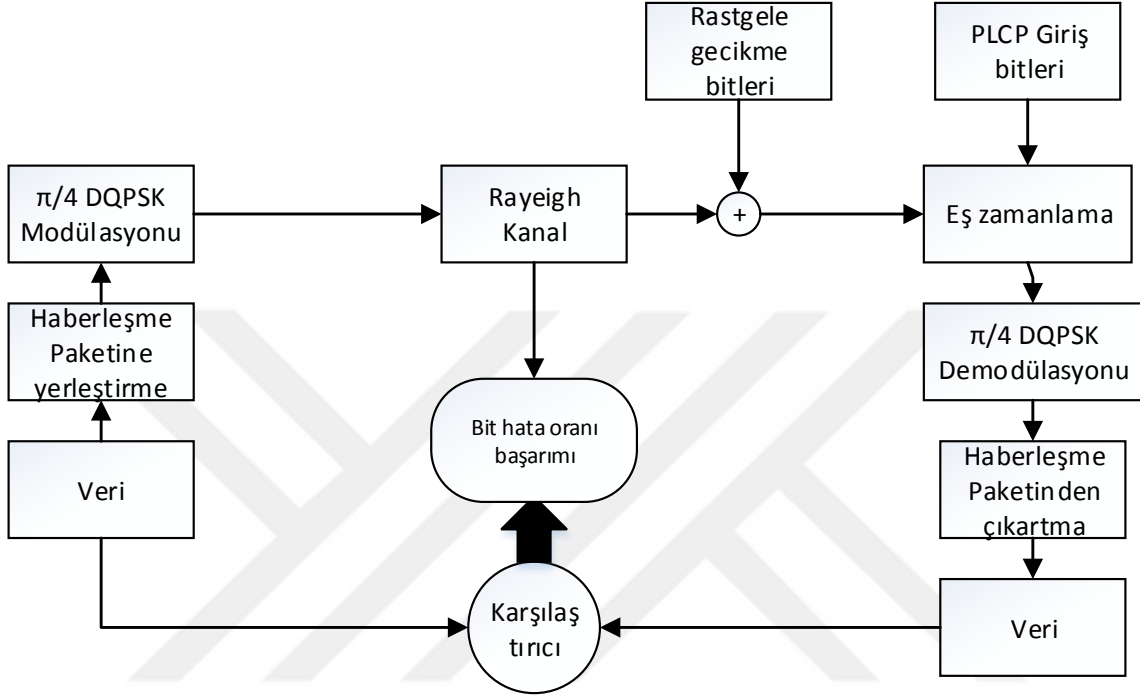
Yapılan çalışmada haberleşme kanalının eş zamanlama işlemine etkisi olacağı için PLCP giriş bitleri kullanılarak simülasyona eş zamanlama işlemi eklenmiştir. Alınan veriler ve gönderilen veriler karşılaştırılarak bit hata oranı elde edilmiştir. İşaret gürültü oranı ve bu orandaki bit hata oranı aynı grafiğin farklı eksenleri olacak şekilde logaritmik olarak çizdirilerek işaret gürültü oranı bit hata oranı başarımları incelenmiştir. Haberleşme simülasyonuna ilişkin işaret akış diyagramı Şekil 15’te verilmiştir.



Şekil 15. Ham veri iletimi için kullanılan işaret akış diyagramı



Tek taplı Rayleigh kanal modelinde haberleşmenin simülasyonunu gerçekleştirmeden önce referans olması için ham verinin iletimi için gerçekleştirilen simülasyon işaret akış diyagramı Şekil 16’da verilmiştir.



Şekil 16. Ham verinin Rayleigh kanal iletimi için işaret akış diyagramı

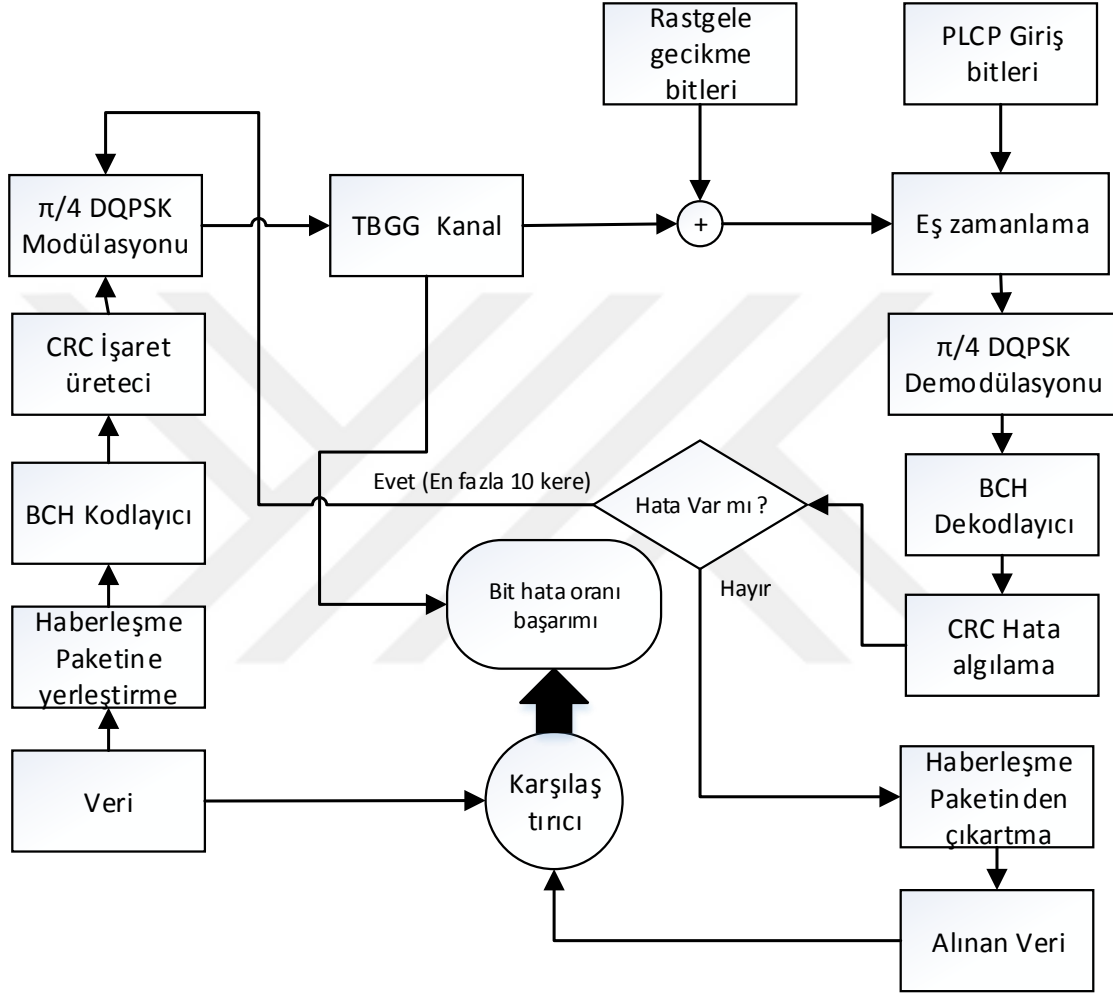
Bit hata oranı analizi yapılırken kanaldan alınan işaret gürültü oranı bilgisi çizilecek grafikte yatay eksenini oluştururken gönderilecek veri ile alınan verinin karşılaştırılması bit hata oranı bilgisi olarak dikey eksenini oluşturmaktadır.

### 2.2.2.2. IEEE 802.15.6 WBAN Protokolü İçin İşaret Akış Diyagramları

IEEE 802.15.6 WBAN haberleşme protokolü için TBGG kanalda ve tek taplı Rayleigh kanalda simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde, daha önce bahsedilen BCH 51,63 hata düzeltme algoritması ve CRC-4 ve CRC-16 hata algılama algoritmaları kullanılmıştır. Normal şartlar altında CRC hata algılama algoritması hata algılaması durumunda bilgi verisinin vericiden tekrar gönderilmesini istememektedir. Fakat bit hata oranı, işaret gürültü oranı grafiğindeki başarımları iyileştirmek için yapılan çalışmada, CRC hata algılama yönteminin hata algılaması durumunda alıcı kısımdan verici kısma veri

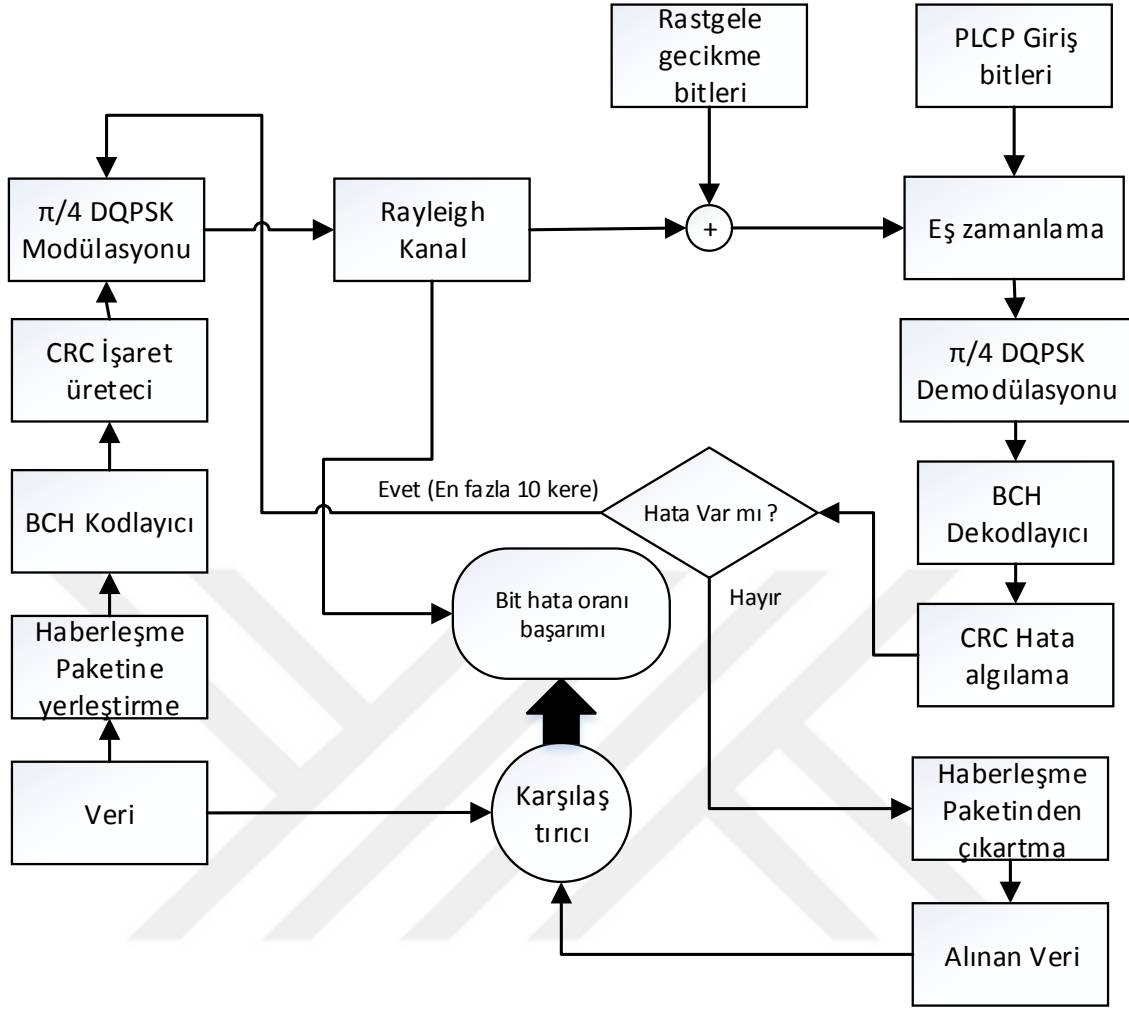
paketini tekrar gönderme isteği gönderilmektedir. Bu işlem art arda en fazla on kereye kadar tekrarlanmaktadır.

TBGG kanal için tasarlanan simülasyon için işaret akış diyagramı şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. IEEE 802.15.6 WBAN protokolü TBGG kanal için Simülasyon işaret akış diyagramı

IEEE 802.15.6 WBAN protokolü kullanılarak tek taplı Rayleigh kanal üzerinden veri iletim simülasyonu tasarımı için işaret akış diyagramı Şekil 18’de verilmiştir.

