



**ALÇAK GERİLİM GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİNDE KABLO
UZUNLUĞU VE HATTAKİ EMPEDANS DEĞERLERİNE GÖRE BER/SNR
ANALİZİ**

Tuğba BAŞAYAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2019

Tuğba BAŞAYAR tarafından hazırlanan “ALÇAK GERİLİM GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİNDE KABLO UZUNLUĞU VE HATTAKİ EMPEDANS DEĞERLERİNE GÖRE BER/SNR ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Doç. Dr. Ertuğrul AKSOY

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Cenk TOKER

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 17 / 12 / 2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tuğba BAŞAYAR

17 / 12 / 2019

ALÇAK GERİLİM GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİNDE KABLO UZUNLUĞU VE HATTAKİ EMPEDANS DEĞERLERİNE GÖRE BER/SNR ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Tuğba BAŞAYAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2019

ÖZET

Alçak gerilim dağıtım sistemlerinin kablo türü ve uzunluğu ile hat üzerinde yer alan elektronik cihazların ürettiği empedans değerlerinin veri iletimi sırasında haberleşmeye etki ettiği bilinmektedir. Bu tez çalışmasında, alıcı-verici arasındaki veri hata oranı (BER) ve sinyal gürültü oranının (SNR) söz konusu dış etmenlere karşı değişimini gözlemlemek amaçlanmıştır. CENELEC A bandında (31-95 kHz) G3 haberleşme protokolünde deterministik PLC kanal modeli MATLAB programı ile oluşturulmuş olup; kablo uzunluklarına, kablo türüne, kanaldaki gürültüye ve farklı empedans değerlerine bağlı ortaya çıkan değişimler Monte Carlo BER-SNR simülasyonu ile grafiğe dönüştürülerek sonuç bölümünde paylaşılmıştır.

Bilim Kodu : 92705

Anahtar Kelimeler : Alçak gerilim, güç hattı haberleşmesi, PLC, G3, OFDM, kanal modelleme, dar bant (1-500 kHz), cyclostationary gürültü.

Sayfa Adedi : 67

Danışman : Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

BER/SNR ANALYSIS ACCORDING TO CABLE LENGTH AND LINE IMPEDANCE
VALUES IN LOW VOLTAGE POWER LINE COMMUNICATION

(M. Sc. Thesis)

Tuğba BAŞAYAR

GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2019

ABSTRACT

The cable type and length of the low voltage distribution systems and the impedance values produced by the electronic devices on the line are known to affect the communication during data transmission. In this thesis, it is aimed to observe the change of the bit error rate (BER) and signal to noise ratio (SNR) between the transceiver according to external factors. In the CENELEC A band (31-95 kHz), the deterministic PLC channel model in the G3 communication protocol was simulated with MATLAB program. Changes due to different cable lengths&types and different impedance values were transformed into a graph with Monte Carlo BER-SNR simulation and shared in the result section.

Science Code : 92705

Key Words : Low voltage, powerline communication, PLC, G3, OFDM, channel modelling, narrow band (1-500 kHz), cyclostationary noise.

Page Number : 67

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde bilgi ve tecrübesiyle beni yetiştiren; tez çalışmamda beni doğru yönlendirip, bilgisine her başvurduğumda desteğini sunan; projesinde araştırmacı olarak çalışmam için bana güvenip fırsat sunan; hocam ve tez danışmanım sayın Doç. Dr. Özgür ERTUĞ'a kıymetli düşüncelerinden, katkıları ve ilgisinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans öğrencisi olarak ARDEB 1003 - Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında "Alçak Gerilim Dağıtım Sistemi Verilerinin İzlenmesi ve Kayıt Altına Alınması Projesi"nde Mart 2016 ve Nisan 2017 ayları arasında bursiyer ünvanıyla çalışmama imkân sağlayan TÜBİTAK'a, projenin gerçekleşmesinden sorumlu olan ASELSAN A.Ş. ve çalışmalarına yardımcı olan proje ekibine, yüksek lisans öğrenimim sırasında kendilerinden ders aldığım, öğrettikleriyle bu çalışmanın tamamlanmasına katkıda bulunan Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nın kıymetli hocalarına teşekkür ederim.

Kendisini tanıdığım günden bu yana çok yönlü kişiliği, insani yanı ve çalışma disiplini ile bana vizyon katan; her ihtiyacımda tecrübesini ve bilgisini benimle cömertçe paylaşıp bana dostça zaman ayıran, ayrıca bu tez çalışmamın ortaya çıkmasında büyük katkısı bulunan sevgili büyüğüm M. Sc. Fatih GENÇ'e gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi yazmaya başlamam için beni yüreklendiren, dostluğu ile bana neşe katan canım arkadaşım Gizem TÜRKMEN'e, yardımları ve arkadaşlığı için Zafer POLAT'a ve AFAD'daki çalışma arkadaşlarıma yürekten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Her gün varlıklarına şükrettiğim, merhametleri ve fedakârlıklarıyla bana daima destek olan, her halimle beni seven canım güzelim annem Fikriye BAŞAYAR'a, canım babam Mehmet BAŞAYAR'a, neşem ve yoldaşım olan kardeşim Muhammed BAŞAYAR'a ve yumuşak kalpli sırdaşım, yol arkadaşım sevgili ablam Derya BAŞAYAR'a minnetlerimi sunarım.

İyi ki varsınız...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRONİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ	5
2.1. Verici.....	7
2.2. Haberleşme Kanalı	9
2.3. Alıcı.....	10
3. AKILLI SİSTEMLER VE HABERLEŞME ALTYAPISI	11
4. GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİ (PLC).....	15
4.1. Güç Hattı Haberleşmesi Tarihçesi.....	16
4.2. Güç Hattı Haberleşme Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları	18
4.3. Frekans Aralığına Göre Güç Hattı Haberleşmesi.....	19
4.4. Dar Bant Güç Hattı Haberleşmesi Fiziksel Katman Standartları.....	21
4.4.1. Dar Bant Güç Hattı Haberleşmesi PRIME Spesifikasyonu	34
4.4.2. Dar Bant Güç Hattı Haberleşmesi G3 Spesifikasyonu.....	34
4.5. G3 ve PRIME Spesifikasyonları Performans Kıyaslaması	26
5. G3-PLC FİZİKSEL KATMAN TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	29
5.1. İleri Hata Düzeltme Bloğu (Forward Error Correction - FEC).....	32
5.1.1. Karıştırıcı (Scrambler).....	32
5.1.2. Reed Solomon Kodlayıcı	33
5.1.3. Konvolüsyonel Kodlayıcı.....	34
5.1.4. Serpiştirici (Interleaver – Robust Mod RC4)	35
5.2. OFDM Modülatör	36

	Sayfa
5.2.1. DBPSK Modülasyon (Haritalama-Mapping).....	38
5.2.2. IFFT.....	38
5.2.3. Pencereleme (Windowing).....	39
6. ENERJİ HATLARI	41
6.1. Alçak Gerilim Güç Hattı Haberleşmesinde Kanal Modelleri	43
6.2. Linear Zamanla Değişen Kanal Modeli (LPTV).....	45
6.3. İletim Hattı Teorisine Dayalı Alçak Gerilim Güç Hattı Kanal Modeli.....	46
7. GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİNDE GÜRÜLTÜ	53
7.1. Döngüsel Durağan Gauss Gürültü Modeli (Cyclostationary Gaussian Noise)	57
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. RS blok boyutu ve çeşitli modülasyonlar için kodlama oranları.....	25
Çizelge 4.2. G3-PLC ve PRIME-PLC standartlarının fiziksel katman parametreleri ve algoritmalar	26
Çizelge 6.1. Bina içi birim kablo karakteristiği	46
Çizelge 7.1. Gürültü ölçümlerine uygun varyans parametreleri.	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Güç hattı haberleşme sistemi	2
Şekil 2.1. Analog ve sayısal sinyal	5
Şekil 2.2. Sayısal haberleşme sistemi bileşenleri.....	6
Şekil 2.3. Sürekli sinyal modülasyon gösterimi	8
Şekil 2.4. Sayısal haberleşme sisteminin temel bileşenleri	9
Şekil 3.1. Akıllı şebekeler.....	12
Şekil 4.1. PLC gelişimi zaman çizelgesi.....	17
Şekil 4.2. ITU frekans bandı ve güç hattı haberleşmesindeki kullanımları	20
Şekil 4.3. PRIME FEC enkoder	22
Şekil 4.4. G3 FEC enkoder	24
Şekil 4.5. G3 FEC dekoder	24
Şekil 5.1. G3 OFDM alıcı - verici blok diyagramı	29
Şekil 5.2. MATLAB’da modellenen G3 fiziksel katman blokları.....	31
Şekil 5.3. Veri karıştırıcı	33
Şekil 5.4. Konvolüsyonel enkoder	34
Şekil 5.5. Serpiştirici.....	35
Şekil 5.6. Modellenen OFDM alıcı ve verici bloğu.....	36
Şekil 5.7. OFDM IFFT bloğu	38
Şekil 6.1. Elektrik iletim ve dağıtım sistemi.....	41
Şekil 6.2. Bir noktadan diğer noktaya tasarlanan üç yükten oluşan ağ topolojisi	42
Şekil 6.3. PLC kanal modeli	44
Şekil 6.4. MATLAB’da modellenen güç hattı haberleşmesi kanal topolojisi	47
Şekil 6.5. Tek dallanmalı ağ parametrisasyonu	47

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Modellenen ağ parametrizasyonu	49
Şekil 6.7. MATLAB’da modellenen PLC kanalının dar bantta frekans cevabı	51
Şekil 6.8. MATLAB’da modellenen PLC kanalının 35.9-90.6 kHz frekans aralığında frekans cevabı	51
Şekil 6.9. MATLAB’da modellenen kanalın darbe cevabı.....	52
Şekil 7.1. Haberleşme sisteminde sinyale gürültü ekleme.....	53
Şekil 7.2. PLC gürültü çeşitleri ve sınıflandırması	54
Şekil 7.3. PLC iletişim kanal modeli ve gürültü türleri	56
Şekil 7.4. MATLAB’da simüle edilen tahmini gürültü varyansı.....	57
Şekil 7.5. MATLAB’da simüle edilen ACGN gürültü dalgası	58
Şekil 8.1. MATLAB’da modellenen PLC haberleşme sistemi.....	59
Şekil 8.2. Empedans değerleri sabit iken, kablo uzunluğuna göre BER/SNR grafiği	60
Şekil 8.3. Kablo uzunluğu sabit iken, empedans değerleri göre BER/SNR grafiği.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

C	Kablonun Her Bir Metreye Düşen Kapasitansı
dB	Desibel
G	Kablonun Her Bir Metreye Düşen İletkenliği
Hz	Hertz
K	Kısıt Uzunluğu Constraint Length
Kbps	Saniye Başına Kilo Bit
KV	Kilo Volt
L	Kablonun Her Bir Metreye Düşen İndüktansı
MHz	Mega Hertz
R	Kablonun Her Bir Metreye Düşen Direnci
Q	Kalite Faktörü - Quality Factor
Y	Yayılma Sabiti
Z₀	Karakteristik Empedans
Z_{in}	Giriş Empedansı
ω	Açısal Frekans
ω₀	Kritik Açısı
V	Volt

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternatif Akım
ACGN	Toplanır Döngüsel Durağan Gauss Gürültüsü
AFE	Analog Ön Uç - Analog Front End
AG	Alçak Gerilimli Şebekeler
AM	Genlik Modülasyonu
AMI	Gelişmiş Ölçüm Altyapısı
ARDEB	Araştırma Destek Programları Başkanlığı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
ARIB	Radyo Endüstrileri ve İşletmeleri Birliği - Japonya
AWGN	Toplam Beyaz Gauss Gürültülü
BER	Bit Hata Oranı
CENELEC	Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi
CP	Döngüsel Önek - Cyclic Prefix
ÇYG	Çok Yüksek Gerilimli Şebekeler
DBPSK	Diferansiyel İkili Faz Kaydırma Anahtarlama
DQPSK	Diferansiyel Dörtlü Faz Kaydırma Anahtarlama
D8PSK	Diferansiyel 8 Faz Kaydırma Anahtarlama
ERDF	Fransa Elektrik Dağıtım Ağı
FCC	Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal İletişim Komisyonu
FEC	İleri Hata Düzeltme Kodlaması
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FM	Frekans Modülasyonu
GF	Galois Alanı
HAN	Ev Otomasyonu ve Ev Alan Ağı
HDR	Yüksek Veri Hızı
HF	Yüksek frekans
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IFFT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
ISI	Semboller arası girişim - Intersymbol Interference
LPTV	Lineer Zamanla Değişen Kanal Modeli
MAC	Orta Derece Erişim Kontrolü - Medium Access Control
MSB	En Önemli Bit
NB-PLC	Dar Bant Güç Hattı Haberleşmesi
OFDM	Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
OG	Orta gerilimli şebekeler
PHY	Fiziksel Katman

Kısaltmalar**Açıklamalar**

PLC	Güç Hattı Haberleşmesi - Power Line Communication
PRIME	Güç Hattı Akıllı Ölçüm Evrimi
PSD	Güç Spektral Yoğunluğu
PSK	Faz Kaydırma Anahtarlama
PVC	Polivinil Klorür
QAM	Dörtlü Genlik Modülasyonu
RS	Reed-Solomon
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
TESLAB	Telekomünikasyon ve Sinyal İşleme Laboratuvarı
TL	İletim Hattı - Transmission Line
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
VRA	Voltaj Oran Yaklaşımı - Voltage Ratio Approach
YG	Yüksek Gerilimli Şebekeler

1. GİRİŞ

Elektrik veya güç şebekeleri diye adlandırılan sistemler; su, rüzgâr, doğal gaz, kömür gibi doğal kaynaklardan santrallerde elde edilen enerjinin; önce mekanik enerjiye ardından da jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek, tüketiciye enerji ulaştırılmasını sağlayan tesislerden meydana gelmektedir. Elektrik enerjisinin 1800’lü yılların sonlarında aydınlatmada kullanılabilir olması ile birlikte bu enerji türünden faydalanılan alanların sayısı da hızla artmıştır. Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte elektrik enerjisi; bilgisayar, telefon, elektronik ev aletleri gibi cihazların enerji ihtiyacında, konutların güvenlik ve ısınma sistemlerinde, sanayi tesislerindeki makinaların güç ihtiyacında, tarımda sulama işlemlerinde, ulaşımda elektrikli trenlerin ve elektrikli arabaların güç ihtiyacında kullanılmakta olup, günlük hayatımızın vazgeçilmezidir. Bugün ülkemizin ve dünyanın pek çok şehrinde ve kırsal yerleşim yerlerinde son kullanıcıya kadar ulaştırılmış elektrik hatları ile birbirine bağlı devasa bir elektrik ağı mevcuttur.