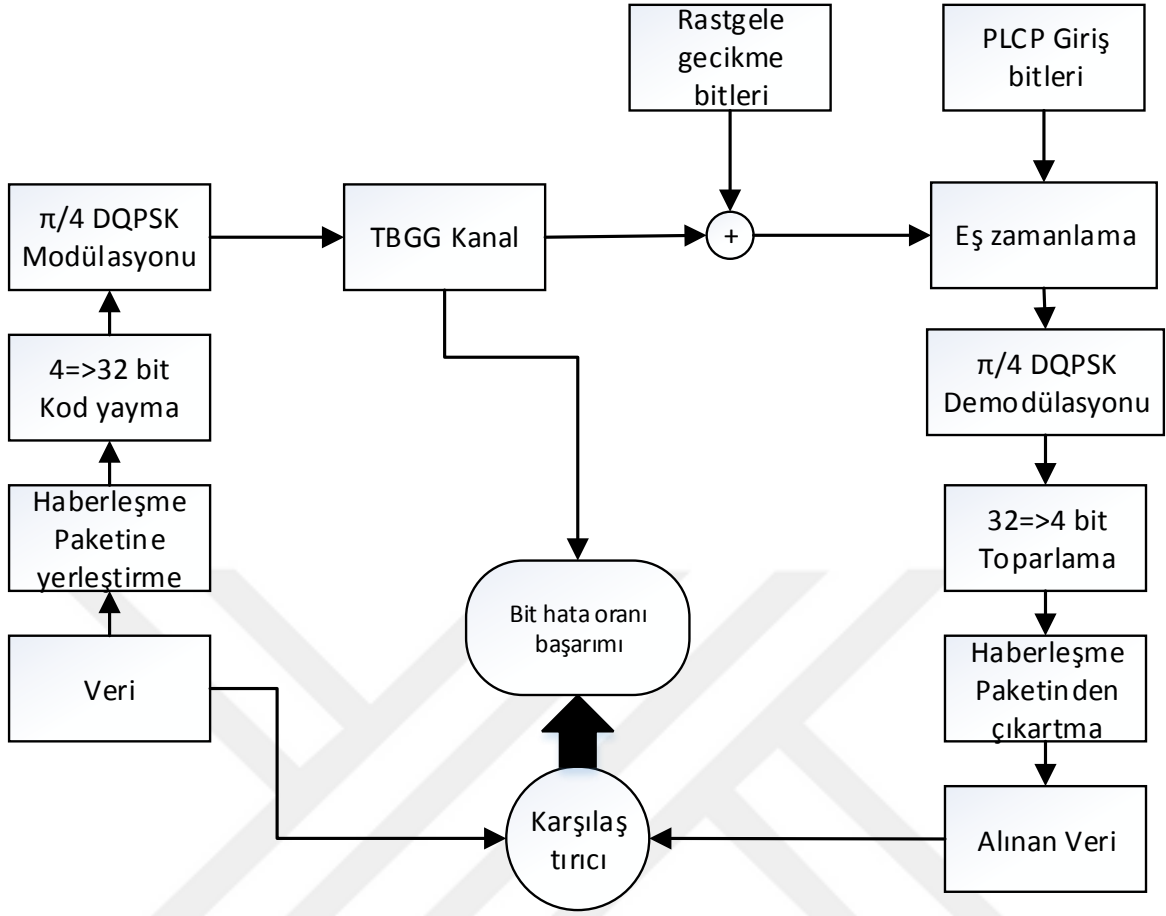


Şekil 18. Rayleigh kanal için IEEE 802.15.6 WBAN protokolü simülasyonu için işaret akış diyagramı

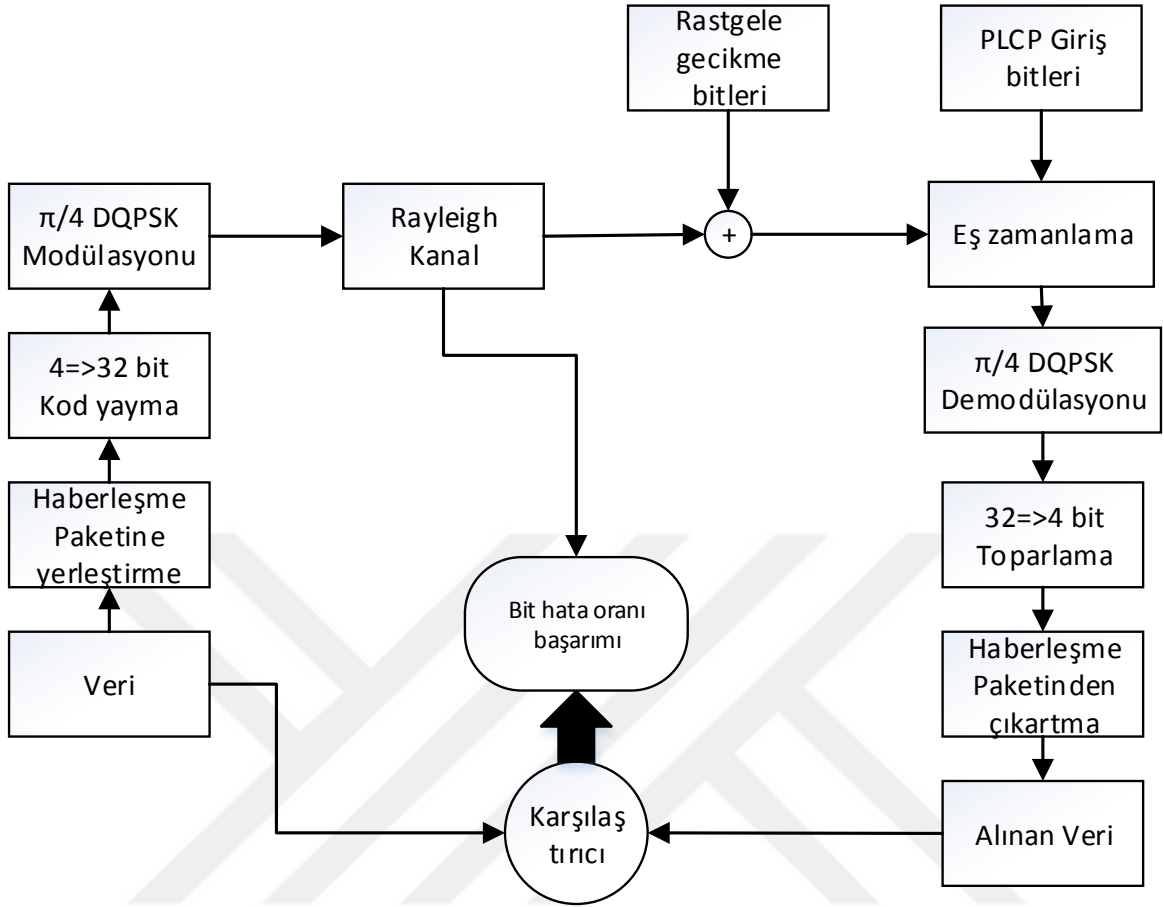
Şekil 17 ve 18’de verilen işaret akış diyagramına sahip simülasyonlar koşturulduktan sonra CRC hata algılama algoritmasının etkisini görebilmek amacıyla CRC hata algılama algoritması kullanılmadan aynı simülasyon tekrar edilmiştir.

### 2.2.2.3. IEEE 802.15.4 Standardı İçin İşaret Akış Diyagramları

IEEE 802.15.4 standardına göre veri iletim simülasyonunda, ham veri iletimi simülasyonuna ek olarak IEEE 802.15.4 standardının tanımladığı Tablo 3’te verilen 4’e 32 kod yayma algoritması kullanılmıştır. TBGG kanal için simülasyon işaret akış diyagramı Şekil 19’da, tek taplı Rayleigh kanal için oluşturulan simülasyonun işaret akış diyagramı Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 19. IEEE 802.15.4 standardı için TBGG kanalda veri iletimi işaret akış diyagramı



Şekil 20. IEEE 802.15.4 standardı için Rayleigh kanalda veri iletimi işaret akış diyagramı

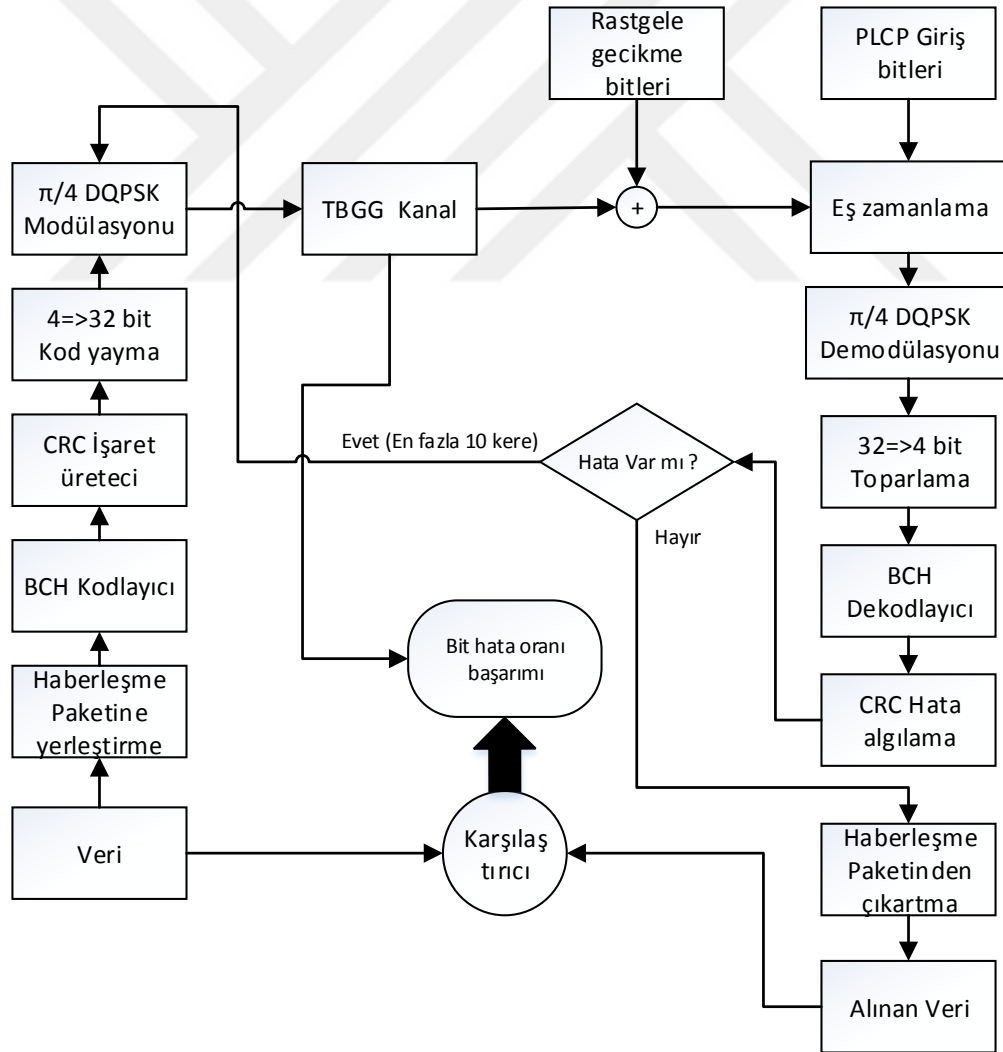
#### 2.2.2.4. Kod Yayma Algoritması ile Geliştirilmiş IEEE 802.15.6 WBAN Protokolü İçin İşaret Akış Diyagramı

Kod yayma algoritmasının kullanımı ile birlikte aynı bit hata oranı başarımları için yaklaşık 8dB – 10 dB arasında daha az işaret gürültü oranına ihtiyaç duyarak bit hata oranı başarımlarının, IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde tanımlanan BCH 51,63 hata düzeltme algoritmasına göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle IEEE 802.15.6 WBAN haberleşme protokolünü kod yayma algoritması ile iyileştirmek için şekil 21'deki simülasyon işaret akış diyagramı kullanılmıştır.

Kod yayma spektrumunun WBAN protokolünde kullanılma amacı güvenilirliği arttırmaktır. Öncelikle WBAN protokolü yaklaşık olarak 971 kbps hızına kadar veri iletimine müsaade etmektedir. Bu uygulama insan vücudundan alınan işaretleri aktaracağı düşünülürse; sıcaklık, nem, oksijen saturasyonu vb. işaretler oldukça yavaş değişmektedir bu nedenle hesaplamada bu tür işaretler ihmal edilirse. En çok veri toplanacak işaret EKG

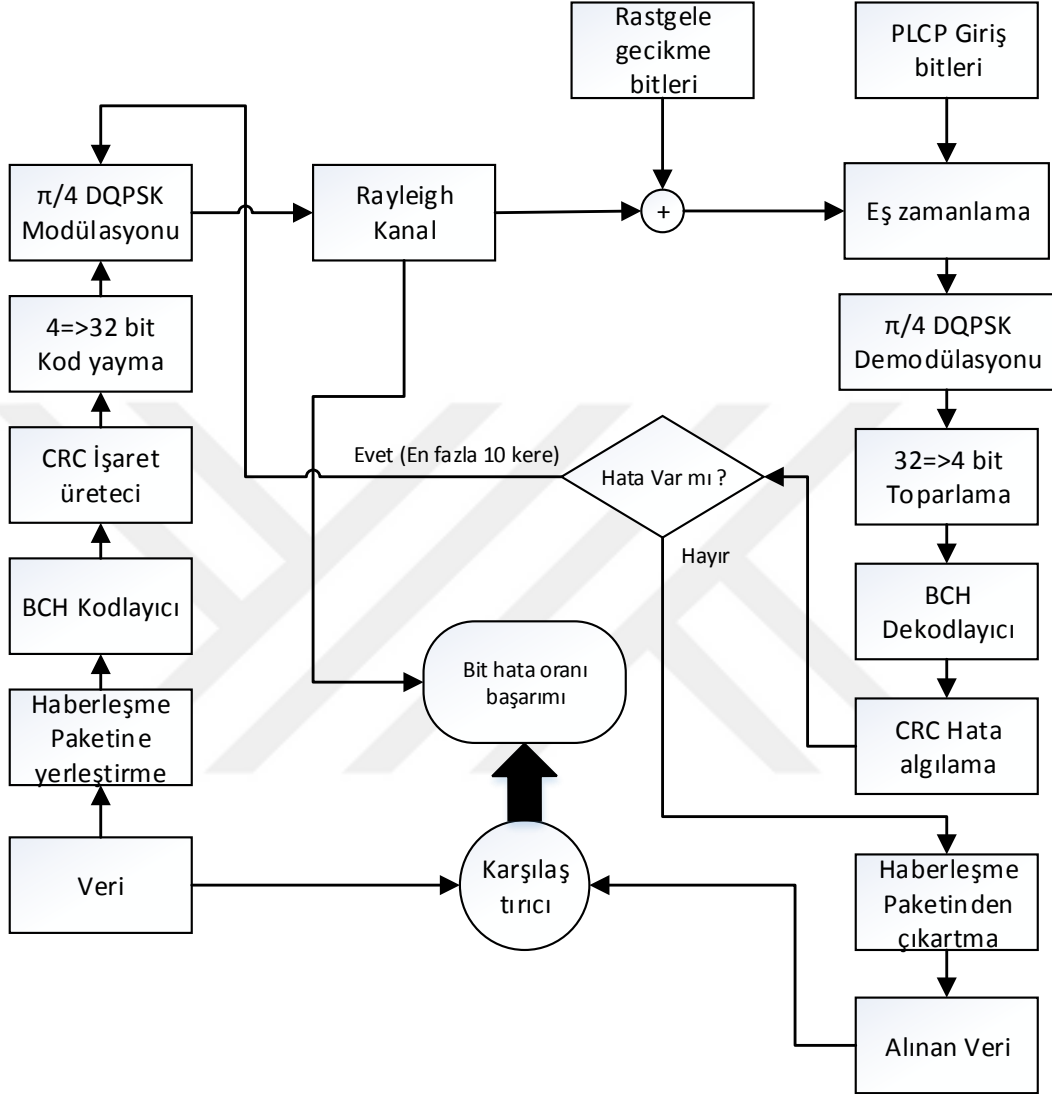
işarettir. Araştırmalara göre EKG işareti saniyede 250 – 1000 örnek arasında veri istenmektedir. Bu işaret 16 bitlik analog sayısal dönüştürücü ile elde edildiği düşünülürse, 3 kanal için  $3 \times 16 \times 1000 = 48$  kbps veri iletim hızına ihtiyaç duyulmaktadır. Hızlı örnekleme ihtiyacının nedeni ise EKG işaretindeki bazı aralıklar yakın gelecekteki kalp krizinin haberini vermektedir. Gönderilecek diğer işaretler ve veri paketinde bulunan kanal ile ilgili bilgiler de göz önüne alınarak iki katına çıktığı var sayılırsa, 96 kbps hızında veri iletimine ihtiyaç duyulacaktır.

Kod yayma spektrumu bilgi mesajını 8 kat uzunluğuna çıkardığından dolayı bilginin iletim hızı sekizde birine düşmektedir. 971 kbps veri iletim hızı kullanılması halinde sekizde biri yaklaşık 121 kbps hızına denk gelmektedir ki bu da gerekli hızı sağlamaktadır. Bu nedenle kod yayma spektrumunu WBAN protokolünde kullanmanın gerçek zamanlı veri iletimi açısından bir sorun teşkil etmemektedir.



Şekil 21. Kod yayma algoritması ile iyileştirilmiş IEEE 802.15.6 WBAN protokolü için TBGG kanal simülasyon işaret akış diyagramı

Şekil 21’de TBGG kanalı için yapılan veri iletim simülasyonu ayrıca tek taplı Rayleigh kanal için tasarlanmış olup, simülasyon işaret akış diyagramı Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 22. Kod yayma algoritması ile iyileştirilmiş IEEE 802.15.6 WBAN protokolü için Rayleigh kanal simülasyon işaret akış diyagramı

Yapılan iyileştirme çalışmalarında BCH 51,63 hata düzeltme algoritması ile kod yayma algoritması art arda kullanılmıştır. Art arda kullanılacak olan algoritmaların hangisinin önce uygulanacağı seçilirken, kod yayma algoritmasının modülasyon ve demodülasyon işlemlerine daha yakın olması uygun görülmüştür. Bunun nedeni demodülasyon kısmından sonra kod yayma algoritmasının toparlama bloğu olmasıdır. Demodülasyon işleminden sonra kod yayma algoritmasının içinde bulunan ilinti işlemi ile düşük işaret gürültü oranlarına rağmen işlem sonucunda en yüksek ilinti değeri olan mesaj

bloğu seçilecektir. Kesin sonuçlara ihtiyaç duymak yerine en yakın sonuçla işlem yapıldığı için güvenilirlik açısından oldukça başarılıdır. Buna karşılık olarak, demodülasyondan sonra BCH kod çözücü kullanılsaydı, düşük işaret gürültü oranında yüksek hatadan dolayı kod çözücü başarısız olacaktır. Böylece BCH kodlayıcı algoritması bit hata oranını iyileştirme işlemi tüm yükü kod yayma algoritmasına yayacaktır. BCH kodlayıcı algoritmasının daha verimli kullanılabilmesi için haberleşme kanalı ile arasında kod yayma algoritması kullanılmıştır.

### 2.2.3. BCH Kodlama

IEEE 802.15.6 standardının dar bant fiziksel katman için tanımladığı hata düzeltme algoritması olan BCH kodlayıcının (51,63) oranlı kodlama algoritması kullanılmıştır. BCH (51,63) kodlayıcısı için bilgi verisi 51 bit ve kodlamanın sonucunda ortaya çıkan kodlanmış veri 63 bit olmaktadır. Çalışmada 19,31 kodlama yerine 51,63 kullanmasının nedeni, Tablo 5.'te gösterilen IEEE 802.15.6 haberleşme standardının tavsiye ettiği veri iletim hızları ve karşılık gelen BCH kodlama oranları dikkate alındığında en yüksek veri iletim hızına karşılık gelen kodlama oranının BCH 51,63 olmalıdır. Yüksek veri hızının yanında, bilgi verisi uzunluğunun toplam veri uzunluğuna oranı açısından BCH(51,63) için  $51/63 = 0,8$  oranında, BCH (19,31) için  $19/31 = 0,61$  oranı olmaktadır. Oranlar karşılaştırıldığında en yüksek oran 51,63 kodlamada bulunmaktadır. Bu oranın yüksek olması veri paketinin bilgi verisi açısından daha verimli kullanılması anlamına gelmektedir. Buna karşılık düzeltilebilecek hata bitleri sayısı yaklaşık yarıya düşmektedir.

Simülasyon çalışmasında rastgele oluşturulan bilgi verisi kodlamaya uygun olması açısından 1683 bit uzunluğunda bir bit dizisi olarak seçilmiştir. Kodlama algoritması sonucunda 1683 bitlik dizi, 2079 bit uzunluğunda kodlanmış veri dizisine dönüşmektedir. Aynı işlem BCH 19,31 kodlamasıyla yapılsaydı, 19'a tam bölünebildiğinden 1672 bitlik bilgi verisi için 2728 bit uzunluğunda kodlanmış veri paketi elde edilir.

### 2.2.4. CRC Kodlama

IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde veri iletim simülasyonu için kullanılan veri paketi yapısı Şekil 13.'te verilmiştir. Veri paketi yapısında, başlık denetleme dizisi (Header Check Sequence, HCS) ve paket denetleme dizisi (Frame Check Sequence, FCS)



bulunmaktadır. Denetleme bloklarının ikisinde de CRC hata algılama algoritması kullanılmaktadır.

4 bit uzunluğunda olan HCS bloğu CRC-4 hata algılama algoritması kullanılmaktadır. CRC-4 hata algılama algoritması için kullanılan üreteç polinomu eşitlik (2.1)'de verilmiştir.

$$G(x) = x^4 + x + 1 \quad (2.1)$$

16 bit uzunluğunda olan FCS bloğu için CRC-16-CCITT hata algılama algoritması kullanılmaktadır. CRC-16-CCITT hata algılama algoritması için kullanılan üreteç polinomu eşitlik (2.2)'de verilmiştir.

$$G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (2.2)$$

Kullanılan üreteç polinomları ile veri paketi için eşlik bitleri üretilerek denetleme bloklarına yerleştirilmiştir.

### 2.2.5. Her Veri İçin TBGG ve Rayleigh Kanalları

Veri iletim simülasyonunda kullanılan TBGG ve tek taplı Raleigh haberleşme kanalları iletim sırasında, işareti bozucu şekilde işarete etki etmektedir. Simüle edilen alıcı verici arasında her hangi bir engel olmadığı var sayıldığında direk görüş açısından haberleşme yapacaktır. Bu kanalı modellemek için TBGG haberleşme kanalı kullanılmıştır.

Alıcı verici arasına bir engel girdiği senaryosu düşünülürse dar bantta çalışıldığı için frekans seçmesiz kanal olacaktır. Bu tip kanal tek tap çarpanlı Rayleigh bayımlı kanal ile modellenmiştir.

TBGG kanal için gürültü gücü toplamsal olup, işaret gürültü oranı 3 dB ile 20 dB aralığındaki etkisi simülasyon çalışmasıyla gözlemlenmiştir. x vericiden çıkan işaret, y alınan işaret ve n gürültü işaretleri olmak üzere alınan veri eşitlik (2.3)'de verilmiştir.

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (2.3)$$

Tek taplı Rayleigh kanal için; x vericiden çıkan işaret, y alınan işaret, h kanal için tap katsayısı ve n toplamsal gürültü işaretleri olmak üzere gerçekleştirilen simülasyon için alınan işaret eşitlik (2.4)'te verilmiştir.

$$y(t) = x(t)*h(t) + n(t) \quad (2.4)$$

Tek taplı Rayleigh kanalı için N gürültü gücü, h tap çarpanı, n toplamsal gürültü eşitlikleri sırasıyla (2.5, 2.6, 2.7)'de verilmiştir. SNR işaret gürültü oranı, randn[-1,1] -1 ile +1 arasında normal dağılıma göre rastgele bir sayı ve j sanal çarpan olmak üzere.

$$N = \frac{1}{10^{\frac{SNR}{10}}} \quad (2.5)$$

$$h = \frac{1}{\sqrt{N/2} * (\text{randn}[-1,1] + j * \text{randn}[-1,1])} \quad (2.6)$$

$$n = \sqrt{\frac{N}{2}} * (\text{randn}[-1,1] + j * \text{randn}[-1,1]) \quad (2.7)$$

Tek taplı Rayleigh kanal için işaret gürültü oranı genellikle 4 dB'den 40 dB'ye kadar simülasyon yapılmıştır.

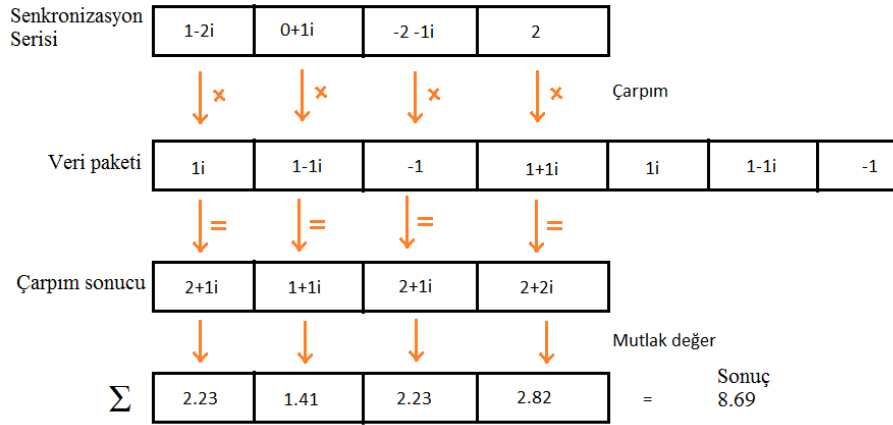
### 2.2.6. IEEE 802.15.6 İçin Veri Paketinin Oluşturulması

Şekil 13.'te verilen IEEE 802.15.6 WBAN haberleşme protokolü için tanımlanmış, dar bant fiziksel katman veri paketi yapısı oluşturulmuştur. Şekil 13'te mavi dolgulu gösterilen "Fiziksel katman yakınsama prosedürü" veri bloğu açıklamalarda verildiği gibi, "BCH eşlik bitleri" veri bloğu hariç sabit olacak şekilde içlerindeki bilgi seçilmiştir. Şekil 13'te turuncu olarak gösterilen "Fiziksel katman servis veri ünitesi" veri bloğu kullanım koşullarında örneklenen veriye ve alıcı, vericinin kimliğine göre değişebileceği için bu blok rastgele bitlerden oluşan veri kümesidir. Bu veri kümesinin BCH 51,63 hata düzeltme algoritması sonucunda oluşan ilk 12 bitlik eşlik bitleri "Fiziksel katman yakınsama prosedürü" veri bloğundaki son seri olan "BCH eşlik bitleri" bloğuna atanmaktadır.