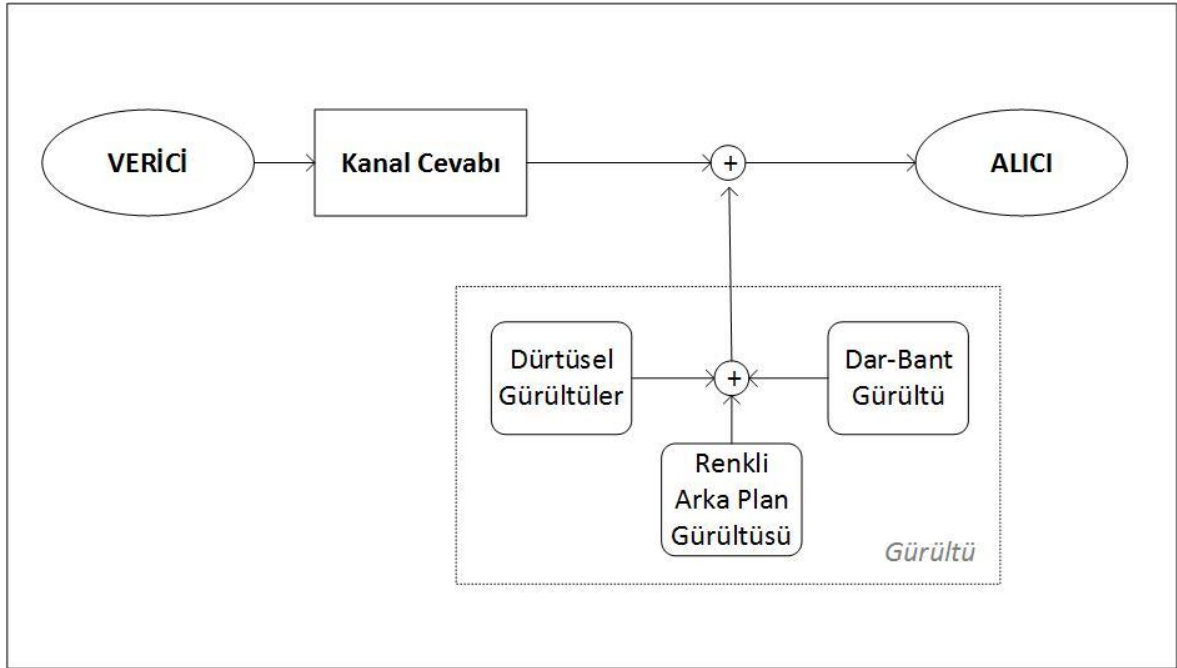
Elektrik enerjisi, güç terminallerinde üretildikten sonra iletim ve dağıtım hatları ile tüketiciye ulaştırılmaktadır. Bu uzun hatlar boyunca yol alan enerjide insan veya doğa kaynaklı kesinti ve kayıplar olabilmektedir. Tüketiciye kaliteli, güvenilir ve kesintisiz elektrik enerjisi sağlanması için can ve mal güvenliği göz önüne alınarak; sistemin kendisinden ya da dış sebeplerden kaynaklanan hatalara karşı korunması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen “Akıllı Şebeke Sistemleri” şebekeyi izleyerek kontrolünü yapmakta ve verimliliği artırarak enerjinin tüketiciye ulaştırılmasını hedeflemektedir. Elektrik sayaçları, gaz sayaçları, ısı sayaçları ve su sayaçları gibi gelişmiş aygıtlara uzaktan erişimin sağlandığı iki yönlü gelişmiş ölçüm altyapısı (AMI), ev otomasyonu ile ev alan ağı (HAN) iletişim senaryoları gibi sistemler “Akıllı Şebeke” uygulamaları arasında yer almaktadır. Temel sayaç okumasına ek olarak enerji kullanımını toplamaya ve analiz etmeye olanak sağlayan çeşitli iletişim ortamları aracılığıyla; elektrik sinyalinin akım, voltaj değişimleri elde edilerek sinyal kalitesinin değerlendirilmesi de mümkün olmaktadır.

Bu tür şebeke verilerinin ölçümlerinin yapıldığı sistemlerin haberleşme alt yapısı için kablolu, kablosuz ve fiber optik gibi birbirinden farklı haberleşme teknolojileri seçenek olarak mevcuttur. Bu teknolojilerin arasından “Güç Hattı Haberleşmesi” (Power Line Communication – PLC) adıyla bilinen teknoloji; mevcut elektrik dağıtım kablolarını

haberleşme ortamı olarak kullanıp sistemin maliyetini düşürmesi sayesinde, kablosuz haberleşme teknolojileriyle rekabet eder durumda olup, sektöre avantaj sunmaktadır [1].

Güç hatlarının veri haberleşmesi için kullanılmasının geçmişi 1900'lerin başlarında sokak lambalarının kontrolü için düşük veri hızlarında haberleşme yapılmasıyla başlamaktadır. Son yirmi yılda akıllı şebeke teknolojisinin gelişmesi ve güç hattı haberleşmesinin uygun maliyetli çözüm sunması ile birlikte güç hattı haberleşmesi alanındaki çalışmalar daha da artmıştır [2].

Basit bir PLC kanalında haberleşme Şekil 1.1'de gösterildiği üzere gerçekleşir. Vericide modüle edilmiş sinyal güç hattı haberleşme kanalına iletilir. Kanalda ortamın karakteristiğine uygun olarak güç hattı gürültüsüne maruz kalan sinyal demodüle edilmek üzere alıcıya iletilmiş olur. Sağlam bir haberleşme için veri sinyalinin vericide başarılı yöntemlerle modüle edilmesi gerekmektedir. Böylece, kanaldaki gürültülerin ve ortamın bozucu etkilerinin alıcı tarafında arındırılarak verinin doğru alınması sağlanır.



Şekil 1.1. Güç hattı haberleşme sistemi

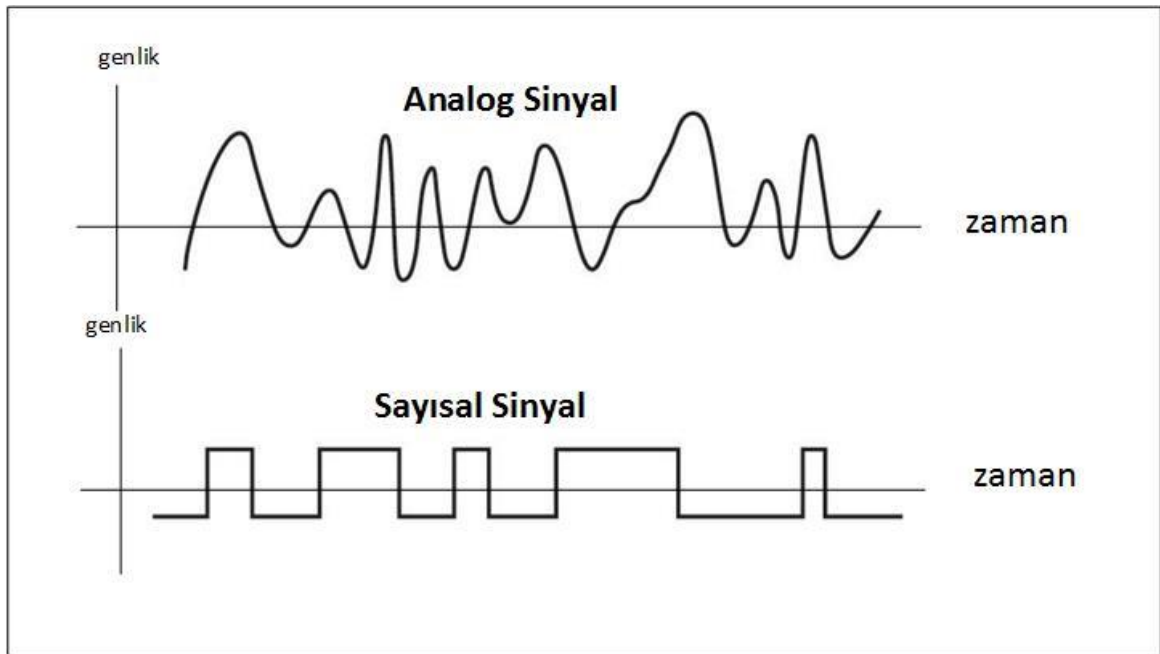
Güç hattı haberleşmesinde, elektrik sinyalini taşıyan frekanstan (~50Hz) daha yüksek bir taşıyıcı frekans (ör. 35 kHz) kullanılarak veri taşınmasına olanak sağlanır. Haberleşme modülasyonunda çoklu alt taşıyıcıların kullanılmasıyla; yüksek veri hızlı dar bant enerji hattı

haberleşmesi (HDR-NB PLC) 2001- 2009 yılları arasında IEEE 1901.2 ve ITU-T G.hnem tarafından standartlaştırılmıştır. Bu yeni teknoloji sayesinde veri hızı 10 kbps'den 500 kbps'ye kadar çıkabilmektedir. En popüler standartlar CENELEC-A frekans bandında alçak gerilim (LV) şebekeler üzerinde çalışmak üzere belirtilen; ITUT G.9904 özelliklerini kullanan PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution - Akıllı Ölçüm Evrimi) ve ITU-T G.9903 özelliklerini kullanan ERDF G3-PLC'dir (Electricité Réseau Distribution France - Fransa Elektrik Dağıtım Ağı) [3].

Bu tez çalışmasında bir TÜBİTAK ARDEB 1003 (Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı) projesi olan “Alçak Gerilim Dağıtım Sistemi Verilerinin İzlenmesi ve Kayıt Altına Alınması Projesi” kapsamında çalışılmıştır. Projede güç kalitesi parametreleri (gerilim ve akımların etkin değerleri, enerji kesintileri ve akım harmonikleri) kesintisiz olarak izlenip hesaplanarak, olağan dışı durumlarda (düşük gerilim, aşırı gerilim ve akım, arıza ve aşırı harmonik) sistemin tespit yapması hedeflenmiştir. Sistemin haberleşme altyapısı olarak güç hattı haberleşmesi yukarıda açıklanan avantajlar sebebiyle tercih edilmiştir. Bu çalışmada ise, verici ve alıcı arasındaki haberleşmede veri hata oranı (BER) ve sinyal gürültü oranlarının (SNR) sahada nasıl etki edeceğini önceden simülasyon ortamında gözlemlemek amaçlanmış olup, Gazi Üniversitesi Telekomünikasyon ve Sinyal İşleme Laboratuvarı'nda (TESLAB) MATLAB programıyla PLC haberleşme kanalının değişik kanal koşulları altında performans analizi çalışılmıştır. Enerji hattındaki kablonun türü, uzunluğu ile elektronik cihazların ürettiği empedans değerlerinin haberleşmeye etkisinin incelendiği çalışmada; CENELEC A bandında (31-95 kHz) ITU-T G.9903 haberleşme protokolünün ERDF tarafından geliştirilen G3 spesifikasyonu ile haberleşme blokları ve dar bant güç hattı haberleşme gürültüsü eklenen deterministik PLC kanal modeli oluşturulmuştur. Kablo uzunluğu ve hattaki empedans değerlerine göre elde edilen Monte Carlo BER-SNR simülasyon sonuçları ise sonuç bölümünde paylaşılmıştır.

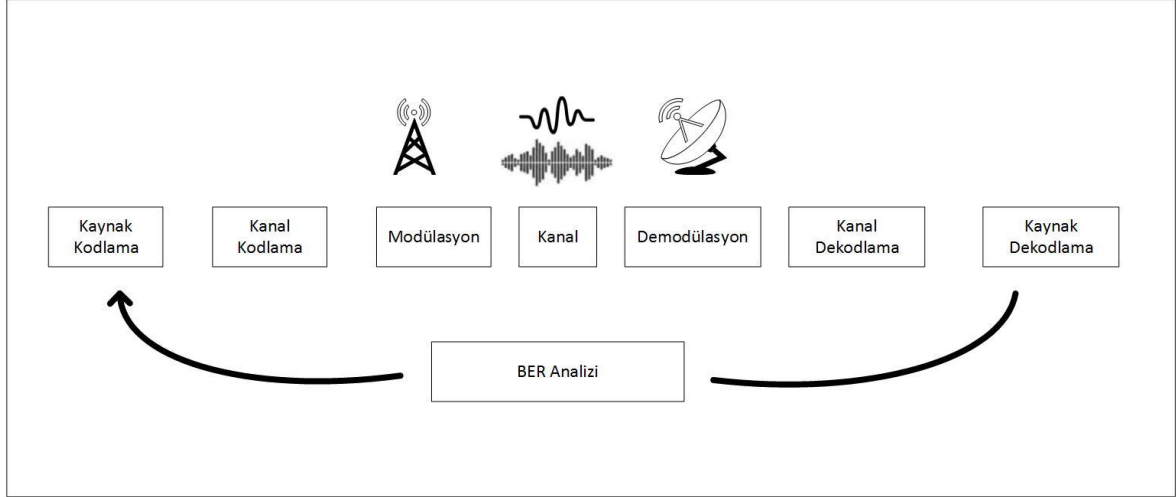
2. ELEKTRONİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Elektronik haberleşme sistemlerinde bilgi taşıyan fiziksel büyüklüklere “sinyal” adı verilmektedir. Sinyaller “analog” ve “sayısal” olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Anaolog sinyaller Şekil 2.1.’de gösterildiği gibi zamanda ve genlikte sürekli değişen sinyaller olmakla birlikte; sayısal sinyaller sadece belli örnekleme anlarında tanımlanan ve sınırlı sayıda genlik değeri alan sinyallerdir. Sayısal haberleşme sistemlerinde sinyalin kendisi değil ona karşılık gelen dijitler (0,1) iletilir [4].



Şekil 2.1. Analog ve sayısal sinyal

Bir elektronik haberleşme sisteminde verici, kanal ve alıcı olmak üzere üç temel terim bulunmaktadır. Kanal sinyalin verici-alıcı arasında iletimi sırasında geçtiği yolu ifade eder. Bu haberleşme ortamı iletken kablo, fiber optik kablo veya uzay olabilir. Bu sistemlerin temel amacı herhangi bir bilgiyi verici ve alıcı olarak belirlenen iki nokta arasında hatasız olarak iletiminin sağlanmasıdır. Sistem, mesajın üretilerek tek bir kaynaktan bir veya daha fazla hedefe gönderilmesi üzerine tasarlanır. Genel olarak bir verinin bir yerden alınıp bir başka yere iletimi için kullanılacak sayısal haberleşme biçimi Şekil 2.2’de gösterilen fonksiyonel blok diyagramı ile temsil edilebilir.



Şekil 2.2. Sayısal haberleşme sistemi bileşenleri

Sayısal bir iletişim sistemi tasarlanırken haberleşme bandının verimliliği, haberleşme sırasında harcanan gücün verimliliği ve sistemin maliyeti gibi parametrelerin değerlendirilmesi gerekmektedir. İletimi yapılacak verinin sahip olduğu band genişliğinin kanal kodlama ve modülasyon gibi haberleşme metodları ile işlenerek haberleşmenin yapılacağı sınırlı frekans bant aralığında iletiminin sağlanabiliyor olması band verimliliği olarak ifade edilebilir. Güç verimliliği ile ifade edilmek istenen ise; haberleşme sisteminin en az seviyede güç harcayarak güvenilir bir şekilde veriyi iletmesidir. Bu bakımdan, bit hata oranı olarak adlandırılan ve eşitlik 2.1.'de verilen BER (bit error rate) ile sinyal gürültü oranı diye adlandırılan ve eşitlik 2.2.'de verilen SNR (signal to noise ratio) analizleri, tasarlanan haberleşme sisteminin verimlilik testini sağlamaktadır [5].

$$BER = \frac{\text{Gönderilen Hatalı Bit Sayısı}}{\text{Gönderilen Toplam Bit Sayısı}} \quad (2.1)$$

$$SNR = \frac{\text{Yayımlanan Sinyal Gücü}}{\text{Gürültü Sinyalinin Gücü}} \quad (2.2)$$

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SNR \quad (2.3)$$

Kaynaktan elde edilen dosya; ses, resim veya belirli bir dildeki düz metin şeklinde olabilir. Bir verici çıkışının, iletim için uygun olan bir elektrik sinyaline dönüştürülmesi için

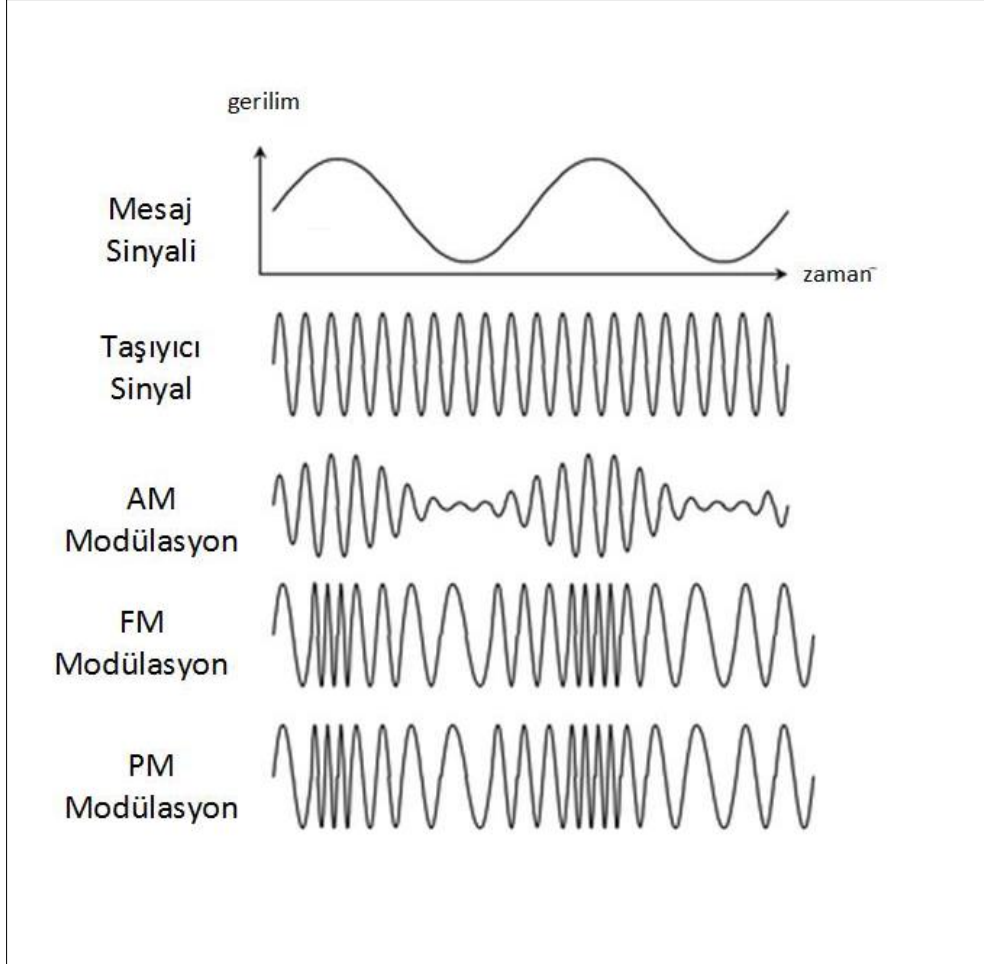
genellikle bir dönüştürücü gerekir. Örnek olarak, akustik bir konuşma sinyalini elektrik sinyaline çeviren dönüştürücü ile görüntü sinyalini elektrik sinyaline dönüştüren video kamera aynı işlevi görmektedir. Hedefin alındığı elektrik sinyallerini ses, resim, metin vb. için uygun bir forma dönüştürmek için de benzer bir çevirici (transformatör) gerekir. İletişim sisteminin kalbini oluşturan alıcı ve verici tarafından gerçekleştirilen işlevler ile kanal ögeleri aşağıda açıklanmaktadır.

2.1. Verici

Haberleşmede verici; elektrik sinyalini fiziksel kanal veya iletim ortamı yoluyla iletme uygun bir forma dönüştürmeyi sağlayan birimdir. Bunun için vericide giriş sinyalinin frekans bant genişliğinin azaltılması için filtreleme, sinyal gücünün yükseltilmesi, sinyalin bir taşıyıcıya bindirilmesi gibi işlemler yapılabilmektedir. Örneğin, radyo ve TV yayınları için çeşitli üst kurullar tarafında belirlenmiş haberleşme bant aralıkları mevcuttur. Sinyalin kendi frekansında iletimi mümkün olmayacağı için verici; sinyali bu bant aralıklarındaki frekansa en uygun hale dönüştürmelidir. Böylece, birden fazla radyo veya TV istasyonu tarafından iletilen sinyaller birbirine karışmadan iletilmiş olur. Benzer işlevler, birçok kullanıcıdan gelen elektrikli konuşma sinyallerinin aynı tel üzerinden iletildiği telefon haberleşme sistemlerinde de bulunmaktadır [6].

Verici, mesaj sinyalinin kanal ile eşleştirilmesini genellikle modülasyon adı verilen bir süreç vasıtasıyla gerçekleştirir. İletmek istediğimiz ses, görüntü, dosya gibi sinyaller düşük frekanslı ve büyük dalga boyuna sahip sinyallerdir. Bu sinyaller sahip oldukları enerjinin düşük olması sebebiyle uzak mesafelere iletilemezler. Bu sebeple, düşük frekanslı mesaj sinyali yüksek frekanslı taşıyıcı sinyale bindirilerek yüksek frekanslı sinyalin iletimi sağlanmış olur. Modülasyon; taşıyıcı sinyal (f_c) genlik, frekans ve fazının mesaj sinyaline bağlı olarak değiştirilmesi ile yapılan bir işlemdir. Analog (sürekli) sinyallerde taşıyıcı genliği mesaj sinyaline göre değişirse genlik modülasyonu (AM), taşıyıcı sinyal frekansı mesaj sinyaline göre değişirse frekans modülasyonu (FM), taşıyıcı sinyal fazı mesaj sinyaline göre değişirse faz modülasyonu (PM) olarak tanımlanır. Genlik modülasyonu, yüksek frekanslı taşıyıcı sinyal genliğinin mesaj sinyalinin frekansına ve genliğine bağlı olarak değiştirilmesi işlemine denir. Genlik modülasyonunda mesaj sinyalinin genliği artarken taşıyıcı sinyalin de genliği artar. Mesaj sinyalinin genliği düşmeye başladığında taşıyıcı sinyalin de genliği düşer. Sinüzoidal bir taşıyıcı dalganın faz açısının, mesaj

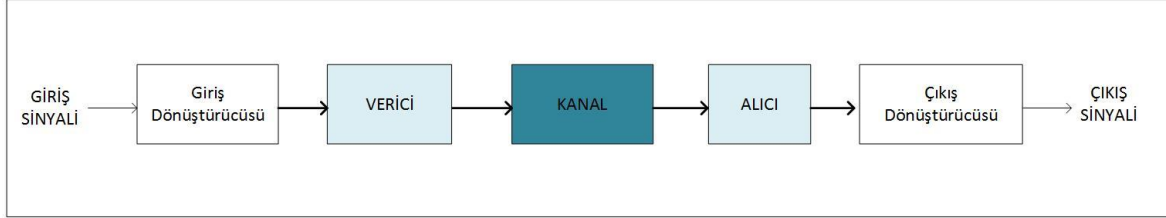
sinyaline göre değiştirilmesi işlemine açı modülasyonu denir. Modüle edici sinyale uygun olarak doğrudan değiştirilen taşıyıcının frekansı olursa FM, modüle edici sinyale uygun olarak doğrudan değiştirilen taşıyıcının fazıysa PM meydana gelir. Şekil 2.3.'te mesaj sinyali ve taşıyıcı sinyalin bu modülasyon türlerine bağlı değişimleri gösterilmektedir [7,8].



Şekil 2.3 Sürekli sinyal modülasyon gösterimi

Genel olarak, AM, FM ve PM gibi taşıyıcı modülasyonu, bilgi sinyalini kanalın nitelikleriyle uyuşan bir forma dönüştürmek için yukarıda belirtildiği gibi aktarır. Böylece, modülasyon süreci boyunca bilgi sinyali, kanalın tahsisi ile eşleşerek Şekil 2.4.'teki gibi çevrilir. Modülasyon türünün seçimi, sinyalin kanal üzerinden iletim sırasında karşılaştığı gürültü ve parazit türlerinin miktarı ve iletimden önce sinyal yükseltmesi için kullanılabilen elektronik cihazlar gibi çeşitli faktörlere dayanır. Her durumda, modülasyon işlemi, birçok kullanıcıdan aynı fiziksel kanal üzerinden birden fazla mesajın iletilmesini barındırmayı mümkün kılar. Modülasyona ek olarak genellikle vericide gerçekleştirilen işlevler; bilgi taşıyan sinyalin

filtrelenmesi, modüle edilmiş sinyalin yükseltilmesi ve kablosuz iletim durumunda, bir verici anten vasıtasıyla sinyalin yayılması olarak sıralanabilir [9].



Şekil 2.4. Sayısal haberleşme sisteminin temel bileşenleri

2.2. Haberleşme Kanalı

Haberleşme kanalı, sinyali vericiden alıcıya iletmek için kullanılan su, atmosfer, bakır tel, fiber optik kablolar, kablosuz (elektromanyetik dalgalar) da dâhil olmak üzere çeşitli fiziksel ortamları ifade etmektedir. Sinyal iletiminde fiziksel ortam ne olursa olsun, hepsini ortak sorunu, gönderilen sinyalin çeşitli olası mekanizmalarla rasgele bir şekilde bozulmasıdır. Sinyalin bozulmasının en yaygın biçimi sinyal yükseltilmesinin yapıldığı alıcı ön ucunda oluşturulan gürültü biçimindedir. Bu gürültüye genellikle termal gürültü denir. Kablosuz iletimde bunlara ilaveten insanlar tarafından oluşturulan sesler ve alıcı antenler tarafından toplanan atmosferik gürültüler de bulunmaktadır. Arabaların trafikteki gürültüsü insan yapımı gürültüye örnek olup, gök gürültüsü ve fırtınalarla gelen elektrik yıldırım deşarjları, atmosferik gürültüye bir örnektir. Kanaldaki diğer kullanıcıların girişimi ise hem kablosuz hem de kablolu iletişim sistemlerinde ortaya çıkan gürültü türlerindendir. Uzun menzilli, radyo iletimi için kullanılan iyonosferik kanal gibi bazı radyo iletişim kanallarında, sinyal bozulmasının başka bir biçimi de çok yollu yayılımdır. Bu sinyal bozulması, kendisini genellikle sönümlenme olarak adlandırılan sinyal yükseltilmesinde zaman değişimleri olarak gösteren bir sinyal bozukluğu, sönümlenme olarak karakterize edilir.

Hem çoğalan (ilaveli) hem de ilaveli olmayan sinyal bozulmaları genellikle rastgele bir olgu olarak karakterize edilir ve istatistiksel terimlerle açıklanır. Bu sinyal bozulmalarının etkisi, iletişim sisteminin tasarımı üzerinde dikkate alınmalıdır. Bir iletişim sisteminin tasarımında sistem tasarımcısı, fiziksel kanallarda karşılaşılan sinyal bozulmasını istatistiksel olarak karakterize eden matematiksel modellerle çalışır. Genellikle, matematiksel bir modelde kullanılan istatistiksel tanımlama, bu tür kanallar üzerinden sinyal iletimini içeren deneylerden elde edilen deneysel ölçümlerin sonucudur. Bu gibi durumlarda, iletişim

sistemlerinin tasarımında kullanılan matematiksel model için fiziksel bir ortam vardır. Öte yandan bazı iletişim sistemi tasarımlarında kanalın istatistiksel özellikleri zamanla önemli ölçüde değişebilir. Bu gibi durumlarda, sistem tasarımcısı çeşitli sinyal bozulmalarına karşı dayanıklı bir iletişim sistemi tasarlayabilir. Haberleşme sisteminin parametrelerindeki iyileştirmelerle karşılaşılan bu tür bozulmaların üstesinden gelinebilir.

2.3. Alıcı

Haberleşme sistemindeki alıcının işlevi, alınan sinyalde bulunan mesaj sinyalini iyileştirmektir. Mesaj sinyali taşıyıcı modülasyonu ile iletilirse, alıcı sinüs taşıyıcısından mesajı çıkarmak için taşıyıcı demodülasyonunu gerçekleştirir. Sinyal alıcıya ulaştığında üzerinde gürültü sinyalleri bulunacaktır. Bu sebeple; demodüle edilmiş mesaj sinyali bir dereceye kadar bozuk elde edilir. Bu sebeple alınan mesaj sinyalinin güvenilirliği, modülasyonun türüne, kanaldaki gürültünün zorlayıcı etkisine ve diğer ek müdahale türlerine bağlıdır. Alıcıda sinyal demodülasyonunun birincil fonksiyon olarak sağlanmasının yanı sıra, sinyal filtreleme ve gürültü bastırma gibi bir dizi başka fonksiyon da gerçekleştirilmektedir.

3. AKILLI SİSTEMLER VE HABERLEŞME ALTYAPISI

Akıllı şebekeler, dünya genelinde kullanıcılara sunulmak üzere geliştirilen nispeten yeni bir konseptir. Akıllı şebekenin tek, genel olarak kabul görmüş bir tanımı olmamasına rağmen pek çok kamu hizmeti kuruluşu, gelişmişlik sağlamak için elektronikte ve bilgi haberleşme teknolojisindeki (ICT-information communication technology) son gelişmelerin gerisinde kalmamak için şebekelerini uyarlama sürecindedirler. Farklı elektrik şebekelerinin uzaktan izlenmesine ve kontrolüne dayanan akıllı ölçüm, hem özel sektörden hem de kamu hizmetlerinden en büyük desteğe sahip olan ve daha geniş kapsamlı bir akıllı şebeke için temel oluşturma fırsatı bulan bir sistemdir. Akıllı şebekeler, örneksel ve sayısal bilgiyi çeşitli iletişim teknolojilerini kullanarak üreticiler ve tüketiciler hakkında bilgi toplayan ve bu bilgiyi, doğrudan elektrik üretiminde, iletiminde ve dağıtımında devamlılığının sağlanması ile verimin ve güvenilirliğin artırılması için kullanan sistemlerdir. Bir şebekeyi akıllı yapan faktörlerin başında iki yönlü bilgi akışı gelmektedir. Akıllı şebekeler, üretim, iletim ve dağıtım kademelerinden aldıkları ölçümleri bir ya da daha fazla sayıda kontrol merkezinde toplar ve şebekenin anlık ihtiyacına göre sistemin otomatik ya da yarı otomatik olarak ve hızlı bir şekilde tepki vermesini sağlar. Dolayısıyla akıllı şebekelerin belkemiğini sistemin anlık durumunun gözlenmesini sağlayan ölçüm cihazları ve iletişim kanalları oluşturmaktadır. Bu sistemler akıllı sayaçları gibi gerçek zamanlı erişimden tasarruf ve ticari fırsatlar açısından bazı faydalara ulaşma fırsatı sunan bir uygulamadır [10]. Akıllı şebeke sistemlerinin genel görünümü Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

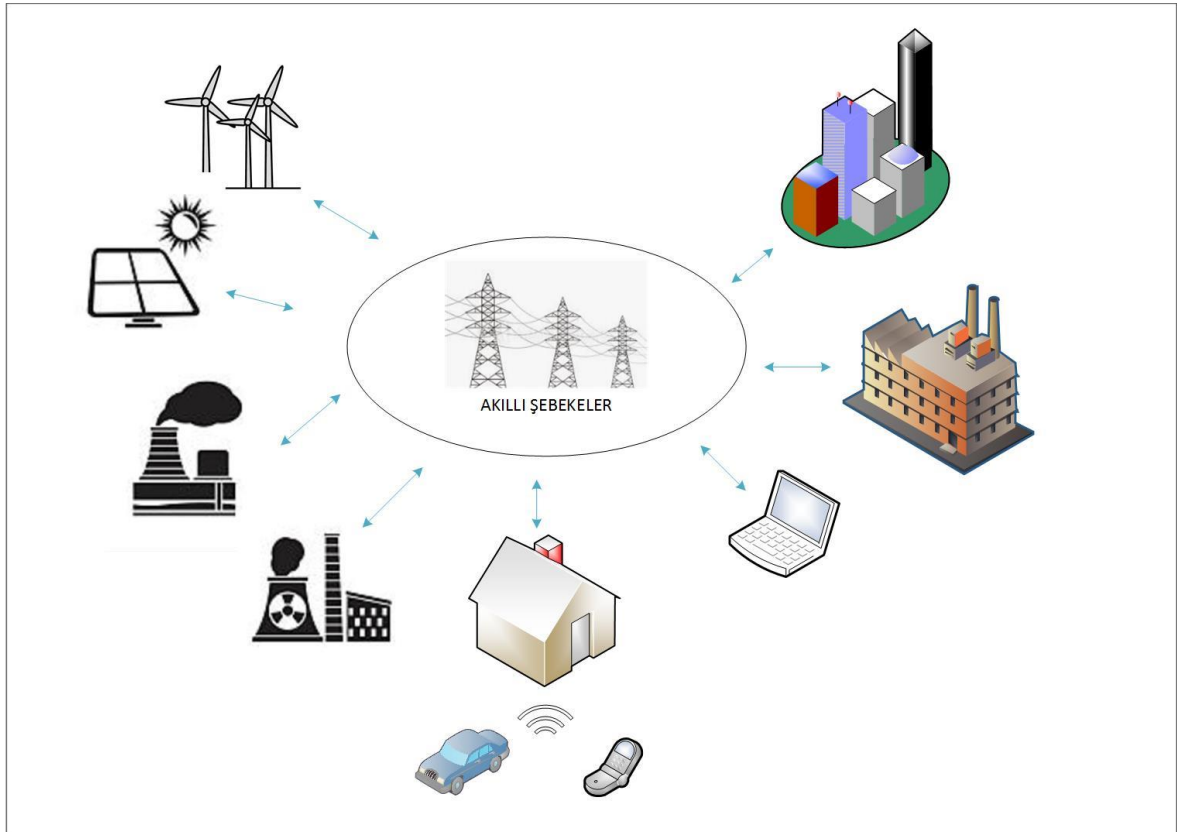
Güç hattı haberleşmesi (PLC), mevcut güç kablolarını kullandığı için akıllı şebekeler için doğal bir iletişim teknolojisidir. Yüz yıldan fazla bir süredir, santraller ve trafo merkezleri arasında durum ve alarm mesajlarını aktarmak için güç şebekesi operatörler tarafından genlik modülasyon (AM) taşıyıcı bazlı haberleşme kullanılmaktadır. Bu teknoloji 24 kHz ile 500 kHz gibi uzun dalga (LW) frekans aralığında çalışmaktadır. Birkaç yüz kilometre mesafeyi kapsayan uzun yol sistemi olmuştur. Yüksek gerilimli (HV) hatlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yukarıdaki uygulamalar için birkaç kHz’lik mevcut bant genişliği yeterli iken aynı zamanda operatörün dâhili telefonu olarak da kullanılmaktadır. Bu uygulamalar ilk PLC sistemleri olarak düşünülebilir.