### 2.2.7. Eş Zamanlama İçin Yapılan Çalışmalar

Simülasyon çalışmasının uygulamaya daha yakın olabilmesi için haberleşme kanalından gönderilen veri paketlerinin arasına 1 ile 10 bit süresi uzunluğunda rastgele değişen gecikme süreleri yerleştirilmiştir. Alınan işaretin işlenip analiz edilebilmesi için veri paketi uzunluklarının gönderilen ile alınan paketler için aynı olması gerekmektedir.

Eş zamanlama işlemi için öncelikle eş zamanlama bit dizisiyle gelen bütün veriler birer bit kaydırılarak çarpma işlemi ve toplama işlemi yapılmıştır. Çarpma işlemi için bir örnek Şekil 23.'te verilmiştir.



Şekil 23. Eş zamanlama işlemi için kullanılan çarpma işleminin örnek üzerinde gösterimi

Aynı işlem farklı bir çalışmada toplama olarak yapılmıştır. Toplama ve çarpma işlemlerinin daha doğru sonuç verebilmeleri için her bir bit çarpımı için mutlak değerleri alınarak ortaya çıkan bit serisindeki bütün hücreler toplanmıştır ve o eş zamanlama noktasına ait sonuç elde edilmiştir. Alınan veri bir bit kaydırılarak aynı işlem tekrarlanmıştır.

### 3. BULGULAR

Simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen grafikler ve diğer sonuçlar ilgili bölümlerde verilmiştir.

#### 3.1. Eş Zamanlama Yöntemlerinin Sonuçları

Yapılan eş zamanlama çalışmalarında çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Alınan işaretin ilk 109 biti üzerinde eş zamanlama için kullanılan 90 bit uzunluğundaki PLCP giriş bitleri katlama işlemi uygulanarak işlem gerçekleştirilmiştir. Kullanılan katlama işleminin başarımları eş zamanlama noktasına göre normalize edilmiştir. Bu işlemin sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Katlama işleminin bit sırasına göre sonuçları

Bit sırası	Katlama sonucu
102	0,941176
103	0,588235
104	0,852941
105	0,882353
106	0,705882
107	0,735294
108	1
109	0,617647
110	0,823529
111	0,735294
112	0,705882
113	0,764706
114	0,794118

Veri iletim simülasyonunda TBGG haberleşme kanalında doğru eş zamanlama noktası katlama işleminin sonucunda en yüksek enerjiye göre hesaplanmaktadır. Yapılan katlama işleminde işaret gürültü oranının 8 dB bölgesinde 108. bit eş zamanlama noktası olarak bulunmuştur. Bulunan eş zamanlama noktası doğrudur fakat Tablo 7'de görüleceği üzere

102. bit üzerindeyken yapılan katlamanın enerjisi en yüksek noktaya oldukça yakındır. Bu nedenle katlama işlemi düşük işaret gürültü oranı seviyelerinde yeterince başarılı bulunmamıştır.

Şekil 23'te verilen matrisel çarpım yöntemi ile eş zamanlama gerçekleştirildiğinde çıkan sonuç Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Matris çarpımları işlemiyle eş zamanlama çalışması sonucu

Bit sırası	Çarpım sonucu
1	0,479167
2	0,458333
3	0,583333
4	0,458333
5	0,520833
6	0,541667
7	0,5625
8	0,4375
9	1
10	0,458333
11	0,5625
12	0,5625
13	0,541667

Tablo 8'deki sonuçlara göre işlem sonucunda 9. bitte eş zamanlama gerçekleştirilmiştir. Kaydırarak yapılan çarpma işleminde diğer bit sıralarında bulunan sonuçlarla karşılaştırıldığında aralarındaki fark katlama işlemine göre artmıştır. Bu nedenle matris çarpımları işlemi ile yapılan eş zamanlama çalışması katlama yöntemine göre daha başarılı olmuştur.

Matrisel toplama işlemi uygulandığında alınan eş zamanlama sonucu tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Matris toplamlarının mutlak değeri işlemleriyle eş zamanlama çalışması sonucu

Bit sırası	Toplam sonucu
1	0,27451
2	0,333333
3	0,294118
4	0,235294
5	0,235294
6	0,27451
7	0,352941
8	1
9	0,372549
10	0,27451
11	0,215686
12	0,235294
13	0,215686

Matrisel toplama işlemi ile eş zamanlama işlemi için simülasyon programı tekrar çalıştırıldığında rastgele atanan gecikme bitlerinin sayısı 7 olmuştur. Bundan dolayı 8. bitten itibaren veri paketi alınmaktadır. Eş zamanlama noktaları arasındaki sonuçlar karşılaştırıldığında 8. bitte bulunan toplam sonucu diğer bitlerdeki sonuçlara kıyasla oldukça fazladır. Bu fark çarpma ve katlama işlemlerinden daha fazla olduğu için eş zamanlama işlemi için matrisel toplama ve ilinti işlemleri kullanılmıştır. İlinti işlemi ile yapılan eş zamanlama işlemi sonuçları Tablo 10.'da verilmiştir.

Tablo 10. İlinti işlemi ile eş zamanlama sonuçları

Bit Sırası	İlinti Sonucu
1	0,054014
2	0,082002
3	0,1068
4	0,284296
5	0,083109
6	0,180709
7	0,252175

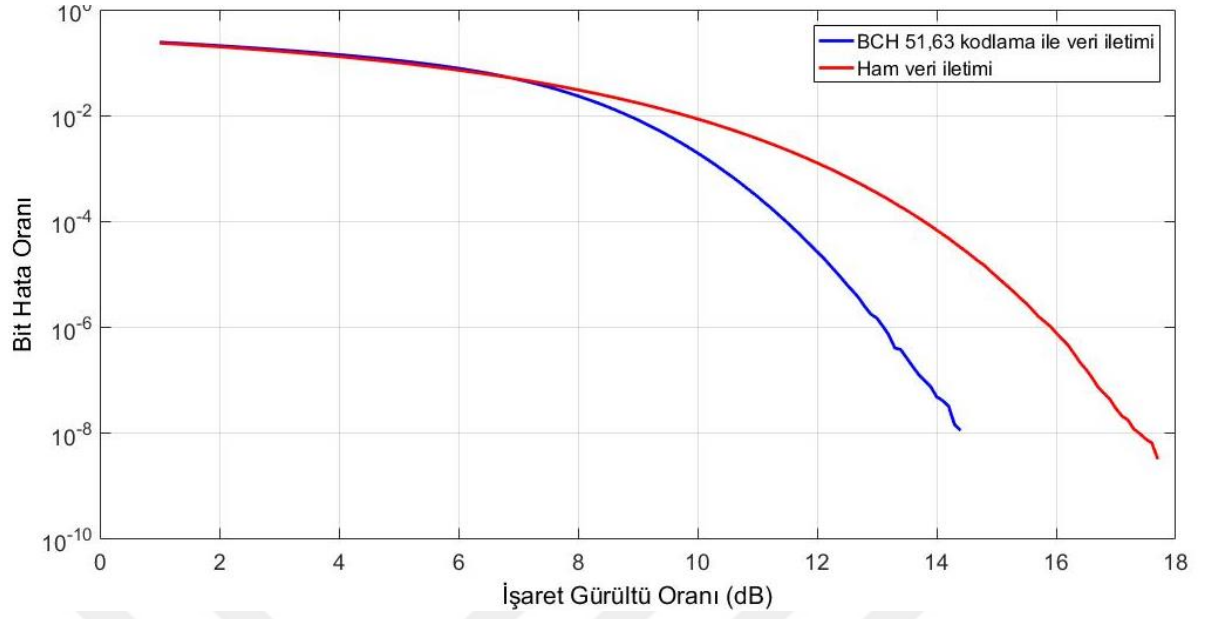
Tablo 10'un devamı

8	0,181562
9	0,137325
10	0,135962
11	1
12	0,08003
13	0,0391
14	0,114901
15	0,08868

Tablo 7., 8., 9. Ve 10. daki sonuçlara göre eş zamanlama noktasındaki sonuç haricindeki sonuçlar bu noktadaki sonuca ne kadar yakınsa eş zamanlama işlemi o kadar riskli olmaktadır. SNR değeri düştüğünde eş zamanlama da yapılamaz hale gelecektir.

### 3.2. BCH Hata Kodlamasının Bit Hata Oranına Etkisi

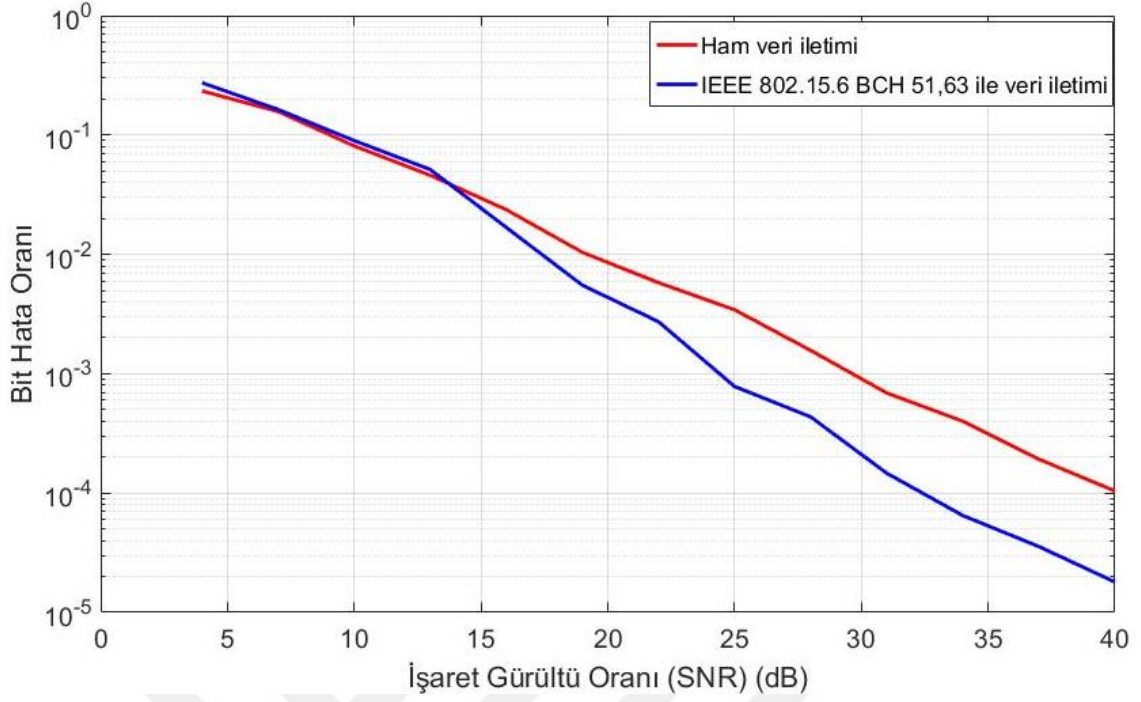
IEEE 802.15.6 WBAN protokolü BER başarımını arttırmak için BCH hata düzeltme kodlaması kullanmaktadır [40]. IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün fiziksel katmandaki işaret gürültü oranına bağlı olarak bit hata oranı ölçümü yapılmıştır. Pi/4 DQPSK modülasyonu kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarında, TBGG haberleşme kanalında yapılan ham veri iletimi ile IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde bulunan BCH 51,63 kodlama işlemine tabi tutulmuş veri iletimi simülasyonlarında elde edilen SNR-BER başarımı Şekil 24.'te verilmiştir.



Şekil 24. Ham veri iletimi ile BCH kodlama simülasyonlarının TBGG kanaldaki başarımları

Şekil 24.'te gösterilen TBGG kanaldaki çalışma ele alındığında işaret gürültü oranı 7 dB olana kadar, IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde bulunan BCH kodlama kullanılarak veri iletimi ile ham veri iletimi arasında bit hata oranı açısından fazla fark görülmemiştir. Milyonda bir bitlik hata hatasız olarak kabul edilecek olursa, hatasız haberleşme koşullarında BCH kodlama yaklaşık 3 dB'lik işaret gürültü oranı kazancı sağlamaktadır. IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün Rayleigh haberleşme kanalındaki işaret gürültü oranı, bit hata oranı başarımı karşılaştırması Şekil 25.'te verilmiştir.