İletişim ağının gerekli olduğu birkaç uygulama aşağıdaki gibidir;

- Akıllı ölçüm

- Dağıtılmış güç kaynaklarının kontrolü
- Talep tarafı yönetimi (DSM)
- Kontrol döngüsü
- Şirket içi iletişim

Akıllı ölçüm: Ülkeye özgü düzenlemelere bağlı olarak, akıllı ölçerler zaten yaygın şekilde kullanılmaktadır. Sayaçlar tipik olarak alçak gerilim (LV) ağına bağlanır. Avrupa'da PLC ile bir binanın bodrum katına radyo teknolojisinden daha kolay ulaşılabilirdiği için çoğunlukla PLC iletişim teknolojisi kullanılır. Bunun karşın Amerika ve Asya'da genellikle hücresel radyo veya bazı özel radyo sistemleri tercih edilir.



Şekil 3.1. Akıllı şebekeler

Dağıtılmış güç kaynaklarının kontrolü: Yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgâr türbinleri, solar paneller-PV'ler) güç şebekesini her voltaj seviyesinde beslemektedirler. Büyük rüzgâr türbinleri yüksek voltaj (HV) katmanına, küçük olanlar da orta gerilim (MV) katmanına bağlanabilir. Büyük güneş panel sistemleri orta gerilim hatlarına bağlanırken, birçok özel çatı üstü güneş panel sistemi alçak gerilim (LV) ağını besler. Bugün yüksek gerilim

katmanındaki iletişim, topraklama kablosunda konuşlandırılmış fiberler tarafından sağlanır. Orta gerilimdeki trafo merkezlerine iletişim, kamu telekom operatörleri tarafından sağlanan fiberler, DSL veya hücresel telsiz ile yapılabilir. Yine PLC, alçak gerilim elektrik şebekesindeki evlere ulaşmak için uygun bir teknolojidir.

Nesnelerin interneti diye ifade edilen kısaca IoT (nesnelerin interneti - information of things) ağları dünya çapında popülerlik kazanmaktadır. Bu tür ağlarda çoğunlukla kablosuz teknolojiler tercih edilmektedir. Kablolu iletişim ortamının kurulumu ile yeni kablolar başlangıçtaki sermaye harcamasını arttırmakta ve kullanım kolaylığını sınırlamaktadır. Sonuç olarak, IoT cihazlarının çoğu, ISM bantları üzerinden pille çalışan kablosuz cihazlardır. Bununla birlikte, ek altyapı ve abonelik ücreti olmadan cihazların kendi elektrik kabloları üzerinden “ücretsiz” bir telekomünikasyon ortamı sağlamak için PLC güzel bir çözüm sunmaktadır. Elektrik şebekesinin büyük kablolu bir altyapı olması ve dünyanın hemen her bölgesini birbirine bağlamasından dolayı, IoT ağlarında ihtiyaç duyulan çok büyük miktarda iletim aracı olarak yararlanılması, birçok fayda sağlayan pratik bir yaklaşım olacaktır [11].

4. GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİ (PLC)

Temel amacı AC (50 Hz veya 60 Hz) veya DC elektrik gücü sağlamak olan mevcut elektrik hatlarının, veri iletişimi amacıyla da kullanılmasına güç hattı haberleşmesi (Powerline Communications-PLC) denilmektedir. Bir diğer ifade ile güç hattı haberleşmesi, hâlihazırda varolan elektiksel güç dağıtım hatları üzerinden enerji sinyalleriyle birlikte enformasyon taşıyıcı sinyallerinin de kontrol ve ağ oluşturma amacıyla iletilmesidir. Elektrik sinyali ile karşılaştırıldığında PLC sinyali, birkaç yüz Hz'den birkaç yüz MHz'e kadar frekans bileşenleriyle yüksek frekans sinyallerini kullanabilir. PLC için kullanılan frekans band bölüşümü farklı uygulamalarla ilgilidir [12].

Elektrik hatlarının haberleşme ortamı olarak kullanılması iletilen sinyalin güvenilirliğini sağlamak açısından oldukça zordur. Kanal özellikleri ve parametreleri; frekans, konum, zaman ve hatta bağlı başka elektronik ekipman türüne göre değişmektedir. Güç hatlarının frekanslı seçici bir kanal olmasının yanı sıra; 10 kHz ila 200 kHz arasındaki frekans bölgelerinde elektronik girişim yönünden de hassaslık göstermektedir. Kanalda arka plan gürültüsüyle birlikte, genellikle 50/60Hz'de meydana gelen dürtüsel (impulsive) gürültü de mevcuttur. Dürtüsel gürültü sebebiyle, iletilen pakette birkaç yüz mikro saniye kadar gecikme meydana gelmektedir.

PLC uygulamasında veri hızı gereklilikleri, PLC'nin uygulandığı ızgara topolojilerinin özellikleri ve aynı zamanda PLC teknolojisinin sert iletişim ortamı ile başa çıkma kabiliyetini de sistem kurulumu için dikkate alınması gereken hususlardır.

Akım taşıyıcılı sistemleri: Bu terim, taşıyıcı modülasyonlu veri sinyallerinin güç hatları üzerinden iletildiği gerçeğini ifade eder. Sıklığı 500 kHz'in altındaki frekanslarla nispeten dar bantlı sinyalleri toplu olarak tanımlamak kullanılmıştır. ABD Federal İletişim Komisyonu'ndan (FCC) Federal Yönetmeliğinde taşıyıcı akım sistemlerini elektrik üzerinden ileterek radyo frekansı enerjisi ileten bir sistem veya sistemin bir parçası olarak tanımlamaktadır.

Güç hattı taşıyıcılı sistemler: Taşıyıcı akım sistemlerine benzer şekilde, taşıyıcı modüle edilmiş sinyalleri güç hatları üzerinden ileten sistemler için kullanılan bir terminolojidir. Kullanımının belirgin bir örneği, Amerikan Elektrik Mühendisleri Enstitüsü'nün (AIEE) AIEE Taşıyıcı Akım Komitesi tarafından yayımlanan “Enerji Hattı Taşıyıcısı Kanallarının

Uygulanması ve Artırılması Rehberi”dir. Ayrıca daha erken kullanım nedeniyle, tipik olarak 500 kHz'in altındaki frekanslarda çalışan sistemleri de ifade eder.

Dağıtım hattı taşıyıcısı (DLC): DLC, dağıtım alanındaki uygulamalara hizmet veren güç hattı iletişim sistemlerini ifade eder. Dağıtım şebekesindeki birçok hat süreksizliği ve dalı nedeniyle, DLC sistemleri, elektrik şebekesinin iletim bölümünde çalışan elektrik hattı iletişim sistemlerinden daha zor bir iletişim ortamı ile karşı karşıya kalır. DLC genellikle 500 kHz'in altındaki frekansları kullanan sistemleri tarif eder.

Güç hatları üzerinden geniş bant (BPL): BPL, sinyal bant genişliği yaklaşık 2 MHz ila 30 MHz ve daha yüksek frekans aralığında çalışan sistemleri ifade eden daha yeni bir terminolojidir. Onlarca MHz kullanılması sebebiyle ve birkaç Mbps ile yüzlerce Mbps arasında değişen veri hızlarıyla “geniş bant” terimi kullanılmaktadır. BPL sistemlerinin uygulanması, genişbant erişiminin yanı sıra ev içi iletişimi sağlamak için esas olarak şebekenin dağıtım bölümündedir.

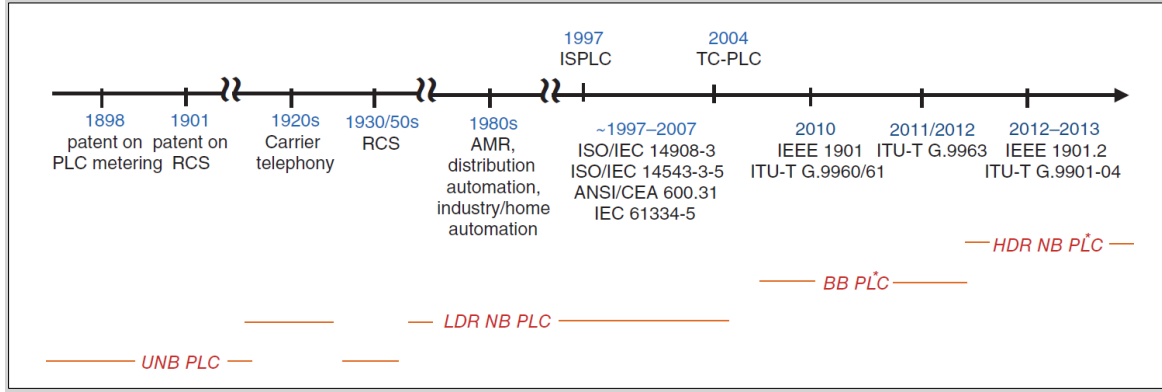
Elektrik hattı telekomünikasyonları (PLT): Bu terim BPL'ye benzer şekilde kullanılır, ve Avrupa ülkelerinde daha popülerdir. Örneğin, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI), “ETSI Teknik Komitesi Power-Line Telecommunications (PLT)” aracılığıyla PLC hakkında çeşitli raporlar ve spesifikasyonlar üretmiştir.

4.1. Güç Hattı Haberleşmesi Tarihçesi

PLC'nin kökenleri 1800'lerin sonlarına dayanmakta olup, 1990'ların başlarında tekrar çalışmalar başlamış ve günümüze kadar gelişmeler devam etmiştir. PLC teknolojisinin gelişimi Şekil 4.1'de, bazı patentleri, belirli uygulama alanlarını bir zaman çizelgesi boyunca uluslararası standartlar ile tanımlayarak gösterilmektedir.

Güç dağıtım şebekesi yüksek güçlü ve dar bantlı PLC sinyalleri kullanır. Sinyal frekansları 125 Hz ile 3 kHz arasındadır, böylece sinyaller dağıtım transformatörlerinden geçerek tüketicilere ulaşabilir. Dağıtım alanındaki dalgalanma kontrolü ile PLC'nin yaygın olarak kullanılmasından önce, 1920'lerde orta gerilim ve yüksek gerilim iletim hatları üzerinden ses iletişimi popüler hale gelmiştir. Bu sistemler yaklaşık 15 kHz ila 500 kHz frekans aralığında

çalışmakta ve birkaç kHz'lik sinyal bant genişliklerini kullanmaktaydılar. Daha sonra, koruyucu röle bu tür sistemler için önemli bir uygulama haline gelmiştir.



Şekil 4.1. PLC gelişimi zaman çizelgesi [12]

Elektrik hatlarında iki yönlü iletişim ise, 1980'lerde, otomatik sayaç okuma (AMR) ve dağıtım şebekesinde otomasyona, aynı zamanda sanayi ve bina otomasyonuna yönelik olarak tasarlanan PLC sistemleri ile gelişmiştir. Bu sistemlerin kullanımı, 1991 yılında 3 kHz ila 148,5 kHz frekans aralığında düşük voltajlı elektrik tesisatlarına sinyal verilmesi olan Avrupa EN 50065 Norm spesifikasyonunun yayınlanmasıyla kolaylaşmıştır.

Şimdiye kadar bahsedilen tüm PLC sistemleri UNB ve LDR NB PLC sınıflarına girmektedir. Birincisinde, 3 kHz'in altında çalışan ve 100 bps'lik sırada veri hızları sağlarken, ikincisinde verilerle 3 kHz ila 500 kHz arasında birkaç kbps hızında çalışılabilmektedir.

1990'ların sonlarında Avrupa'daki telekomünikasyon ve enerji piyasalarının serbestleştirilmesinin ardından elektrik güç kaynaklarının kendi hatlarıyla tüketici hizmetleri sağlamayı gerektirmesi ile beraber değişmiştir. İnternet erişimi ve ev içi multimedya uygulamaları için, yaklaşık 1.8 MHz ila 250 MHz arasında frekans bantları kullanan ve birkaç Mbps ila birkaç yüz Mbps arasında değişen veri hızları sağlayan genişbant PLC sistemleri geliştirilmiştir. BB PLC'nin tanıtımı, 1997'deki ilk ISPLC1'de görülebileceği gibi, IEEE İletişim'in kurulmasıyla ilgili özel konulardaki araştırmaların artışı da başlamıştır. Society TC-PLC BB PLC sistemlerinin teknik özelliklerini 2010 yılında IEEE 1901 ve ITU-T G.9960 / 61 standartlarında birleştirilmiştir.

2000'li yılların başındaki ikinci bir inovasyon dalgası ile odak noktası NB PLC'ye doğru kaymıştır. “Akıllı Şebeke” vizyonu şekillendiğinde, elektrik güç kuruluşlarının PLC'den

verimli ve güvenilir bir iletişim altyapısı elde etmenin bir aracı olarak görmeye başlamışlardır. NB PLC çözümleri, örneğin temel AMR hizmetlerini sağlamak için mevcut olsa da, BB PLC'de başarıyla kullanılan iletim yöntemleri, onlarca kbps ile yaklaşık 500 kbps arasında destekleyen yeni bir HDR NB PLC (high data rate narrow band PLC) sistemleri sınıfı için kabul edildi. HDR NB PLC için sistem özellikleri, sırasıyla 2012 ve 2013 yıllarında ITU-T G.9901-9904 ve IEEE 1901.2 standartlarında yayımlanmıştır. Akıllı şebeke uygulamaları, hem HDR NB hem de BB PLC için inovasyonun ana itici güçlerinden biri haline gelmiştir.

Modern PLC sistemlerinde, daha önce uluslararası standartlarda ve endüstri şartnamelerinde kabul edilmiş, uyarlamalı çentiklemeli çoklu taşıyıcı modülasyonu ve çoklu girişli çoklu çıkış (MIMO) aktarımı gibi gelişmiş kavramları içeren en son sinyal işleme tekniklerini kullanılmaktadır. Bu durum, bugünkü modern kablolu iletişim sistemlerindeki PLC teknolojisinin, diğer kablolu ortamlarda kullanılan haberleşme yapısıyla aynı olduğunu göstermektedir [13].

4.2. Güç Hattı Haberleşme Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Bir elektrik şebekesine bağlı noktalar arasında haberleşme sağlanmak istendiği durumlarda, güç hattı haberleşmesi her zaman avantajlı bir iletişim yöntemidir. Ayrıca, PLC ek kablolama yükü olmadan bağımsız ve yedek bir iletişim bağlantısı olarak da kullanılabilir. Bir diğer önemli husus ise PLC sinyalinin elektrik kablolarına yayılması için 110 ila 220V / 50 ila 60 Hz güç sinyaline ihtiyaç duymamasıdır. Cihazlar batarya gibi bir destekle çalıştırılabilirdiği sürece, binada elektrik olmadığı durumlarda bile PLC şebekesi çalışabilir. Böylece, şebekedeki elektriğin kesildiği durumlarda bataryası olan bilgisayarların enerjileri bitinceye kadar iletişime devam edilmiş olur. Ayrıca PLC modemler güçleri sağlandığı sürece, elektrik ağını kendi aralarında iletişim kurmak için de kullanabilirler [14].

Bunun yanında birçok modern araç türünde, elektroniğin muazzam bir şekilde konuşlandırılması ile birlikte elektronik kontrol ünitelerinin kullanıldığı (ECU) elektronik sistem sayısının katlanarak artmaktadır. Bu eğilim, araç içi bilgi akışını sağlamak için otomotiv iletişim ağı üzerinde önemli bir baskı yaratmaktadır. İletişim için fazladan kablo kullanılması, kablo demetini karmaşılaştırır, üretim ve montaj maliyetlerinde, ekstra ağırlıkta ve alanda bir artışa neden olur. Bununla birlikte, PLC üzerinden veri iletişimi için

elektrik kablolarının yeniden kullanılması ek kablolardan kaçınılarak; maliyet, ağırlık ve alan avantajı sağlamaktadır. PLC'nin potansiyel faydaları elektrikli taşıtlarda özellikle de elektrikli arabalarda daha belirgindir. Elektrikli arabalar, geleneksel içten yanmalı motor (ICE) araçlarla karşılaştırıldığında; düzenli çalışmayı destekleyen, aynı zamanda karmaşık teşhis ve bakım için güç ve akü yönetimi için ek iletişim gereklidir. Tüm bu iletişim görevleri, ilave kablolardan kaçınılması ve böylece kablo demetinin boyut ve ağırlığının azaltılması ve araç enerji verimliliğinde daha fazla iyileştirmelere yol açması sebebiyle PLC uygun bir çözüm olarak görülmektedir.

PLC avantajları olarak; hazır altyapıyı kullanması, ekstra kablolamaya gerek olmaması, çabuk kurulumu ve ucuz darbant/genişbant iletişim sağlaması söylenebilir. PLC'nin dezavantajları olarak ise; kanalının zamanla değişken ve frekans seçici bir dürtü tepkisi olması, 6 farklı istatistiksel eklemeli gürültünün varlığı nedeniyle iletişimin zorluğu, özellikle dış ortam PLC erişim ağları için ürünlerin yeterli çoklukta olmaması, yüksek hızlı erişimde EMI/EMC problemleri yaşanması, güvenli olmayan erişim ortamı ve hazır altyapı olmasına karşın PLC modemlerinin üretiminin göreceli pahalı olması söylenebilir.

4.3. Frekans Aralığına Göre Güç Hattı Haberleşmesi

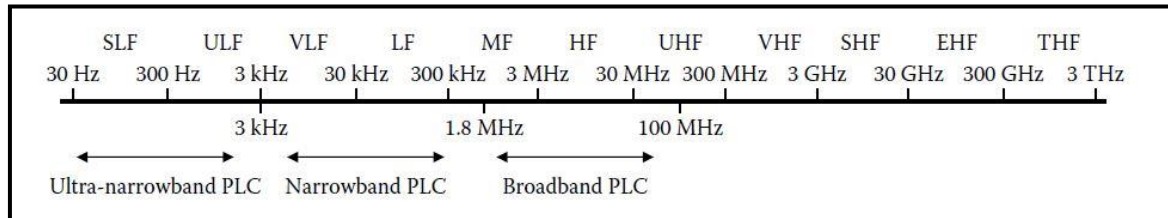
Güç hattının zorlayıcı kanal özelliklerinin yanı sıra, haberleşmenin yapıldığı bant genişliği de sınırlıdır (dar bant için <500 kHz). Güç hattı için geliştirilen haberleşme protokollerinde OFDM tercih edilerek bu sınırlı bant genişliği; OFDM'in gelişmiş modülasyon ve kanal kodlama teknikleri haberleşmenin zorlukları ile etkin bir şekilde baş etme imkânı sunmaktadır.

PLC sistemleri, kullanılan frekans aralığına (band genişliğine) göre çok alçak frekans (ultra narrowband), dar bant (narrowband) ve geniş bant (broadband) olmak üzere üç kategori altında sınıflandırılabilir [15]. Ayrıca, Şekil 4.2.'de ITU frekans bandı ve güç hattı haberleşmesindeki kullanımları sunulmaktadır.

- Ultra dar bant frekans: Bu sistemler Darbant-Düşük Hız-PLC (NB-LDR-PLC) olarak da ifade edilen ve 0.3-3 kHz bant aralığında 150 km uzaklığa kadar 100 bps veri hızında haberleşme imkanı sunan sistemlerdir. Bu sınıfın kullanım alanlarına örnek olarak Amerika ve Avrupa'da pek çok tesiste otomatik sayaç okuma, kayıp ve kesinti tespiti ile

gerilim izleme amacıyla kullanılan iki yönlü otomatik haberleşme sistemi (Two Way Automatic Communication System) verilebilir.

- **Dar bant frekans:** Darbant-Yüksek Hız-PLC (NB-HDR-PLC) olarak da ifade edilen bu sistemlerde, Avrupa CENELEC-A bandında otomatik sayaç okuma uygulamaları için OFDM tabanlı G3-PLC veya PRIME-PLC standartları kullanılır. 3 - 500 kHz aralığında çalışan dar bant haberleşme teknolojisi; geniş banta kıyasla yüksek veri hızına ihtiyacın olmadığı haberleşmeler için tercih edilmektedir. Bu standartlardan G3-PLC 35-90 Khz bandında 2.4-34 Kbps data hızı aralığında çalışmakta olup, PRIME-PLC ise 42-90 KHz bant aralığında 21-128 Kbps data hızı aralığında çalışabilmektedir.
- **Geniş bant frekans:** Genişbant-Yüksek Hız-PLC (WB-HDR-PLC) olarak da ifade edilen bu sistemler, evlere 2MHz'den 30 MHz'e kadar yüksek frekans aralığında veri iletimi gerçekleştiren geniş bant sistemlerinde beklendiği gibi dar bant haberleşmeye göre daha yüksek veri hızında haberleşmeye imkân sağlanmaktadır. Ofislerde Internet dağıtımı amacıyla kullanılan WB-HDR-PLC'de yine OFDM modülasyonu kullanılmakta olup frekans bandı 2-30 MHz arasında olan ve data hızı >100 Mbps olan P1901-PLC standardı örnek olarak verilebilir.



Şekil 4.2. ITU frekans bandı ve güç hattı haberleşmesindeki kullanımları [15]

Yüksek veri hızına ihtiyaç duyulmadığı durumlarda 500 kHz'in altında çalışan dar bant iletişim teknolojileri tercih edilmektedir. Dar bant enerji hattı haberleşmesinde (Narrow Band Powerline Communication, NB-PLC) 3-500 kHz frekans aralığı otomasyon ve kontrol için ayrılmıştır. Dar bant frekans aralığı ülkelere göre farklı şekilde belirlenmektedir. Avrupa için Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (European Committee for Electrotechnical Standardization - CENELEC) tarafından 3-148.5 kHz, Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission - FCC) tarafından 10-490 kHz, Japonya'da Radyo Endüstrileri ve İşletmeleri Birliği (Association of Radio Industries and Businesses - ARIB) tarafından 10-450 kHz ve son olarak ise Çin tarafından 3-500 kHz frekans aralıkları dar bant frekans spektrumu olarak belirlenmiştir.

Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC) tarafından 3-148.5 kHz frekans aralığında tanımlanan dar bant PLC farklı amaçlarda kullanılmak üzere dört ayrı alt banda ayrılmıştır.

- CENELEC-A: 3-95 KHz
- CENELEC-B: 95-125 KHz
- CENELEC-C: 125-140 KHz
- CENELEC-D: 140-148.5 KHz

Bu bant aralıklarının kullanım amaçları aşağıda açıklanmıştır.

- CENELEC A: 3-95 KHz aralığını ifade eder. Enerji sağlayıcıları ile imtiyaz sahipleri için sınırlıdır. Bu tez çalışmasında sistemin ihtiyaçları doğrultusunda CENELEC A 3-95 KHz bant aralığında çalışılmıştır.
- CENELEC B: 95-125 KHz aralığını ifade eder. Enerji sağlayıcılarının müşterileri ile sınırlıdır. Bu frekans bandı için hiçbir erişim protokolü tanımlanmamıştır.
- CENELEC C: 125-140 KHz aralığını ifade eder. Enerji sağlayıcılarının müşterileri ile sınırlıdır. Bir kaç sistemin bu frekans bandında eşzamanlı olarak çalışması için, 132.5 kHz'lik bir merkez frekansı kullanan taşıyıcı duyulu çoklu erişim protokolü tanımlanmıştır.
- CENELEC D: 140-148.5 KHz aralığını ifade eder. Enerji sağlayıcıları müşterileri ile sınırlıdır. Bu frekans bandı için hiçbir erişim protokolü tanımlanmamıştır.

Avrupa CENELEC B-C-D bandlarında kontrol ve otomasyon amaçlı son-kullanıcı uygulamaları için kullanılan sistemlerdir.

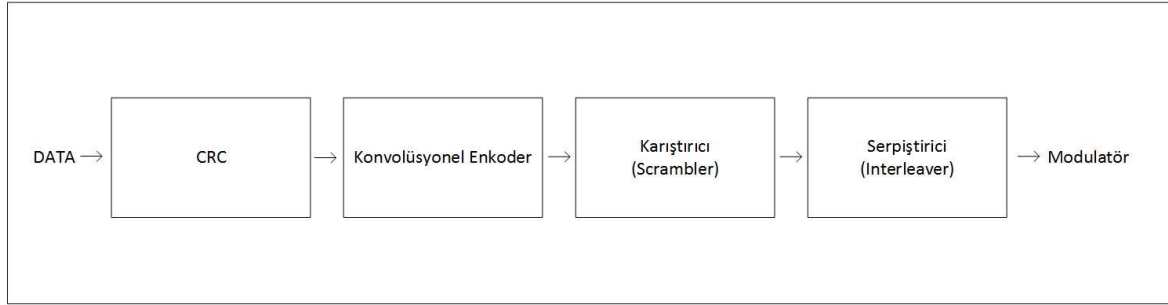
4.4. Dar Bant Güç Hattı Haberleşmesi Fiziksel Katman Standartları

Enerji Hattı İletişimi (PLC) haberleşme protokolü uzunca bir süre standartlaştırılmamış, ancak CENELEC normu EN 50065-1 gibi bazı düzenlemeler yapılmıştır. Geniş bant PLC standardizasyon çalışmaları ve PLC tabanlı yerel alan ağlar ile internet erişimine (IEEE P1901.1) ek olarak; Dar bantlı PLC'nin standardizasyonu akıllı şebeke (SmartGrid) uygulamaları da başlatılmıştır. Fiziksel Katman ile Orta Geçiş Kontrol Katmanı (Medium

Access Control Layer) için standartlaştırmalar ERDF tarafından G3, Maxim Integrated tarafından ise PRIME spesifikasyonları geliştirilmiştir.

4.4.1. Dar Bant Güç Hattı Haberleşmesi PRIME Spesifikasyonu

PRIME yaygın olarak otomatik ölçümlemede kullanılan dar bantlı PLC için geliştirilmiş bir özelliktir. ITU-T G.9904 PRIME olarak standardize edilmiştir [16]. Temel bir ileri hata düzeltme bloğu (forward error correction-FEC) şeması kullanılmaktadır. Bit serpiştirmeli bir evrişim kodu kullanılırsa, yüksek katmanlar tarafından etkin bir haberleşme sağlanmaktadır. Kanalin yeterince iyi görülmesi durumunda, FEC devre dışı bırakılabilmektedir.



Şekil 4.3. PRIME FEC enkoder [16]

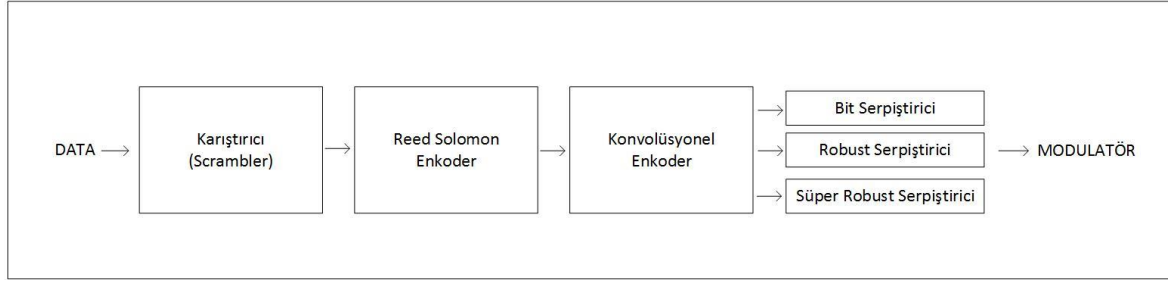
PRIME FEC bloğunda dijital sinyalin PHY başlığına bir döngüsel artıklık kontrolü (CRC) eklenir. Algılama mekanizması MAC katmanı tarafından gerçekleştirildiği için yüke CRC eklenmez. FEC etkinse, evrişimli kodlama gerçekleştirilir. Burada FEC seçilip seçilmediğine bakılmaksızın, başlık her zaman kodlanır. Karıştırma her zaman hem başlık hem de yük üzerinde gerçekleştirilir. FEC etkinleştirilmişse, araya sokma son bir adım olarak gerçekleştirilir. Kodlanan bitler mevcut olanlardan birini kullanarak daha sonra modüle edilir. Modülasyon şemaları OFDM sembollerine dönüştürülür. PRIME standardına göre ileri hata düzeltme yani FEC enkoderin blok şeması Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, başlık her zaman açık olarak FEC'e sahiptir. Ancak, MAC katmanı esas alınacaktır. Bu bilgilere dayanarak, kullanılacak en iyi modülasyon şemasına da karar verecektir. Standart, FEC veya modülasyon seçimi için herhangi bir hedef hata oranı belirtmez, tasarımcıya bırakılır. Daha ayrıntılı olarak: kodlanmamış başlık bitleri (ve FEC Açık ise kodlanmamış yük bitleri) $K = 7$ kısıtlayıcı uzunluğa sahip yarı hızlı bir evrişimli kod ve jeneratör ile kodlanmış polinomları 1111001 ve 1011011 gibidir. Her PPDU

iletiminin başlangıcında enkoder durumu sıfır olarak ayarlanmıştır. Kodun sonuna sekiz sıfır eklenir. Başlık kodlayıcıyı sıfır durumuna döndürmek için FEC açık ise, altı sıfır aynı amaç için kodlanmamış yüke eklenmiştir. Karıştırıcı bit akışını rastgele ayarlamak için kullanılır. Bu, daha sonra pik değerlerini azaltmaya da yardımcı olur. IFFT, kodlamadan sonra başlıkta veya yükte uzun bir seri veya sıfır oluşması durumundadır. Temel olarak, kodlanmış bitler sözde bir gürültü dizisine sahip XOR'dur. FEC açık ise, serpiştirme son adım olarak gerçekleştirilir. Dar bant girişim OFDM taşıyıcılarının grupları etkilenirken, derin solmalara neden olur. Bu nedenle bit hataları patlamaları serpiştirme, bu hata patlamalarının yayılmasını ve bitleri önceden belirlenmiş bir şekilde yeniden sıralayarak rastgele olarak görünmesini sağlar. Bu sadece rastgele hataları idare edebilen evrişim koduna yardımcı olur. Alıcıda tüm kodlama işlemlerinin karşıtları kod çözme işlemi için gerçekleştirilir.

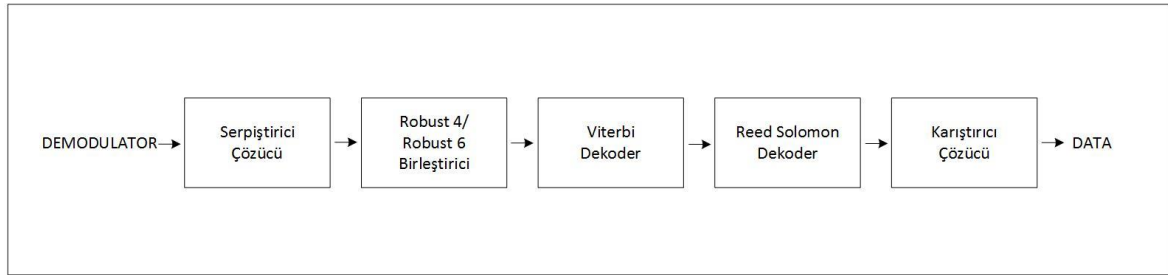
4.4.2. Dar Bant Güç Hattı Haberleşmesi G3 Spesifikasyonu

G3-PLC, çeşitli şebekeler tarafından desteklenen akıllı şebekeye yönelik distribütörler ve satıcılar için geliştirilmiş düşük katmanlı bir protokoldür. ITU G.9903 G3-PLC olarak standardize edilmiştir [17]. ERDF, elektrik tedarikçilerinden tüketicilere kadar tüm elektrik tedarik zincirini yönetmek için bir Otomatik Ölçüm Yönetimi (AMM) sistemi geliştirmeyi ve uygulamayı planlamaktadır. Sistem, müşterinin tesislerinde kurulu olan metreler ile yoğunlaştırıcı arasında bir Master ve Slave konfigürasyonunda iletişim kurarak OFDM-PLC'yi kullanarak güvenilir bir iki yönlü iletişim sağlamaktadır. Bu çalışmada G3 protokolü tercih edilmiştir.