Şekil 25. Ham veri iletimi ile BCH kodlama simülasyonlarının Rayleigh kanalındaki başarımları

Şekil 25'te verilen grafiğe göre tek taplı Rayleigh kanalındaki çalışma ele alındığında işaret gürültü oranı 12 dB olana kadar, IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde bulunan BCH kodlama kullanılarak veri iletimi ile ham veri iletimi arasında bit hata oranı açısından fazla fark görülmemiştir. Milyonda bir bitlik hata hatasız olarak kabul edilecek olursa, hatasız haberleşme koşullarında onbinde bir bit hata oranı için BCH kodlama yaklaşık 7 dB'lik işaret gürültü oranı kazancı sağlamaktadır.

### 3.3. CRC Hata Algılamının Bit Hata Oranına Etkisi

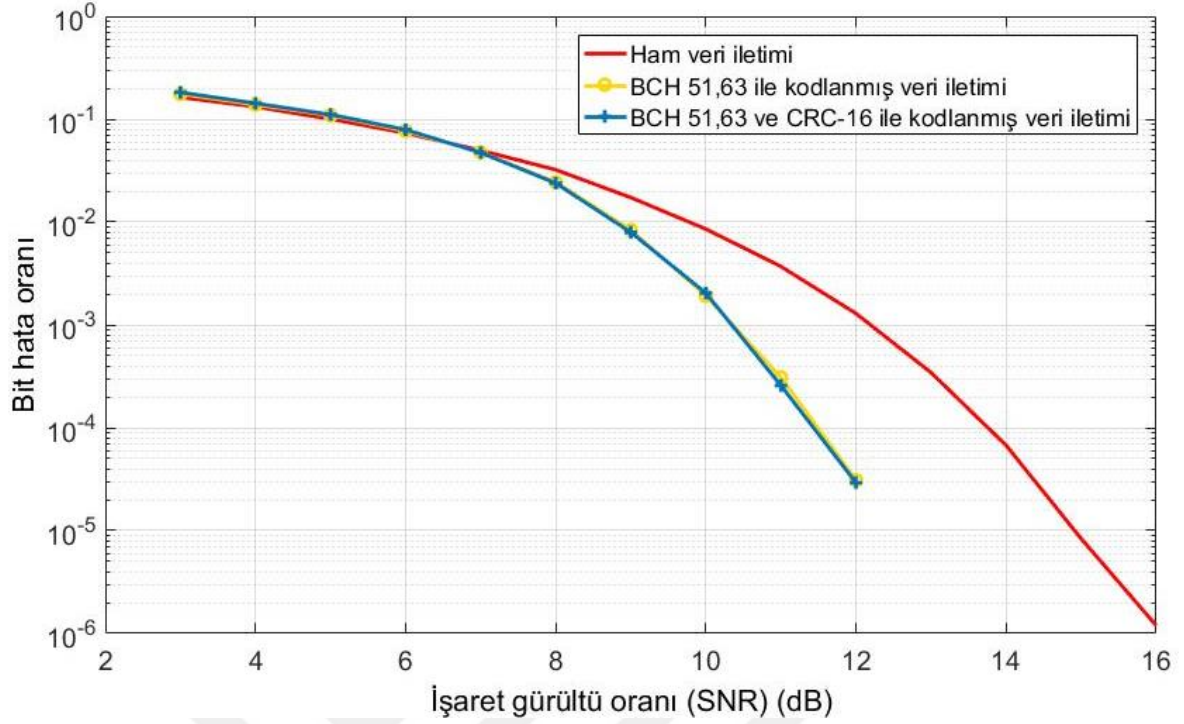
Simülasyon çalışmasında IEEE 802.15.6 WBAN protokolü ile veri iletimi yapılırken bit hata oranını arttırmak amacıyla WBAN protokolü dâhilinde bulunan CRC hata algılama yöntemi kullanılmıştır. CRC hata algılama yöntemi yanlış gelen veri paketlerini algılayarak en fazla on kereye kadar tekrar gönderme isteği göndermektedir. TBGG kanal için işaret gürültü oranına göre tekrar gönderme istekleri Tablo 10.'da verilmiştir.

Tablo 11. CRC hata algılamasının işaret gürültü oranına göre tekrar gönderme isteği sayısı

İşaret gürültü oranı (dB)	Tekrar gönderme isteği
1	10
2	10
3	10
4	10
5	10
6	10
7	10
8	10
9	10
10	10
11	10
12	10
13	10
14	10
15	10
16	4
17	0
18	0
19	0
20	0

Tablo 10’da gösterildiği gibi ilk 15 dB’lik işaret gürültü oranı döngüsünde CRC hata algılama algoritması sürekli hata algılamıştır. Verici kısmına aynı veriyi tekrar göndermesi isteğinde bulunmuştur. Yalnızca 16 dB’lik işaret gürültü oranında dördüncü tekrar göndermeden sonra hatasız veri paketi alınmıştır. Bundan dolayı CRC hata algılama algoritması ile veri paketini tekrar gönderme isteği yöntemi 16 dB haricindeki işaret gürültü oranlarında bit hata oranı başarımına katkıda bulunmamıştır.

CRC hata algılama yöntemi kullanılarak IEEE 802.15.6 WBAN protokolü, kullanılmadan IEEE 802.15.6 WBAN protokolü ve ham verinin TBGG kanaldaki iletimleri sonucunda ortaya çıkan SNR-BER grafiği Şekil 26.’da verilmiştir.



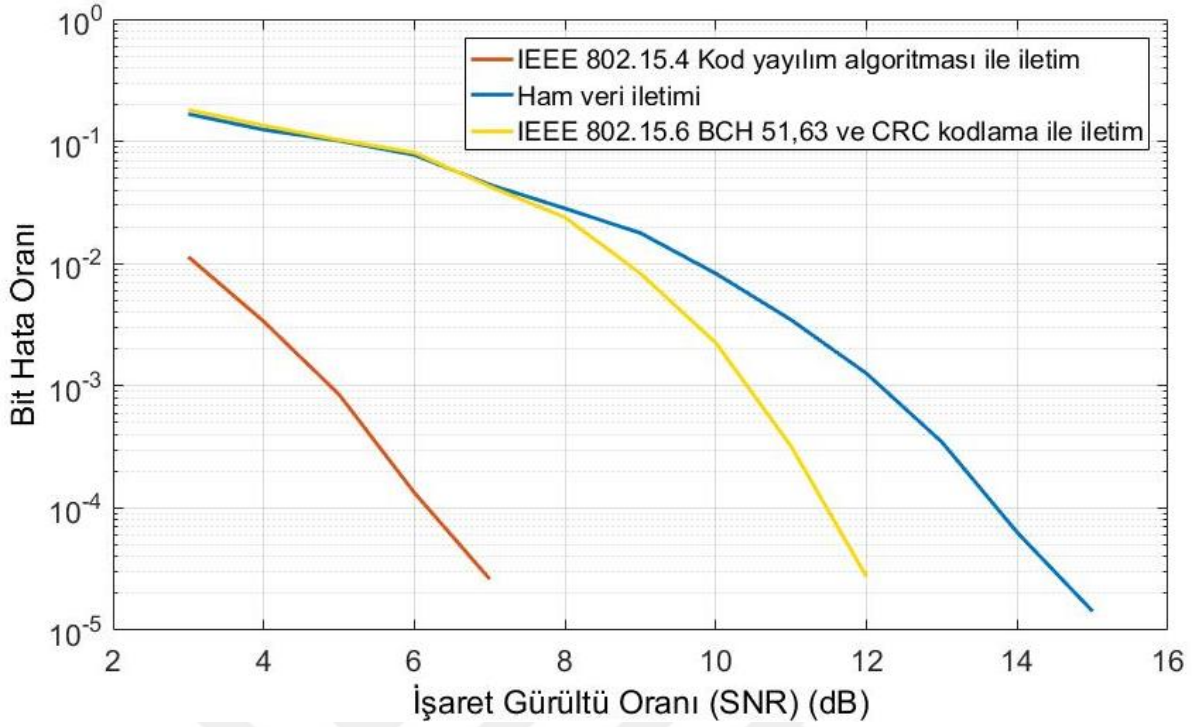
Şekil 26. TBGG kanalda BCH kodlama ile CRC algılama eklenmiş BCH kodlamanın bit hata oranlarının karşılaştırılması

Şekil 26.'daki verilere göre yaklaşık 7 dB'lik işaret gürültü oranından sonra BCH 51,63 ve CRC kodlamalı IEEE 802.15.6 WBAN protokolü ve yalnızca BCH 51,63 kodlama kullanılan IEEE 802.15.6 WBAN protokolü ile veri iletim simülasyonları, ham veri iletimine göre daha iyi sonuç vermeye başlamıştır. Buna karşılık olarak, CRC hata algılama yöntemi kullanılan ve kullanılmayan eğri ele alındığında CRC hata algılama yönteminin bit hata oranına önemli bir katkısı olmadığı anlaşılabacaktır.

Tablo 10. ve Şekil 26. beraber analiz edildiğinde CRC algoritmasının bit hata oranına etkisi ihmal edilebilecek kadar azdır denilebilir.

### 3.4. Kod Yayma Algoritmasının Bit Hata Oranına Etkisi

IEEE 802.15.4 standardında bulunan ve tablo 3'te verilen 4'e 32 kod yayma algoritması aynı veri paketi kullanılarak ham veriye uygulanmıştır. IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde bulunan BCH 51,63 hata düzeltme algoritması ile karşılaştırılmıştır. TBGG kanal için karşılaştırma sonucu Şekil 27'de verilmiştir.



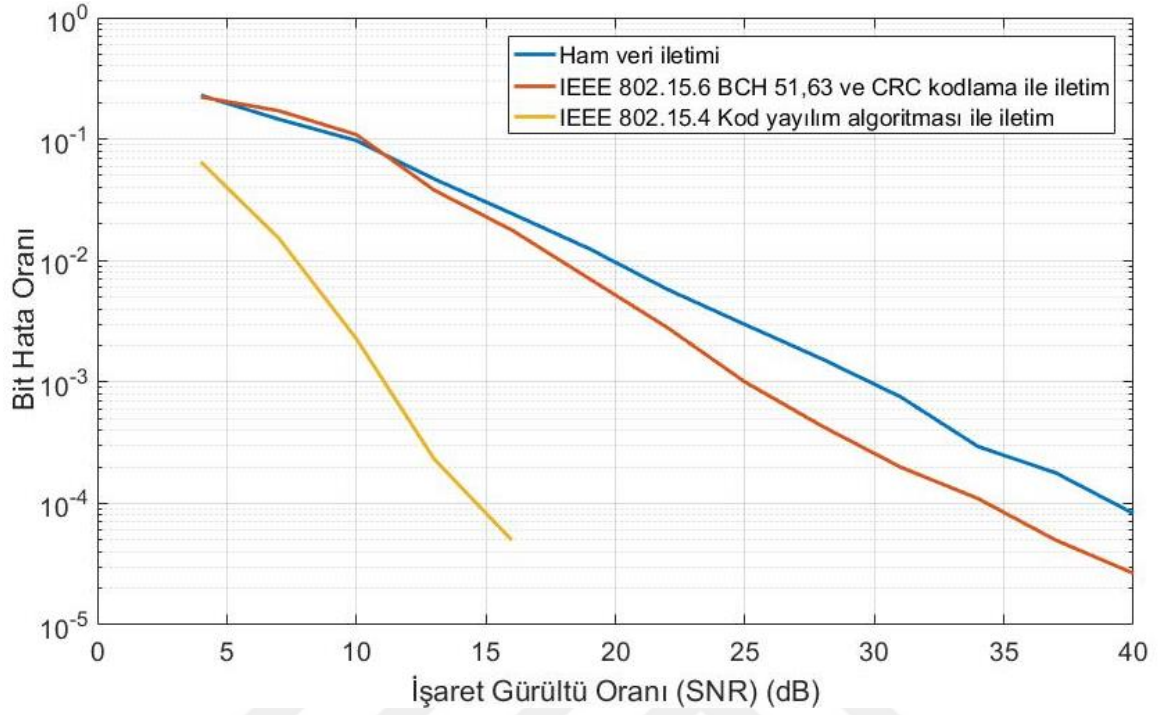
Şekil 27. TBGG kanal için ham veri, IEEE 802.15.6 WBAN protokolü ve IEEE 802.15.4 ile veri iletimi simülasyonu sonuçları

Şekil 27.'deki verilere göre ham veri iletim simülasyonu ile karşılaştırıldığında, yüz binde bir bit hata oranı için IEEE 802.15.6 WBAN protokolü yaklaşık 3 dB'lik kazanç sağlarken, IEEE 802.15.4 standardındaki veri iletim simülasyonu yaklaşık 8 dB'lik kazanç sağlamaktadır. Bununla birlikte IEEE 802.15.6 WBAN protokolü bit hata oranı başarımını iyileştirmeye 7 dB'den sonra başlarken IEEE 802.15.4 standardı ile veri iletim çok düşük işaret gürültü oranlarında dahi ham veri iletimine göre daha düşük bit hata oranı ile haberleşmektedir.