Bu düzende evrişim (konvolüsyonel) ve Reed-Solomon kodlaması, neden olduğu hatalarla mücadele etmek için kullanılır. Arkaplan gürültüsü ve itici gürültü iki boyutlu bir araya yerleştirme şeması kullanılır. Hem zaman hem de frekansta çeşitlilik sağlamak, hata patlamalarıyla mücadele etmektedir. Bunlara ek olarak, gerekirse tekrar kodlayıcı da kullanılabilir. Tüm FEC kodlayıcı ve kod çözücü Şekil 4.4'te ve Şekil 4.5'de iki farklı çalışma modu mevcuttur. Normal modda FEC, bir RS kodlayıcı ve bir evrişimli kodlayıcıdan oluşur. Robust modunda, ek olarak RS ve evrişimli (konvolüsyonel) kodlayıcılar için her biti dört kez tekrarlayan bir tekraralama kodu (repetition code - RC) kullanılır. Ekstra koruma ilk olarak, çerçeve kontrol başlığı (FCH) 5-bit döngüsel artıklık kullanılarak korunmaktadır. Önceki şemalarda olduğu gibi, verileri rastgele bir şekilde vermek için bir karıştırıcı kullanılır. Veriler önceden belirlenmiş bir sözde-gürültü dizisi ile XOR'da dağılır.



Şekil 4.4. G3 FEC enkoder [17]



Şekil 4.5. G3 FEC dekoder [17]

Şifreleyiciden sonra, veriler iki kısaltılmış, sistematik RS kodundan biri kullanılarak kodlanır. İki kodun parametreleri 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.

$$n = 255, k = 239, t = 8 \quad (4.1)$$

$$n = 255, k = 247, t = 4 \quad (4.2)$$

Burada n çıkış sembollerinin sayısı iken, k ve t giriş sembollerinin sayısıdır. Her iki kod da Galois Field GF’den faydalanır. Kod üretim polinomu (4.3)’te alan üretim polinomu ise (4.4)’te verilmiştir.

$$g(x) = \prod_{i=1}^t (x - \alpha^i) \quad (4.3)$$

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (4.4)$$

Robust modunda $t = 4$ kodu kullanılmaktadır. Daha sonra, RS kodlayıcıdan gelen çıkış yarım oranlı evrişimli kodlayıcı kullanılarak kodlanır. $K = 7$ kısıtlayıcı uzunluğu ve jeneratör polinomları 1111001 ve 1011011 ile bu, PRIME’da kullanılan kodlayıcının aynısıdır. Geri dönmek için evrişimli kodlayıcı sıfır durumuna geri döner, verinin son bitinden sonra altı sıfır eklenir. Son aşama çeşitlilik sağlamak için tasarlanmıştır. Birkaç ardışık OFDM sembolünü bozan hatalara karşı mücadele ve bunlara karşı koruma OFDM için birkaç bitişik

frekansı etkileyebilen derin frekans solmaları sembollenir. Bunu iki aşamalı bir işlem kullanarak başarır. Serpiştirme başlamadan önce, bitler düzenlenir. Sütunların farklı OFDM sembollerini ve satırların da temsil ettiği bir matriste farklı alt taşıyıcılar kullanılır. Birincisi, her sütun dairesel olarak farklı sayılara kaydırılır. Böylece bozuk bir OFDM sembolünün farklı sembollere yayılmış olur. İkincisi ise, her satır bir frekans solmasının bozulmamasını sağlamak için dairesel olarak farklı sayıda kaydırıldığı bir sütunun tamamıdır. Enkoder için Robust modu etkinse, Repetition Coder tekrarlanan sonucu tekrar eder. Serpiştiriciden dört kez paketlenen FCH'nin süper Robust modu kullanılarak gönderildiği ve altı kez tekrarlanacağı anlamına gelir. Farklı konfigürasyonlar için ulaşılan kodlama oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. RS blok boyutu ve çeşitli modülasyonlar için kodlama oranları [17]

Sembol Sayısı	DQPSK	DBPSK	ROBUST
12	37/53	10/26	-----
20	73/89	28/44	-----
32	127/143	55/71	-----
40	163/179	73/89	13/21
52	217/233	100/116	20/28
56	235/251	109/125	22/32
112	----- -	235/251	54/62
252	----- -	----- -	133/141

4.5. G3 ve PRIME Spesifikasyonları Performans Kıyaslaması

Dar bant yüksek hız güç hatları iletişim sistemlerinde CENELEC-A bandında çalışan temel popüler iki standart vardır: G3-PLC ve PRIME-PLC. Bu iki sistemin fiziksel katman haberleşme parametreleri ve modülasyon/kodlama vb. algoritmaları Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir. Hem G3-PLC hem de PRIME-PLC'nin fiziksel katmanları CP-OFDM (cyclic prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) üzerine kuruludur. G3-PLC 33,4 kbps veri hızına çıkabilirken, PRIME-PLC 128,6 kbps'a kadar veri hızı olanağı sunmaktadır. Data hızının G3-PLC'de PRIME-PLC'den daha düşük olmasının nedeni G3-PLC'de, PRIME-PLC'de kullanılan konvolüsyonel koda nazaran daha yüksek oranlı değişken Reed-Solomon / konvolüsyonel / tekraralama kodları kullanılmasıdır. Veri hızındaki bu azalışa karşın G3-PLC'de PRIME-PLC'ye oranla daha yüksek oranlı kanal kodlama kullanılmasından dolayı fiziksel katmanda daha sağlam bir haberleşme sistemi sağlanmaktadır [18]. PRIME ve G3-PLC arasındaki karşılaştırma olarak, AWGN ve dar bant girişiminden rahatsız edildiğinde G3-PLC'nin biraz daha sağlam olduğu, PRIME daha ucuz uygulamaların yapılmasına izin verecek daha az karmaşık sistem olduğu bulunmuştur. Çalışmamızda G3 protokolü tercih edilmiş olup, fiziksel katmanı Matlab'da kodlanmıştır.

Çizelge 4.2. G3-PLC ve PRIME-PLC standartlarının fiziksel katman parametreleri ve algoritmalar [18]

	PLC G3	PRIME
Çalışma Frekans Aralığı	35-91 kHz	42-89 kHz
Örnekleme frekansı f_s	400 kHz	250 kHz
OFDM		
FFT boyutu M	256	512
Cyclic prefix boyutu L_{CP}	30	48
Pencereleme (Windowing)	Var	Yok
Alt taşıyıcı aralığı Δf	1.5625 kHz	488 Hz
Taşıyıcıların sayısı (tek taraflı)	36	97
Maximum veri hızı	33.4 kbps	128.6 kbps

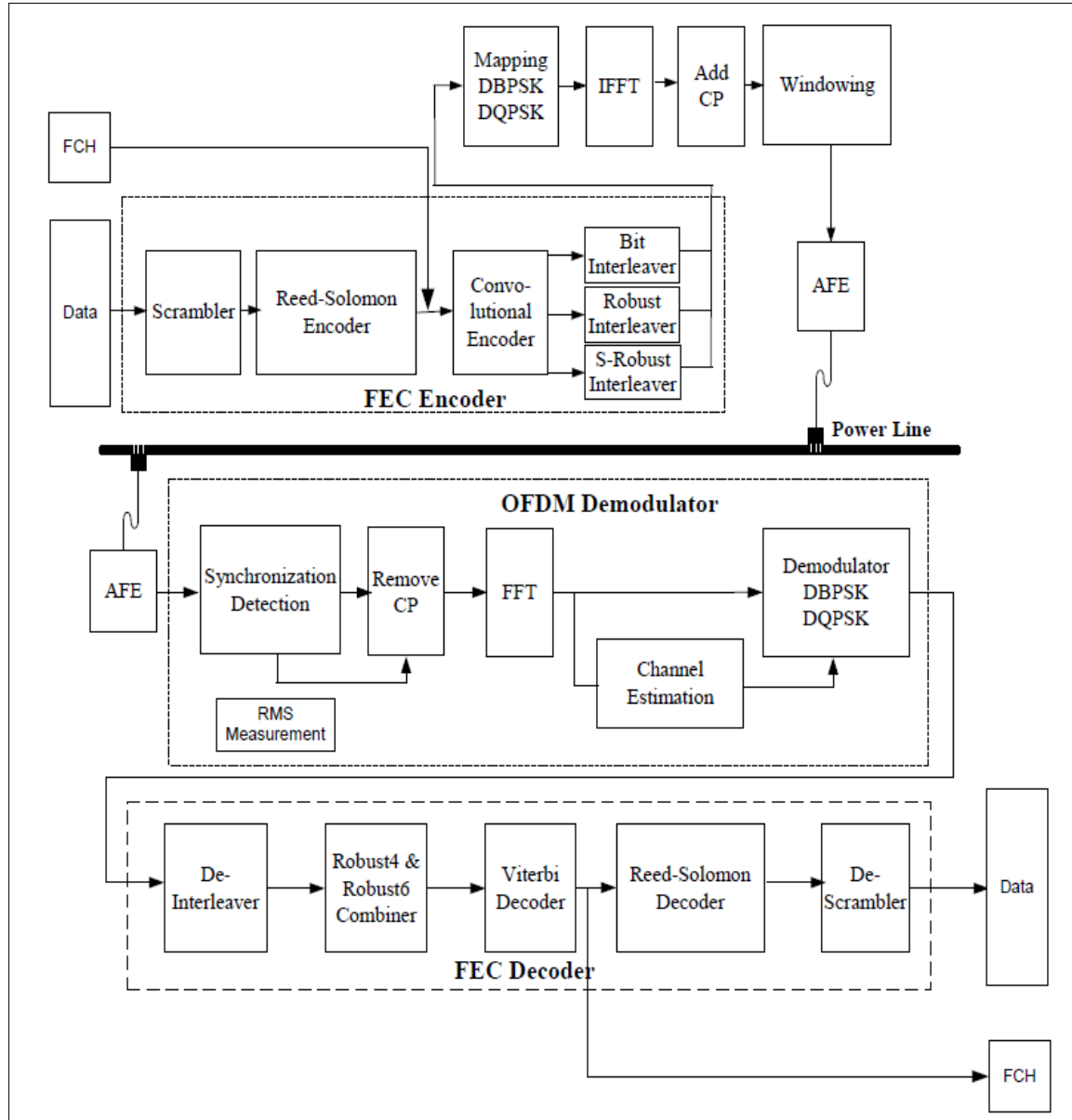
Çizelge 4.2. (devam) G3-PLC ve PRIME-PLC standartlarının fiziksel katman parametreleri ve algoritmalar [14]

	PLC G3	PRIME
İleri Hata Düzeltme (Forward Error Correction)	Reed Solomon kod, Konvolüsyonel kod, Tekrarlanan kod	Konvolüsyonel kod
İlave bit ekleme / Serpıştırma (Interleaving)	Her bir veri paketinde	Her bir OFDM sembolünde
Modülasyon Diferansiyel kodlama	DBPSK, DQPSK zamanda	DBPSK, DQPSK, D8PSK frekansta

Alçak gerilim PLC Otomatik Sayaç Okuma Akıllı Ağları için Ağ Katmanı Tasarımları, G3 ve PRIME ağlarında yönlendirme (sevk etme) algoritmaları standartlarda PHY ve MAC katmanı parametrelerine bağlı olarak tanımlanmıştır. G3 ve PRIME orta derece erişim kontrolü (Medium Access Control – MAC) katmanı çarpışma önlemeli taşıyıcı duyarlı çoklu erişim (Carrier-Sense Multiple-Access with Collision-Avoidance CSMA/CA) ile gerçekleşmektedir. Rastgele geri çekimle (Binary Exponential Back-Off) G3-PLC ve PRIME-PLC MAC katmanı algoritması ikili üstel geri çekme (BEB) düşük hız kablosuz kişisel alan ağı (WPANs) standardı olan IEEE 802.15.4-2006 standardı üzerine kuruludur. Kısacası, kanal erişim methodu çarpışma önlemeli taşıyıcı duyarlı çoklu erişim mekanizmasının rastsal geri-çekilme periyodu (Random Back-Off Time) ile kullanımıdır. G3 ağları meş ağ olarak, PRIME ağları ise dallanmalı ağ olarak yapılandırılmıştır. G3’de ağ yönlendirmesi (noktadan noktaya) olarak yönlendirme seçimi talep mesafesinde vektör yönlendirme (Lightweight On-Demand Distance-Vector Routing-next generation-LOADng) algoritması ile yapılmaktadır. PRIME’da ise dallanan ağa dal eklendikçe eksra anahtarlama nodları tanımlanmaktadır ve nodlardaki yönlendirme tabloları bu anahtarlardan yayınlanan yol gösteren sinyaller (beaconlar) aracılığı ile yapılmaktadır [19].

5. G3-PLC FİZİKSEL KATMAN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

ITU G 9955 standardında OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modülasyon tabanlı yüksek veri hızlı dar bant PLC spesifikasyonu olan G3-PLC Ağustos 2009'da yayınlanmıştır. Şekil 5.1'de ERDF tarafından yayınlanan G3 fiziksel katmanının blok şeması görülmektedir. Birçok iletişim sisteminde olduğu gibi G3, dijital verileri çoklu taşıyıcı frekanslarında kodlayarak ileten OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing), HDR NB-PLC (yüksek data hızı - dar bant) için seçilen modülasyon şeması olarak ortaya çıkmıştır [20].