Şekil 27.'de görüldüğü üzere CRC Hata algılama yönteminin bit hata oranı başarımına katkısı az olduğundan tek taplı Rayleigh kanal için CRC hata algılama yöntemi kullanılmamıştır. Tek taplı Rayleigh kanal için ham veri iletimi, IEEE 802.15.6 WBAN protokolüne göre veri iletimi ve IEEE 802.15.4 standardına göre veri iletimi simülasyonu çalıştırıldığında işaret gürültü oranı, bit hata oranı grafiği Şekil 28.'de verilmiştir.

Şekil 28.'de verilen tek taplı Rayleigh kanalda çalıştırılan simülasyon sonuçları ele alındığında, IEEE 802.15.4 standardına göre yapılan veri iletimi simülasyonu referans alınan ham veri iletimine göre yaklaşık 25 dB işaret gürültü oranı sağlamaktadır. IEEE 802.15.6

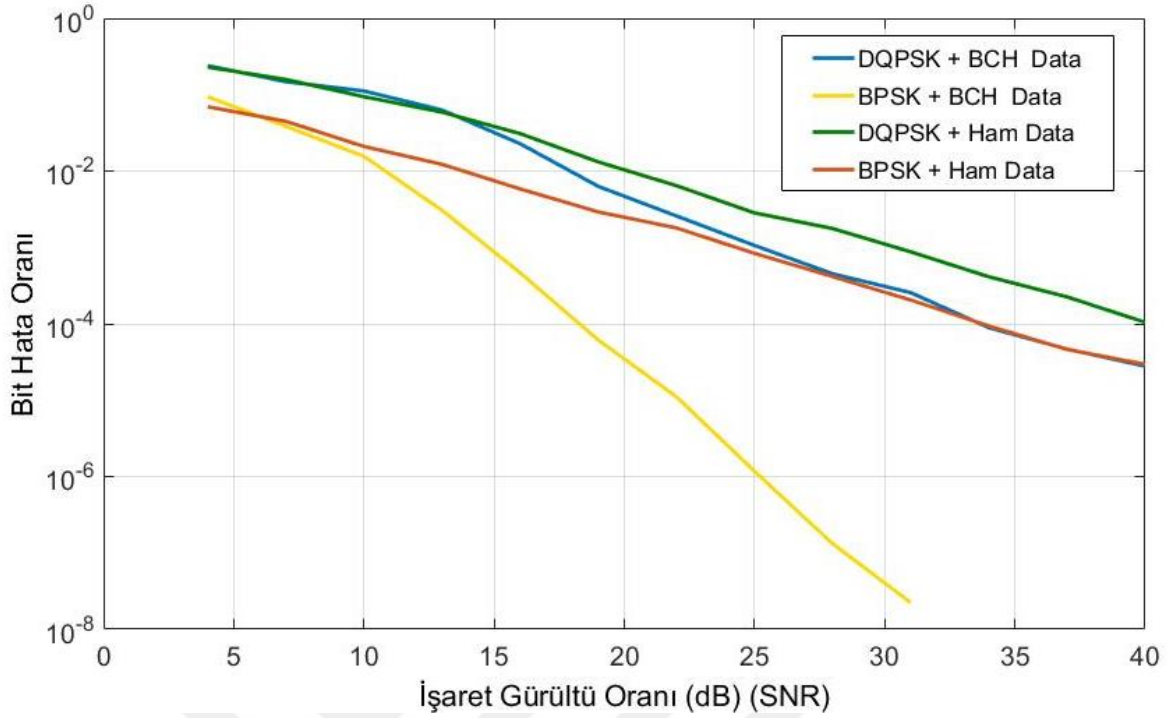
WBAN protokolü ile karşılaştırıldığında 20 dB daha az işaret gürültü oranı ihtiyacıyla IEEE 802.15.4 standardı daha iyi bit hata oranı başarımı elde etmektedir.



Şekil 28. Tek taplı Rayleigh kanal için ham veri iletimi, IEEE 802.15.6 WBAN protokolüne göre veri iletimi ve IEEE 802.15.4 standardına göre veri iletimi simülasyon çıktısı

### 3.5. Modülasyon Çeşitlerinin Başarımlarının Karşılaştırılması

Rayleigh kanalda yapılan BCH kodlamalı ve ham veri iletiminin, modülasyon türlerine göre işaret gürültü oranı, bit hata oranı başarımı Şekil 29'da verilmiştir.



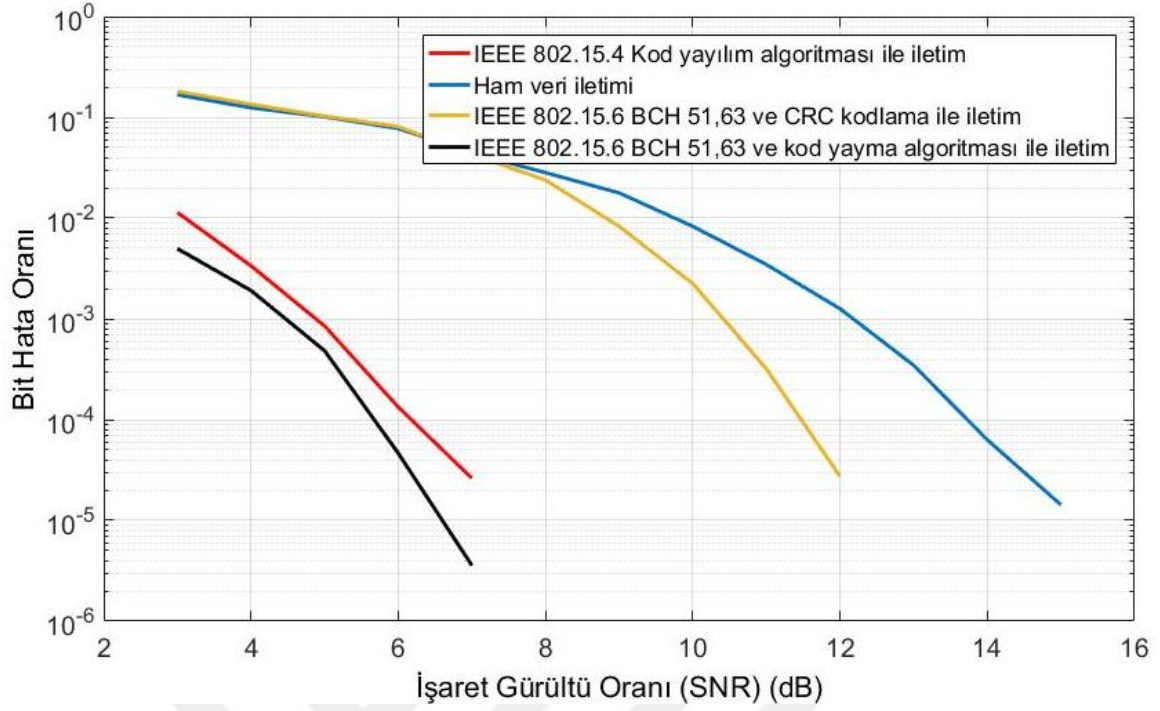
Şekil 29. Rayleigh kanalında BPSK ve DQPSK modülasyon yapılan ham verinin ve BCH kodlanmış verinin başarımları

Şekil 29.'daki sonuçlara bakıldığında, BPSK modülasyonunun DQPSK modülasyonuna göre işaret gürültü oranı başarımı daha iyidir. Rayleigh kanalda uygulanan gürültü işaretinin hem gerçek hem de sanal bileşeni olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır. BPSK modülasyonu uygulanmış işaretin yalnızca gerçek ekseninde işaret ürettiği bilinmektedir. Bu nedenle modülasyon işaretine yalnızca gerçek eksenindeki gürültü etki edecektir. Bu nedenle işaretin üzerine etki eden gürültü gücü, toplam gürültü gücünün teorik olarak yarısı kadar olacaktır.

### 3.6. Kod Yayma Algoritması Eklenmiş IEEE 802.15.6 ve IEEE 802.15.4 Protokollerinin Bit Hata Oranı Karşılaştırılması

Tezin amacı olan IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün fiziksel katmandaki BER başarımının iyileştirmesi kod yayma algoritmasını WBAN protokolüne eklemekle gerçekleştirilmiştir. IEEE 802.15.4'te bulunan kod yayma algoritması ile kod yayma algoritması eklenen IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün TBGG kanaldaki SNR-BER başarımı Şekil 30.'da verilmiştir.

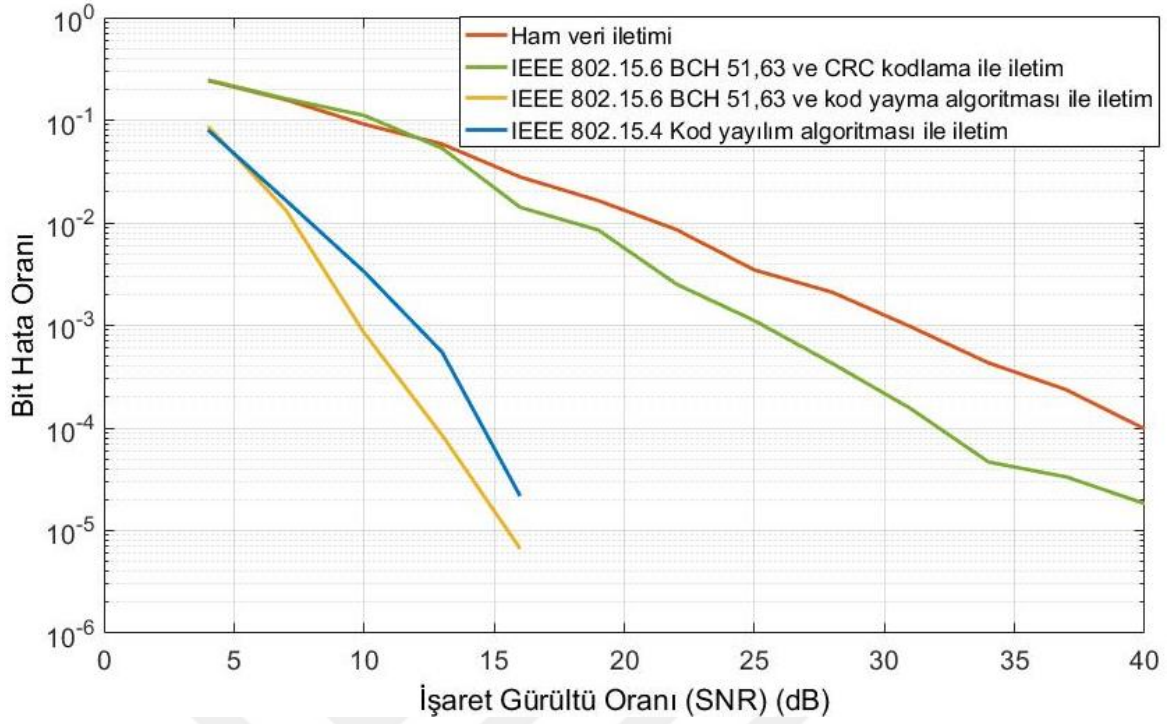




Şekil 30. TBGG kanalda ham verinin, IEEE 802.15.6 WBAN Protokolünün, IEEE 802.15.4 Standardının ve kod yayma algoritması eklenmiş WBAN protokolünün bit hata oranı başarımları

TBGG haberleşme kanalı kullanıldığında IEEE 802.15.6 WBAN protokolüne kod yayma algoritması eklenerek yapılan simülasyonun, IEEE 802.15.4 standardı kullanılarak yapılan veri iletim simülasyonuna göre aynı hata oranı için yaklaşık 1 dB'lik daha az işaret gürültü oranı gereksinimi ile daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

Tek taplı Rayleigh kanal için aynı simülasyonun çıktısı Şekil 31.'de verilmiştir.



Şekil 31. Tek taplı Rayleigh kanalda ham verinin, IEEE 802.15.6 WBAN Protokolünün, IEEE 802.15.4 Standardının ve kod yayma algoritması eklenmiş WBAN protokolünün bit hata oranı başarımları

Şekil 31.'de verilen tek taplı Rayleigh kanalda yapılan simülasyon çalışması başarımlarına göre kod yayma algoritması ile iyileştirilmiş IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün bit hata oranı başarımı yüz binde bir bit hata oranı için, IEEE 802.15.4 standardı ile iletilen veriye göre yaklaşık 2 dB'lik kazanç sağlamaktadır.

Bu veriler ele alındığında IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde kod yayma algoritması ile BCH 51,63 hata düzeltme algoritması kullanılması durumunda dar bant fiziksel katmanda IEEE 802.15.4 standardı ile veri iletimine göre daha iyi başarımlar göstermektedir.