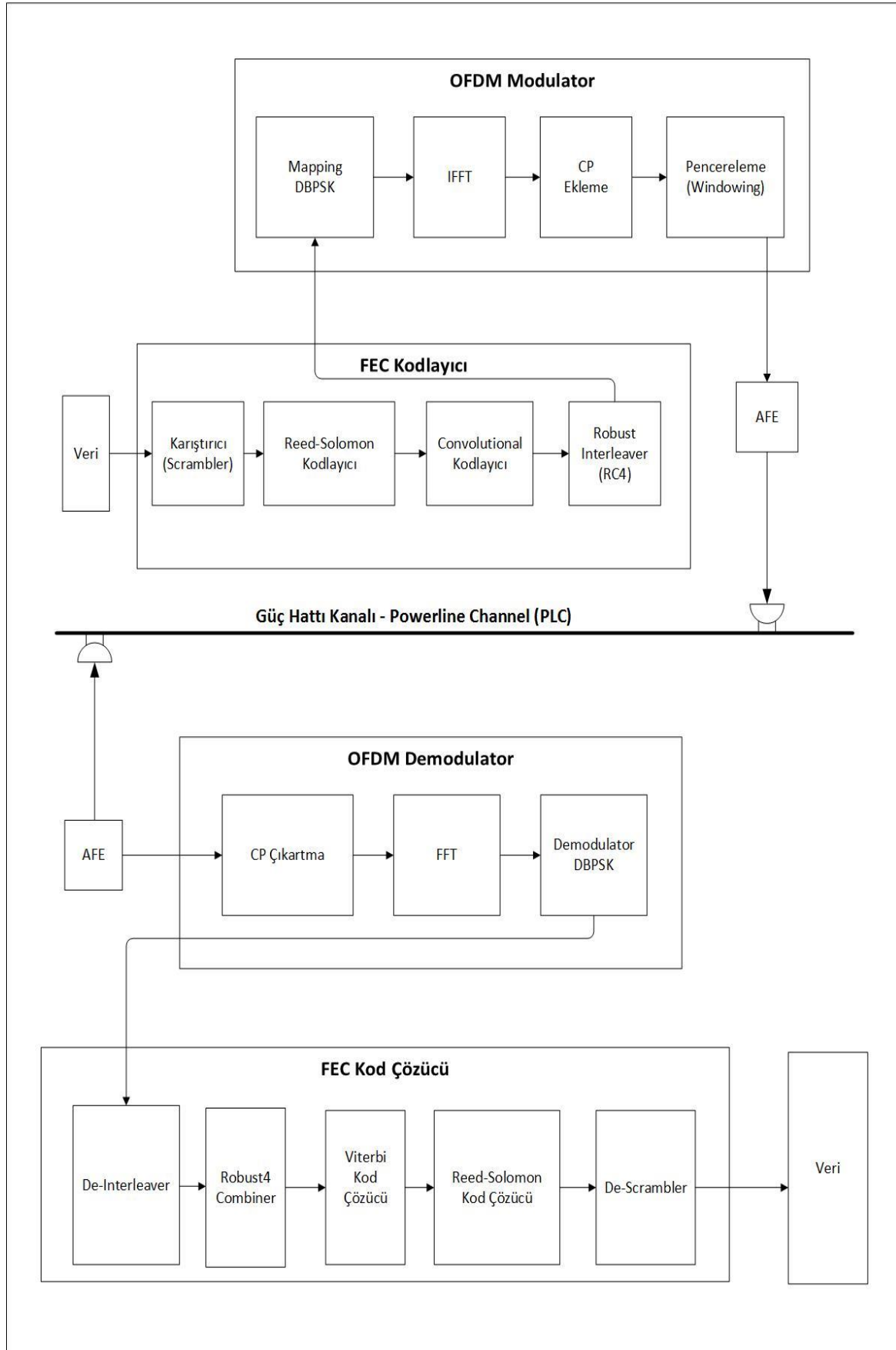
Şekil 5.1. G3 OFDM alıcı - verici blok diyagramı [20]

OFDM, CENELEC'in sınırlı bant genişliğini verimli bir şekilde kullanabilen ve böylece gelişmiş kanal kodlama tekniklerinin kullanılmasına izin veren bir modülasyon tekniğidir. Bu kombinasyon ile güç hattı kanalı üzerinden çok sağlam bir iletişim sağlanmış olur. Evrişimli ve Reed-Solomon kodlaması, alıcının arka plan ve dürtüsel gürültünün neden olduğu kayıp bitleri geri kazanmasına izin veren artıklık bitleri sağlar. Kod çözücü girişinde alınan gürültünün korelasyonunu azaltmak ve çeşitlilik sağlamak için bir zaman frekansı serpiştirme şeması kullanılır.

OFDM sinyali, diferansiyel olarak kodlanmış faz modülasyonu ile üretilen ve ayrı alt taşıyıcılara tahsis edilen karmaşık değerli sinyal noktaları üzerinde IFFT gerçekleştirilerek üretilir. Bir OFDM sembolü, IFFT tarafından oluşturulan her bloğun başına döngüsel bir örnek eklenerek oluşturulur. Döngüsel öneğin uzunluğu, bir kanal grubu gecikmesinin art arda OFDM Sembollerine veya bitişik alt taşıyıcılara müdahale etmeyeceği şekilde seçilir. Link adaptasyonu için bir kör kanal tahmin tekniği kullanılır. Alıcı sinyalinin kalitesine bağlı olarak, alıcı kullanılacak modülasyon şemasına karar verir. Dahası, sistem alt taşıyıcıları kötü SNR ile ayırır ve bunlara veri iletmez.

G3 haberleşme protokolü FCC, CENELEC ve ARIB gibi uluslararası ve yaygın kabul gören düzenleyicilerin kullanımına uygun olması açısından 10 kHz - 490 kHz arasındaki bant aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. G3 standardında konstellasyon haritalaması (mapping) için diferansiyel BPSK, QPSK veya 8PSK kullanması ve ardışık konvolüsyon Reed-Solomon ileri hata düzeltme kodlaması (FEC- forward error correction coding) gibi uygulamalarla 300 kbps'ye yakın fiziksel veri hızlarına ulaşır. Her bir alt taşıyıcı için diferansiyel modülasyonlar (DBPSK, DQPSK ve D8PSK) alıcı modülasyonlarında (BPSK, QPSK, 8-PSK ve 16-QAM) alıcı tasarımı önemli ölçüde basitleştirir. Bunun sebebi alt taşıyıcıların açılarının alıcıda algılanması için hiçbir izleme devresi gerektirmemesidir.

Çalışmamızda, Şekil 5.1'de verilen ERDF G3 fiziksel katman blok diyagramına uygun olarak kodlama ve modülasyon yapılmıştır. G3 fiziksel katmanı oluştururken Şekil 5.2'de gösterildiği gibi reed-solomon kodlayıcı (encoder) ve konvolüsyonel kodlayıcıda (enkoder) paketlenen data robust moda (gürbüz mod) uygun olarak serpiştiricide (interleaver) dört defa tekrarlanarak OFDM modülasyonu yapılmıştır. Çalışmada senkronizasyon algılama (synchronization detection) ve kanal kestirimi (channel estimation) yapılmamıştır.



Şekil 5.2. MATLAB’da modellenen G3 fiziksel katman blokları

Bu bölümde G3 PLC fiziksel katman haberleşme blokların işlevlerinin açıklanması amaçlanmakta olup, [20]'de verilen özelliklerden faydalanılmıştır. Spesifikasyonda verilen blokların matematiksel ifadelerine ve değerlerine uygun olarak tasarlanan sistem, MATLAB'da obje yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

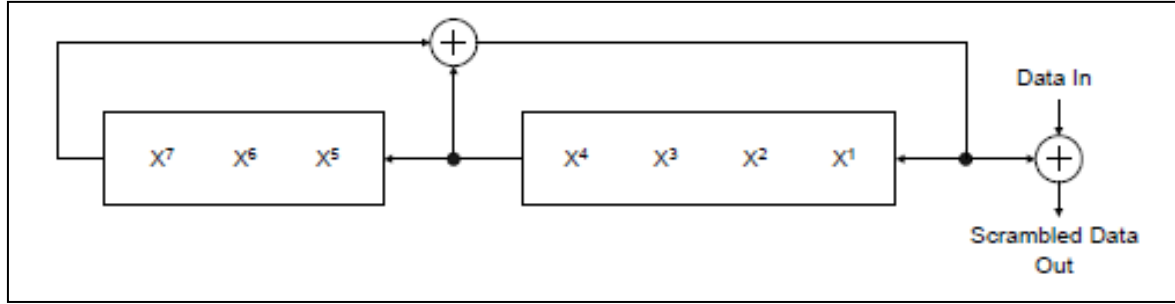
5.1.İleri Hata Düzeltme Bloğu (Forward Error Correction - FEC)

Burst Error (bit akışındaki bitişik hataları) dijital iletişim sistemlerinde, yayın sistemlerinde ve dijital depolama aygıtlarında yaygın bir durumdur. Bu sorunu hafifletmek için birçok mekanizma geliştirilmiştir. İleri hata düzeltme yöntemi, yedekli bilginin orijinal mesaja eklendiği bir tekniktir. Böylece alıcıda bazı hatalar eklenmiş gereksiz bilgiler kullanılarak düzeltilebilir. İleri hata düzeltme bloğu ile haberleşmenin daha güvenilir olması amaçlanmaktadır. Önceki bölümlerde de izah edildiği gibi G3 spesifikasyonunda modülasyon yapılırken PRIME'dan farklı olarak konvolüsyonel kodlamadan önce Reed Solomon kodlama yapılmaktadır. Bu yöntemle Reed Solomon enkoder ile konvolüsyonel enkoder birlikte kullanılarak haberleşmede veri kayıplarının azaltılması sağlanmaktadır. Konvolüsyon ve Reed-Solomon kodlamasında artıklık bitleri oluşturularak; arka plan ve itici gürültünün neden olduğu kayıp bitlerin alıcıda kurtarılması sağlanmaktadır. Güç hattı gibi oldukça zorlu bir haberleşme ortamında iki kodlamanın kullanılıyor olması ciddi avantaj yaratmaktadır. Bu kodlamalara ek olarak eğer Robust modda çalışılıyor ise, veri iletiminin güvenilirliğini artırmak için ekstra tekrarlar kodu (Repetition code – RC4) kullanılmaktadır. Tekrarlar kodu ile konvolüsyonel enkoderden çıkan paketin her bir biti dört defa tekrarlanır.

5.1.1. Karıştırıcı (Scrambler)

G3 Karıştırıcı (scrambler) bloğu ile iletilecek verinin rastgele bir dağılımının elde edilmesi amaçlanmaktadır. ERDF spesifikasyonunda Şekil 5.3'te gösterildiği gibi veri akışı, aşağıdaki polinom ile yinelenen bir "XOR" PN dizisi ile yapılmakta olup, verini bu polinoma uygun dağılımı yapılmıştır.

$$S(x) = x^7 \oplus x^4 \oplus 1 \quad (5.1)$$



Şekil 5.3. Veri karıştırıcı [20]

Her bir fiziksel çerçeve işleminin başlangıcında, karıştırıcıdaki bitler ile değer ataması yapılır. MATLAB’da iletilmek üzere rastgele üretilen 13 byte (13*8 bit) verinin scrambler yani karıştırıcı bloğu yardımıyla rastgele bir dağılımı elde edilmiş olup, veri modülasyon bloğuna iletilmek üzere dönüştürülmüştür.

5.1.2. Reed Solomon Kodlayıcı

Karıştırıcıdan (scrambler) gelen veri verimliliğin artırılması ve karmaşıklığın azaltılması için reed solomon kodlama bloğuna gelir. Bit hataları yerine veri bloğu hataları için optimize edilmiş olan Reed Solomon kodu Galois Alanı Aritmetiğine dayanmaktadır.

Galois Alanını (GF) kullanan kısaltılmış sistematik Reed-Solomon (RS) kodlarıyla kodlanır.

Reed Solomon Kodlama, bir seferde k sembol bloğunu alan ve 2t parite sembollerini ekleyen bir blok kodlama şemasıdır. Kullanılan moda bağlı olarak, aşağıdaki parametre uygulanır:

$$g(x) = \prod_{i=1}^{2t} (x - a^i) \quad (5.2)$$

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (5.3)$$

Kodlayıcı, k sembol bloğunu bir polinom olarak görmekte ve $M(x)$; k-1 derecesi ve ilk sembol en anlamlı terimin katsayısıdır. Enkoder $M(x)$ 'i x^{2t} ile çarpar ve maksimum $2t-1$ derece geri kalan polinomu elde etmek için polinom $g(x)$ ile bölünür. Bu polinomun, $g(x)$ polinomuna tamamen bölünebilen bir polinom olması için $M(x)$ 'in $2t$ 'ye eklemesi yapılır.

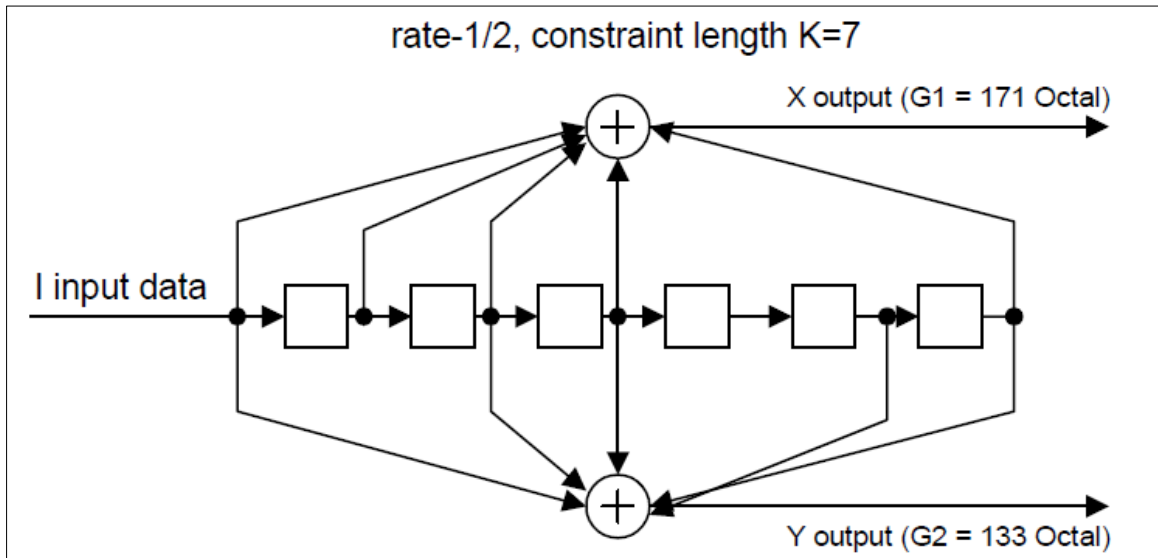
A0'ın gösterimi “00000001” dir, bu RS sembolünün en sol tarafı en önemli bit (EÖB) olarak tanımlanır ve bu bit hem karıştırıcıda hem de RS kodlayıcıda ilk sırada yer alır. Aritmetik,

a_i 'nin ilkel ikili polinom $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ 'i karşılayan basit bir element olan Galois Alan GF'de gerçekleştirilir. Bir veri baytı ($d_7, d_6, \dots, d_1, d_0$) Galois Alan elemanı $d_7a^7 + d_6a^6 + \dots + d_1a + d_0$ ile tanımlanmıştır.

Veri Karıştırıcı'dan gelen zaman içindeki ilk bit, RS kodlayıcının girişindeki sembolün en önemli biti haline gelir. Her RS kodlayıcı giriş bloğu bir veya daha fazla dolum sembolünden ("00000000") sonra mesaj sembollerinden oluşur. RS kodlayıcının çıkışı (dolum sembollerinin silinmesiyle) ilk mesaj sembolünden son mesaj sembolüne ve ardından eşliğe kadar olan sürede ilerler. Semboller, her sembol ilk önce en belirgin biti çıkardı.

5.1.3. Konvolüsyonel Kodlayıcı

Reed-Solomon bloğunun çıkışındaki bit akımı standart Konvolüsyon kodlayıcı oranında $\frac{1}{2}$ oranında, kısıtlama uzunluğu 7 (constraint length, $K=7$) olarak kodlanır. Kademe bağlantıları, Şekil 5.4'te gösterildiği gibi $x = 0b1111001$ ve $y = 0b1011011$ olarak tanımlanır.



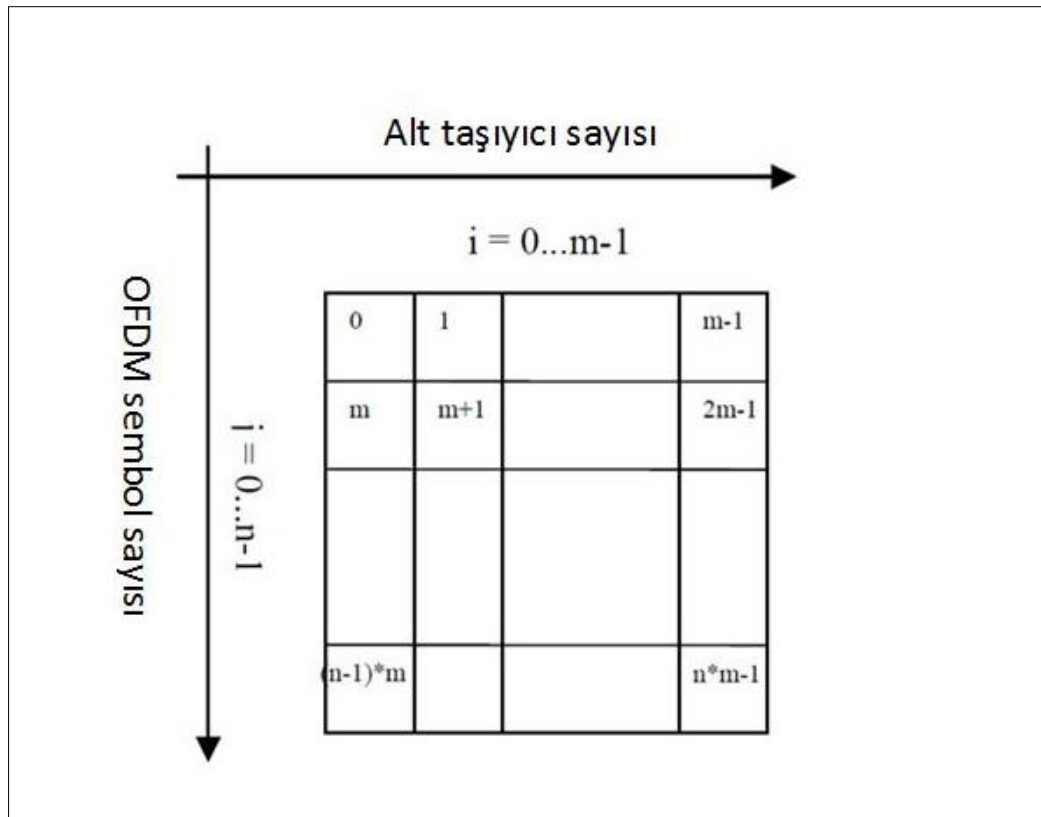
Şekil 5.4. Konvolüsyonel enkoder [20]

Konvolüsyonel kodlayıcıya son veri biti alındığında, konvolüsyonel kodlayıcının durumunu "sıfır durumuna" döndürmek için gereken 6 tane kuyruk biti yerleştirir. Bu, kod çözme sırasında gelecekteki bitlere dayanan konvolüsyonel kod çözücünün hata olasılığını arttırmaktadır. Kuyruk bitleri altı sıfır olarak tanımlanır.