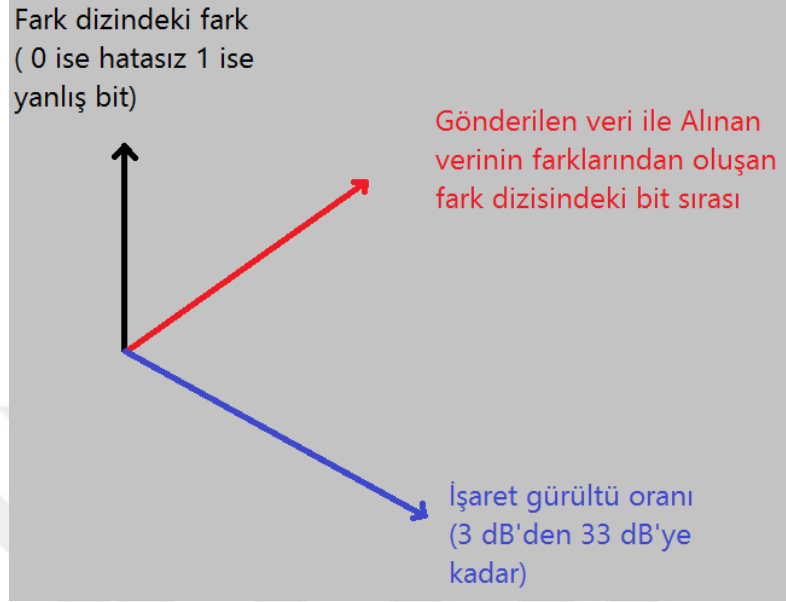
Gerçek zamanlı veri iletiminden ödün vermeden güvenilirlik kod yayma spektrumu ile artırıldığından veri iletim hızı bu şekilde daha verimli kullanılmıştır.

### 3.7. Hata Dağılım Analizleri

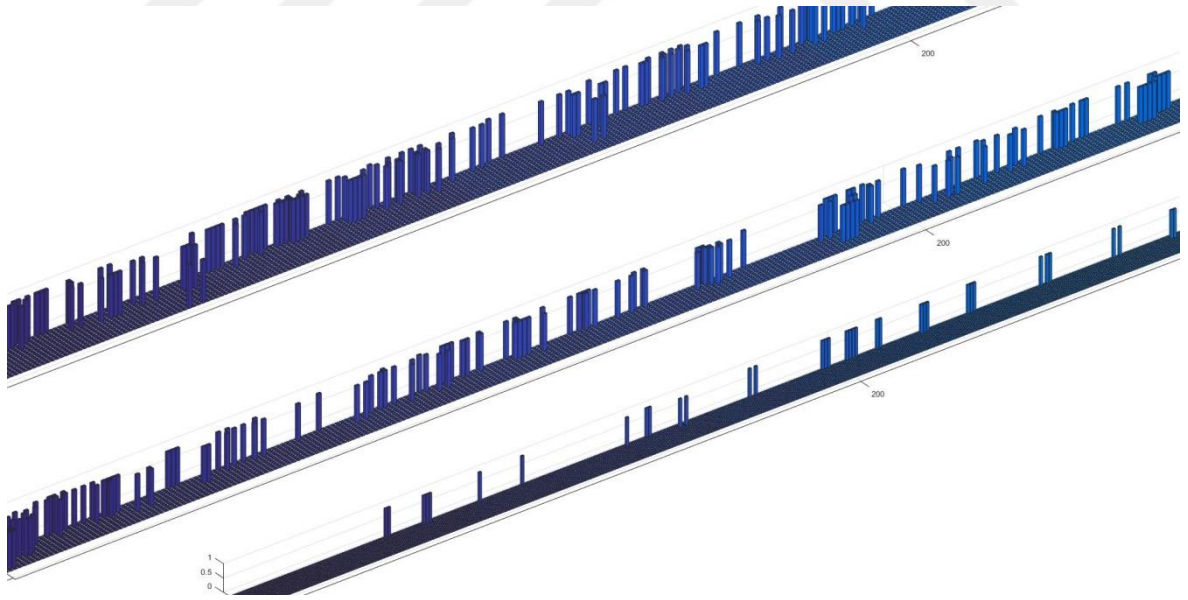
IEEE 802.15.6 WBAN'ın gelecek versiyonlarında BCH 51,63 kodlama yerine hata patlamasını düzeltecek kodlar kullanmanın gerekliliğini incelemek için, tek taplı Rayleigh kanalda ham verinin, BCH 51,63 kodlamanın ve kod yayma algoritmasının 3 dB'den 33 dB'ye kadar olan bir veri paketinin başında, ortasında ve sonundaki hatalı bitlerin dağılımları



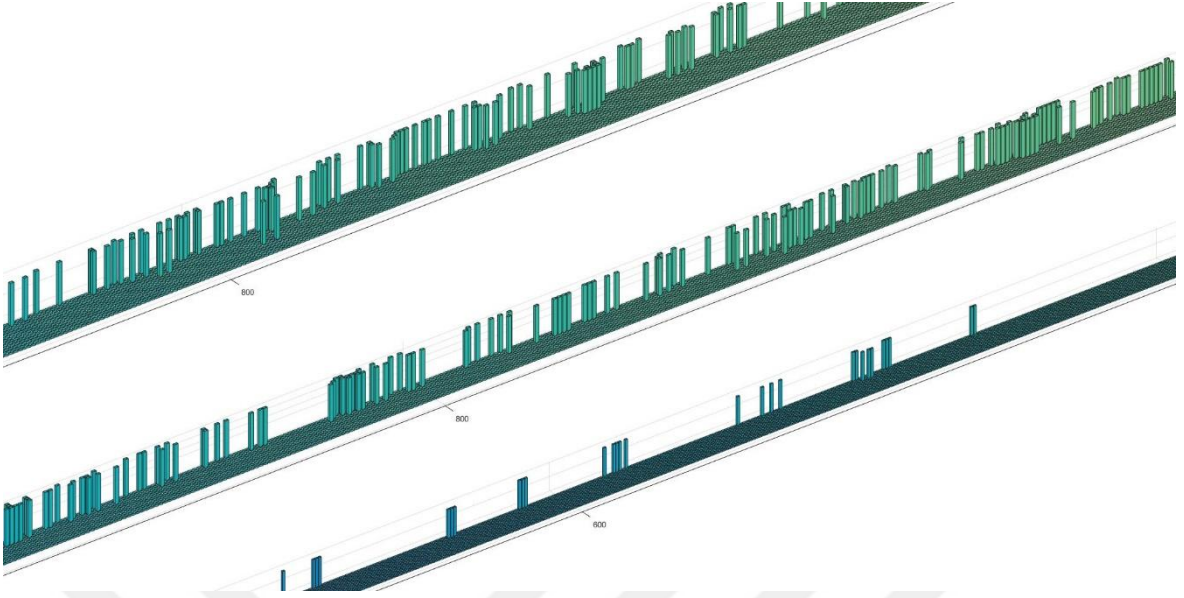
sırasıyla Şekil 33., Şekil 34. ve Şekil 35.'te verilmiştir. İlgili şekillerin eksenlerinin açıklaması şekil, Şekil 32.'de verilmiştir.



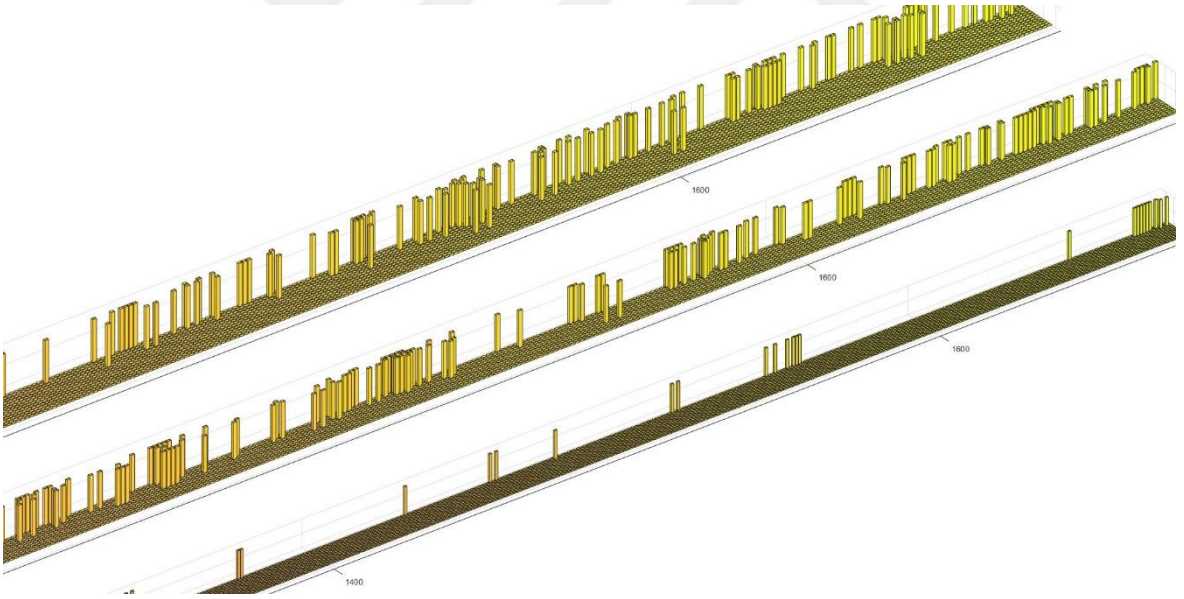
Şekil 32. Hata dağılım grafikleri için eksen açıklamaları



Şekil 33. Veri paketinin başındaki hata dağılımı (üstten alta: Ham veri, IEEE 802.15.6, IEEE 802.15.4)



Şekil 34. Veri paketinin ortalarındaki hata dağılımı (üstten alta: Ham veri, IEEE 802.15.6, IEEE 802.15.4)



Şekil 35. Veri paketinin sonlarındaki hata dağılımı (üstten alta: Hamveri, IEEE802.15.6, IEEE 802.15.4)

Şekil 33., 34. ve 35.'te gösterildiği gibi hatalı bitlerin dağılımı homojen sayılabilecek şekilde dağılmıştır. Ardışık gelen hataların çok olması durumunda bu olaya hata patlaması denilmektedir. Simülasyonun birkaç kez çalıştırılarak, paketlerin bütün kısımları incelendiğinde en fazla ardışık 6 bitlik hataya rastlanılmıştır. Bu nedenle tek taplı Rayleigh

kanalda bu haberleşme protokollerinde hata patlaması sık görülmeyen bir durumdur denilebilir. Hata patlamalarının sık olmaması nedeniyle hata patlamalarını yok etmek için kullanılan diğer hata kodlama algoritmaları (Turbo kodlama vb. gibi) yerine BCH 51,63 kodlamanın kullanılması uygun görülmüştür.

İşlemci modeli i7-4820hq olan bir bilgisayarla yapılan simülasyon çalışmalarında, simülasyon süresi ile veri iletimi için gerekli işlem gücü doğru orantılı olduğu düşünülürse 2000 veri paketi için yapılan yöntemler için MATLAB uygulaması için geçen süre tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 12. Tek taplı Rayleigh kanal için simülasyon işlem süreleri

Yapılan işlem	Süresi (saniye)
<b>Ham veri iletimi (2000 paket veri)</b>	31,34
<b>IEEE 802.15.4 Standardı için veri iletimi (2000 paket veri)</b>	9098,33
<b>IEEE 802.15.6 WBAN Protokolü için veri iletimi (2000 paket veri)</b>	121,07
<b>IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde kod yayma algoritması ile veri iletimi (2000 paket veri)</b>	11066,60

TBGG haberleşme kanalı için yapılan simülasyonlar için işlem süreleri tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 13. TBGG Haberleşme kanalı için simülasyon işlem süreleri

Yapılan işlem	Süresi (saniye)
<b>Ham veri iletimi (2000 paket veri)</b>	57,00
<b>IEEE 802.15.4 Standardı için veri iletimi (2000 paket veri)</b>	3898,17
<b>IEEE 802.15.6 WBAN Protokolü için veri iletimi (2000 paket veri)</b>	165,34
<b>IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde kod yayma algoritması ile veri iletimi (2000 paket veri)</b>	4773,08

Tablo 11 ve Tablo 12’deki verilere göre kod yayma algoritması intel i7 ailesinde bulunan bir işlemci ile uzun sürmektedir. Bunun nedeni her 4 bitlik mesaj sorgu ile 16 farklı 32 bitlik seriden birine dönüştürülmektedir ayrıca alıcı kısımda alınan verinin her 32 bitlik

parçası 32 bitlik 16 farklı bit serisi ile ilintisi hesaplanmaktadır ve en yüksek ilintiyi veren seriye ait 4 bitlik mesaj üretilmektedir. Bu işlem ekran kartı ile paralel işleme yöntemleri kullanılarak yapılması durumunda oldukça düşeceği tahmin edilmektedir.



#### 4. SONUÇLAR

Yüksek lisans çalışması kapsamında yapılan işlemler ve elde edilen bulgular incelendiğinde kod yayma algoritmasının bit hata oranı başarımı için oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan 4'e 32 kod yayma algoritması TBGG kanalda ham veri iletimine göre yaklaşık 9 dB, tek taplı Rayleigh kanalda yaklaşık 20 dB'lik işaret gürültü oranı kazancı ile oldukça başarılı sonuç vermiştir. Bunun yanında IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde bulunan BCH 51,63 hata düzeltme algoritması kullanılarak yapılan veri iletim simülasyonunda ham veri iletimine göre TBGG kanalda yaklaşık 3 dB, tek taplı Rayleigh kanalda ise yaklaşık 5 dB'lik işaret gürültü oranı kazancı sağlanmıştır.

IEEE 802.15.6 WBAN protokolü ticari frekans bandının dışında özel banda sahip olduğundan dolayı girişimi daha az olan bir kanalda haberleşme yapmaktadır. Bu nedenle aynı bit hata oranı için temiz kanalda vericiden çıkan işaret enerjisi az olsa da, düşük gürültü gücünden dolayı alıcıdan alınan işaret gürültü oranı yüksek olacaktır. Buna karşılık olarak kablo eşdeğeri güvenilirliği yakalayabilmek için düşük işaret gürültü oranlarında bile bit hata oranının düşük seviyelerde olması beklenmektedir.

Kod yayma algoritmasının 4 bit uzunluğundaki mesajı 32 bit uzunluğuna çıkartmasından dolayı bilgi verisinin iletim hızı 8 kat azalmaktadır. Tablo 6'da IEEE 802.15.6 WBAN protokolünde tanımlı olan en yüksek hız, 971,4 kilo bit/s olarak verilmiştir. Bu veri iletim hızı sekizde birine düşmesi durumunda yaklaşık 121,4 kilo bit/s olacaktır. Medikal işaretler düşünüldüğünde en yüksek veri iletim hızı gereksinimi EKG işaretidir ve frekansı en fazla 2 Hz olan kalp atım hızı için tavsiye edilen en yüksek örnekleme sıklığı saniyede 1000 örnektir. 16 bitlik yüksek çözünürlüklü örnekleme yapıldığı varsayılırsa saniyede kanal başına 16 kilo bitlik veri elde edilecektir. Bu nedenle saniyede 121,4 kilo bitlik veri iletim hızı insan vücudundan çıkan işaretlerin örneklenip gönderilmesi için yeterlidir.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgulara göre kod yayma algoritması eklenen IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün, IEEE 802.15.4 standardına göre işaret gürültü oranı göz önüne alındığında 1 dB – 3 dB arasında daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle daha iyi güvenilirlik için IEEE 802.15.6 standardının gelecek sürümlerinde, dar bant fiziksel katmandaki gelecek sürümlerinde BER başarımını iyileştirmek için kod yayma algoritmasının kullanılması tavsiye edilmektedir.



## 5. ÖNERİLER

IEEE 802.15.6 WBAN protokolünün geliştirilmesiyle ortaya çıkacak olan sürümleri için kod yayma algoritmasının BER başarımları incelenebilir.

Bu çalışmanın devamında simülasyon çalışması ekran kartı yardımıyla paralel işleme ile daha fazla veri paketi sayısı ile daha doğru sonuçlar alınabilir.

Bu tez çalışmasında simülasyonla gerçekleştirilen sistem FPGA kartı ve yazılım tabanlı radyo kullanılarak pratik olarak gerçekleştirilebilir. Böylece IEEE 802.15.4'ü ticari frekans bandında, IEEE 802.15.6 WBAN protokolünü ise kendi özel frekans bandında veri iletim çalışması gerçekleştirilerek SNR-BER karşılaştırması yapılacaktır.



## 6. KAYNAKÇA

1. <http://www.cens.ucla.edu/sensys03/sensys03-callaway.pdf/> Low power consumption features of the IEEE 802.15.4/ZigBee LR-WPAN Standard, 5 Mart 2016.
2. <http://www.ieee802.org/wak/> IEEE 802 LAN/MAN, 12 Mart 2016.
3. <http://www.ieee802.org/> IEEE 802.15 Working Group for Wireless, 13 Mart 2016.
4. <http://standards.ieee.org/> IEEE Standard 802.15.4a-2007, 13 Mart 2016.
5. Kwak, K. S., Ameen, M. A., Kwak, D., Lee, C. ve Lee, H., A Study on Proposed IEEE 802.15 WBAN MAC Protocols, Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th on International Symposium, Eylül 2009, Icheon, 834-840.
6. Ullah S. ve Kwak, K. S., Throughput and Delay Limits of IEEE 802.15.6, 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Mart 2011, Cancun, 174-178.
7. Rashwand S., Mistic J. ve Khazaei H., Performance Analysis of IEEE 802.15.6 Under Saturation Condition and Error-Prone Channel, 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Mart 2011, Cancun, 1167-1172.
8. Sarkar S., Misra S., Chakraborty C. ve Obaidat M. S., Analysis of Reliability and Throughput Under Saturation Condition of IEEE 802.15.6 CSMA/CA for Wireless Body Area Networks, 2014 IEEE Global Communications Conference, Aralık 2014, Austin, 2405-2410.
9. Ullah S. ve Tovar E., Performance Analysis of IEEE 802.15.6 Contention-Based MAC Protocol, Communications 2015 IEEE International Conference (ICC), Haziran 2015, Londra, 1550-3607.
10. Al-Mazroa A. ve Rikli N. E., Information Technology and Multimedia (ICIMU) on International Conference, Kasım 2014, Putrajaya, 66-71.
11. Dou C. ve Chang M. J., An Analytical Model for Deriving Receiver Sensitivity and Minimum Transmit Power in 802.15.6 Wireless Body Area Networks, RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), 2015 IEEE MTT-S 2015 International on Microwave Workshop Series, Eylül 2015, Taipei, 138-140.
12. Sarestonemi M., Niemela V., Hamalainen M., Linatti J., Keranen N., Jamsa T., Partala J., Seppanen T. ve Reponen J., Receiver Performance Evaluation on IEEE 802.15.6 Based WBAN for Monitoring Parkinson's Disease, 2014 8th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), Nisan 2014, Firenze, 1-5.
13. Lee C., Kim J., Lee H. S. ve Kim J., Physical Layer Designs for WBAN Systems in IEEE 802.15.6 Proposals, Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th International on Symposium, Eylül 2009, Icheon, 841-844.



14. Xu L., Liu F., Yi C., Guan T. ve Li Y., Performance Analysis of IEEE 802.15.6 MAC Protocol Based on Battery Characteristics Under Saturation and Error-Prone channel, 2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP), Ekim 2014, Hangzhou, 2237-2242.
15. An N., Wang P., Yi C. ve Li Y., Performance Analysis of CSMA/CA Based on the IEEE 802.15.6 MAC Protocol, Communication Technology (ICCT), 2013 15th IEEE International on Conference, Kasım 2013, Guilin, 539-544.
16. Mathew P., Augustine L., Kushwaha D., Vivian D. ve Selvakumar D., Hardware Implementation of NB PHY Baseband Transceiver for IEEE 802.15.6 WBAN, Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom), 2014 International on Conference, Kasım 2014, Greater Noida, 64-71.
17. Xiao Y., Sethi S., Chen H. ve Sun B., Security Services and Enhancements in the IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks, GLOBECOM '05. IEEE Global Telecommunications Conference, Kasım 2015, St. Louis.
18. Callaway E., Gorday P., Gutierrez J. A., Naeve M. ve Bahl V., Home Networking With IEEE 802.15.4: a Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Communications Magazine, Ağustos 2002, 70-77.
19. Lu G., Krishnamachari B. ve Raghavendra C. S., Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-Rate Low-Power Wireless Networks, Performance Computing and Communications on IEEE International Conference, Kasım 2004, 701-706.
20. Lee J., An Experiment on Performance Study of IEEE 802.15.4 Wireless Networks, 2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Eylül 2005, Catania, 458-466.
21. Bougard B., Catthoor F., Daly D. C., Chandrakasan A. ve Dehaene W., Energy Efficiency of the IEEE 802.15.4 Standard in Dense Wireless Microsensor Networks: Modeling and Improvement Perspectives, Design Automation and Test in Europe, Mart 2005, 196-201.
22. Howitt I., Neto R., Wang J. ve Conrad J. M., IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, Kasım 2005, Washington, 322-330.
23. Neugebauer M., Plonnings J. ve Kabitzsch K., A New Beacon Order Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Networks, Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks, 2005, İstanbul, 302-311.
24. Zheng J. ve Lee M. J., IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality?: a discussion on a potential low power, low bit rate standard, IEEE Communications Magazine, 6 (2004) 140-146.
25. Nix A. R., Fundamental Investigation into Short Range High Capacity Mobile Data Transmission, Ph. Thesis, Univeristy of Bristol, Eylül 1993, England, 12, 3.
26. IEEE Standard Definitions of Terms for Modulation Systems, 170 (1964) 1-7.

27. <http://web.mit.edu/6.02/www/s2012/handouts/14.pdf/> Modulation and Demodulation, 1 Mayıs 2016.
28. [http://plato.csie.ncku.edu.tw/2012Fall\\_WIRELESS/Chapt-04.pdf/](http://plato.csie.ncku.edu.tw/2012Fall_WIRELESS/Chapt-04.pdf/) Channel Coding, 18 Ekim 2002.
29. <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSquareWave.html/> Fourier Series, 12 Nisan 2016.
30. Bracewell R. N., *The Fourier Transform and Its Applications*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1999.
31. <http://complextoreal.com/wp-content/uploads/2013/01/fm.pdf/> Frequency Modulation, 15 Haziran 2016.
32. Drukarev A. ve Yiu K., Performance of Error-Correcting Codes on Channels with Memory, *IEEE Transactions on Communications*, 34, 6 (1986) 513-521.
33. Wolf J. K., ECC Performance of Interleaved RS Codes With Burst Errors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 34, 1 (1998) 75-79.
34. Brayer K., Frame Synchronisation for Binary Data Transmission, *IEEE Transactions on Magnetics*, 7, 14 (1971) 392-393.
35. Charpin P. ve Sendrier N., Studying the Locator Polynomials of Minimum Weight Codewords of BCH Codes, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 38, 3(1992) 960–973.
36. [http://web.ntpu.edu.tw/yshan/BCH\\_code.pdf/](http://web.ntpu.edu.tw/yshan/BCH_code.pdf/) BCH Codes, 20 Mayıs 2016.
37. Chien R., Cyclic decoding procedures for Bose-Chaudhuri-Hocquenghem codes, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 10, 4(1964) 357–363.
38. <http://web.mit.edu/6.02/www/f2010/handouts/lectures/L7.pdf/> Detecting Bit Errors, 7 Kasım 2015.
39. IEEE Standard, Local and Metropolitan Area Networks, Wireless Body Area Networks, 29 Şubat 2012.
40. Mack C. A., Fifty Years of Moore's Law, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 24, 2 (2011) 202-207.
41. Schaller R. R., Moore's Law: Past, Present and Future, *IEEE Spectrum*, 34, 6 (1997) 52-59.
42. Bonello N., Chen S. ve Hanzo L., Multilevel-Structured Low-Density Parity-Check Codes for AWGN and Rayleigh Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59, 7 (2010) 3311-3320.
43. Liew T. H., Yang L. ve Hanzo L., Systematic Redundant Residue Number System Codes: Analytical Upper Bound and Iterative Decoding Performance Over AWGN

and Rayleigh Channels, IEEE Transactions on Communications, 54, 6 (2006) 1006-1016.

44. Zhu G. ve Alajaji F. I., Soft-decision COVQ for Turbo-Coded AWGN and Rayleigh Fading Channels, IEEE Communications Letters, 5, 6 (2001) 257-259.
45. Wu S., Liu J., Chen C., Wu S. ve Xiong G., Monte Carlo Simulation of the Binary Communications System Based on MATLAB, Electrical and Control Engineering (ICECE), Eylül 2011 International Conference on, 2011, Yichang, 2368-2370.
46. Dai R. K., Li J. X., Li L., Dong C. L. ve Yan B., A Parallel Monte Carlo Simulation on Cluster System for Particle Transport, Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI '09. International on Conference, Kasım 2009, Shanghai, 31-35.
47. Bryg D. J., Comparison of NEVADA Simulation to Monte Carlo Simulation, Simulation Conference Proceedings, Ocak 1994, Winter, 471-476.
48. Dong L., Wenbo W. ve Yonghua L., Monte Carlo Simulation with Error Classification for Multipath Rayleigh Fading Channel, Telecommunications ICT'09. International on Conference, Mayıs 2009, Marrakech, 223-227.

## ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve ortaokulu Mimar Sinan İlköğretim Okulu, lise öğrenimini Tevfik Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans programına başladı ve 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. 2013 yılında Hacettepe teknokentinde bulunan Ak-Ya firmasında işe başlamıştır. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014 yılı Kasım ayından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.

Bu tez çalışması sürecinde alınan sonuçlar ile hazırlanan bildiriler SIU2016 (Zonguldak) ve TSP2016 (Viyana/Avusturya) konferanslarında sözlü sunum olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 114E454 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.