5.1.4. Serpiştirici (Interleaver - Robust Mod RC4)

Robust modunda, elde edilen paket serpiştirici (interleaver) tarafından dört kez tekrarlanır. Bu kodlayıcı yalnızca Robust modda etkinleştirilir. Bu işlemde kayıp bitlerin önlenmesi amaçlanmaktadır ve bu sebeple her bir frame dört kez tekrarlanır.

Serpiştirici, Birkaç ardışık OFDM sembolünü bozan bir patlama hatası ve çok sayıda OFDM sembolü için birkaç bitişik frekansı bozan bir frekans derin solması olmak üzere iki farklı hata kaynağına karşı koruma sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Her iki problemle de aynı anda mücadele etmek için serpiştirme iki adımda yapılır. İlk adımda, her sütun dairesel olarak farklı sayıda değiştirilir. Bu nedenle, bozuk bir OFDM sembolü farklı sembollerin üzerine yayılmış olur. İkinci adımda, her sıra dairesel bir şekilde farklı sayılarda kaydırılır, bu da derin bir frekansın tüm sütunu parçalamasını önler. Dairesel kaymaların miktarı, her bir birleştirme bloğundaki (n) her bir OFDM sembolündeki (m) alt taşıyıcı sayısına ve m 'ye bağlı olarak seçilen m_i , m_j , n_i ve n_j parametreleri tarafından belirlenir. Şekil 5.5'te serpiştirme tamponuna konuldukları satır satır bitlerin sırasını gösterilmektedir. Daha detaylı bilgi ERDF G3 teknik dokümanında bulunabilir.



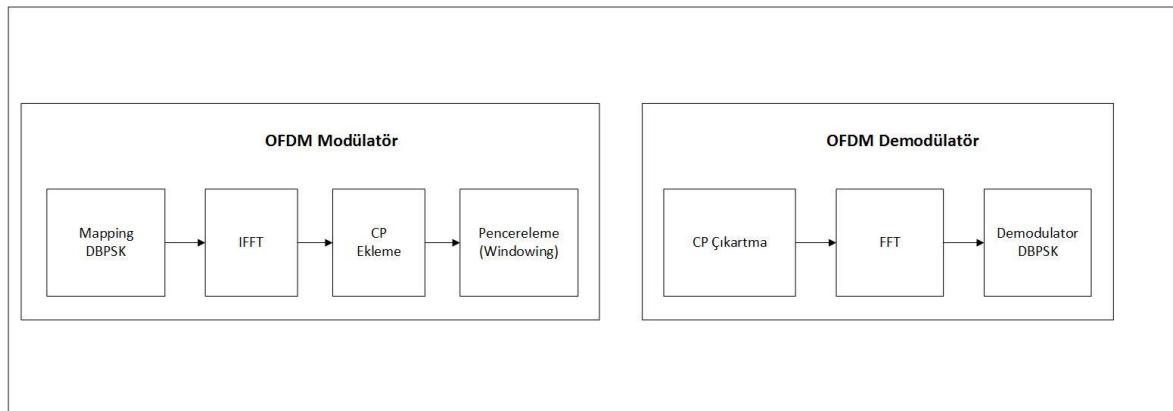
Şekil 5.5. Serpiştirici [20]

5.2. OFDM Modölatör

Bu teknikle data sayısal olarak modüle edilir ve yüksek hızlı data sembolleri alt kanallara bölünür. IFFT, Inverse Fast Fourier Transform (Ters Hızlı Fourier Dönüşümü) işlemiyle düşük hızlı alt semboller üretilir. Alt semboller toplanarak da OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Dik Frekans Bölmeli Çoğullama) sembolü elde edilir. Kısaca OFDM veri akışını düşük hızlı alt taşıyıcılara bölerek paralel kanallarda iletimini sağlar. OFDM'in avantajları arasında şunlar bulunmaktadır:

- Yansılardan kaynaklanan çok yol etkisine (multipath) karşı başarılıdır.
- Örtüşmeye izin vererek bant genişliğinin verimliliğini artırır.
- Sönümlenmeye karşı dayanıklıdır.
- IFFT, Inverse Fast Fourier Transform (Ters Hızlı Fourier Dönüşümü) ve FFT, Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü) işlemlerini kullandığından gerçekleştirilmesi kolaydır.

Şekil 5.6'da, bir OFDM sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir. İzin verilen bant genişliği, birbirine dik (ortogonal) taşıyıcı frekansları ile birçok bağımsız PSK modülasyonlu taşıyıcı olarak görülebilecek bir dizi alt kanala bölünmüştür.



Şekil 5.6. Modellenen OFDM alıcı ve verici bloğu [20]

OFDM sinyali, diferansiyel olarak kodlanmış faz modülasyonu (DBPSK, DQPSK ve D8PSK) tarafından üretilen ve bireysel alt taşıyıcılara tahsis edilen karmaşık değerli sinyal noktalarında IFFT gerçekleştirilerek üretilir. Her OFDM sembolünde, IFFT ile oluşturulan her bloğun başlangıcına döngüsel bir ön ek (CP-cyclic prefix) eklenir. Döngüsel önek

uzunluğu, bir kanal grubu gecikmesinin art arda OFDM sembollerine veya bitişik alt taşıyıcıların karışmasına neden olmayacak şekilde seçilir.

Güç hattı haberleşmesinde OFDM (ortogonal-dikgen frekans bölmeli çoğullama) tekniğinin tercih edilmesi sayesinde haberleşmenin hızının ve güvenilirliğinin artırılması amaçlanmıştır. Tek taşıyıcı iletim şemalarının aksine, OFDM iletim şemaları, gönderici ve alıcı arasında iletilen sinyal için güç dengeleme karmaşıklığını paylaşmak için kullanılır. Bu, PLC alıcılarının basit ve uygun maliyetli bir şekilde uygulanmasını sağlar. Bu erişim tekniği IEEE 802.11a ve 802.11g standartlarındaki Wi-Fi ve ADSL ve karasal TV yayın teknolojileri tarafından da kullanılmaktadır. OFDM iletişim ortamları için büyük problem olan girişimi konusunda oldukça sağlamdır. OFDM tekniğinin prensibi, frekans bandını, her bir alt bandın ikili bilginin bir bölümünü taşıyan dar bantlara ayrılmasına dayanmaktadır. Her bir alt bandın frekans tepkileri birbirine diktir ve iyi bir spektral verim elde etmek için taşıyıcı sinyaller kısmen örtüşmektedir.

OFDM ile Geleneksel frekans bölmeli çokluma tekniklerinden farklı olarak frekans bandının verimli kullanımı sağlanmış olur. Çeşitli kanallar tamamen birbirine dik kalırken, spektral olarak örtüşme sağlanmış olur. Her bir bant daha sonra, verileri frekans alanındaki dik bir şekilde kodlamak için OFDM sembollerini kullanır. Bu nedenle, bantlar frekans bakımından bağımsızdır ve birbirleriyle karışmazlar. Dijital dengeleme ve daha düşük bir veri hızı eşliğinde bile olsa koruma alanlarının kullanımı sayesinde basit ve optimum kod çözme mümkün olur.

Konvolüsyon kodları, Viterbi kodları ve blok kodlarıyla (Reed-Solomon kodları) birlikte kullanıldığında, bu tekniğin oldukça verimli olduğunu kanıtlanmıştır. Çok taşıyıcılı bu teknik sayesinde ses patlamasına (burst noise) karşı da sağlamlık elde edilmiş olur. Her taşıyıcı, diğer taşıyıcılardan bağımsız bir şekilde gürültüden etkilenmektedir. Tek taşıyıcılı haberleşme tekniklerinde gürültü diğer sembolleri de etkileyebilirken, OFDM tekniğinde bir taşıyıcıdaki sembol kayıpları diğer taşıyıcıları etkilemez. Her taşıyıcı fiziksel bağlantıların kalitesine ve en uygun modülasyon tekniklerine göre diğerlerinden bağımsız olarak kodlanabilir.

Her frekans alt bandı, iki ana bölümden oluşan OFDM çerçevelerini taşır:

- CP (Döngüsel Önek), verileri taşıyan parçanın geçici olarak sınırlandırılması için kullanılır.
- Veri çerçevesi, her biri 428 örnekten oluşan OFDM sembollerinden oluşur.

G3 OFDM bloğu tasarlanırken robust moda uygun olarak DBPSK tercih edilmiş olup yapılan modellemeler aşağıda açıklanmıştır.

5.2.1. DBPSK Modülasyon (Haritalama-Mapping)

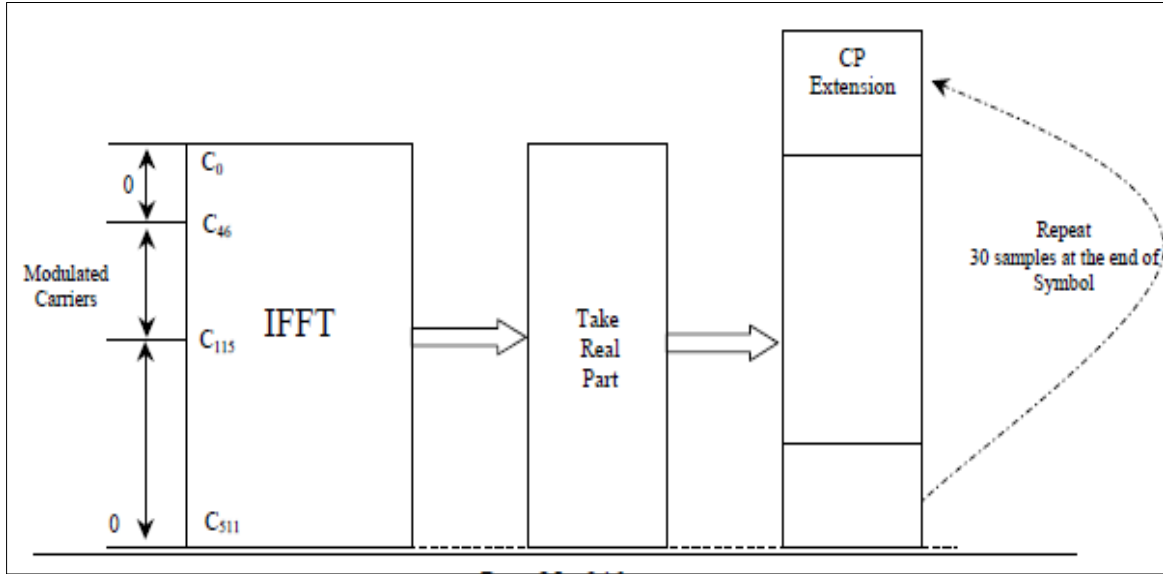
G3 protokolünde BPSK, DBPSK veya DQPSK gibi modülasyonlar uygulanabilmekle beraber, en uygun ve sağlam modülasyon, sistemin olumsuz koşullar altında çalışma yeteneğini geliştirmek için kapsamlı zaman ve frekans çeşitliliği sağlayan DBPSK şeklindedir. İleri hata düzeltme kodlamasında (FEC), iletişim paketindeki hem çerçeve kontrol bilgisine Süper Robust kodlama hem de reed-solomon ve konvolüsyonel kodlama uygulanır.

Mapping bloğu ayrıca iletilen sinyalin verilen Ton Haritasına ve Ton Maskesine uygun olmasını sağlamaktan da sorumludur. Ton Haritası ve Maske, MAC katmanının kavramlarıdır. Ton Maskesi, start, stop ve çentik frekanslarını tanımlayan, önceden tanımlanmış (statik) bir sistem çapında bir parametredir. Ton Haritası, kanal tahminine dayanarak, iki modem arasındaki belirli bir iletişim için kullanılacak taşıyıcıların bir listesini içeren uyarlamalı bir parametredir.

5.2.2. IFFT

Dalga formlarını, birleştirildiklerinde onu oluşturan sinüs fonksiyonlarına ayırmamızı sağlayan matematiksel bir yöntem olan fourier dönüşümleri sayesinde özellikle periyodik fiziksel olayların yapısını bileşenlerine ayırarak sinyalin analiz edilebilmesine mümkün olur.

Fourier dönüşümünün ters dönüşümü olan IFFT ile kesikli veya sürekli bir spektrum için bir fonksiyonu, verilen spektrum ile genlik için bir fonksiyona dönüştürülebilmektedir. OFDM sinyali IFFT kullanılarak üretilebilir. IFFT bloğu, giriş vektörünün 256-noktada IFFT'sini alır ve 30 döngüsel önek numunesi (cyclic prefix) tarafından önceden bekleyen ana 256 zaman-alan OFDM sembollerini üretir. Başka bir deyişle, son 30 örneği IFFT'nin çıktısında alır ve bunları sembolün önüne yerleştiririz. Giriş / Çıkış yapılandırması Şekil 5.7'de gösterildiği gibidir.



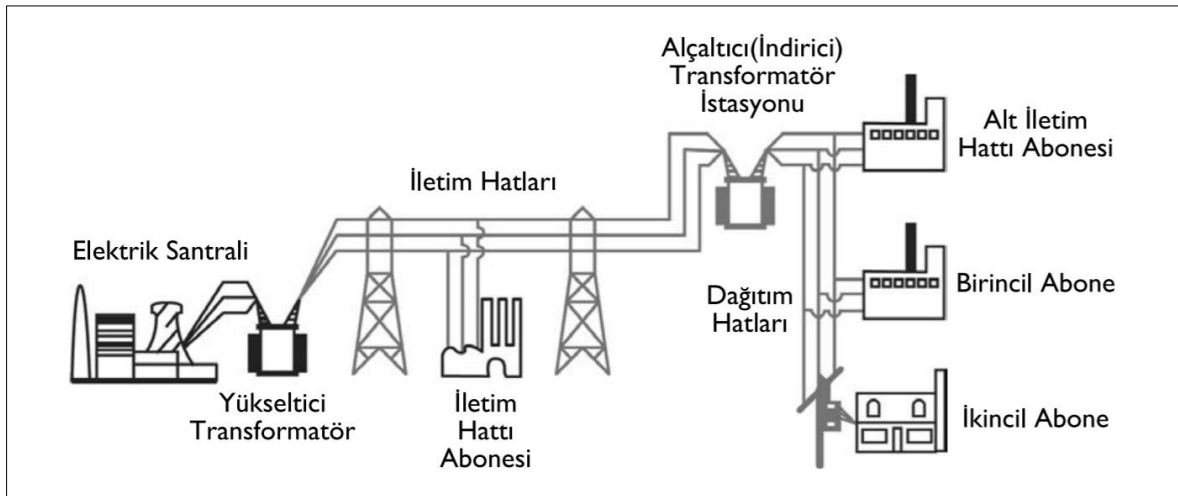
Şekil 5.7. OFDM IFFT bloğu [20]

5.2.3. Pencereleme (Windowing)

Veri sızıntısının tamamen önlenmesi mümkün olmasa da, bir FFT yapmadan önce pencereleme işlevleri uygulanarak kötü etkiler azaltılabilir. Pencereleme işlevlerini kullanarak, FFT'si alınan bir sinyalin spektral veri çıkarma özelliğini daha da artırmak mümkün olmaktadır. Verinin FFT'sinin alınması sırasında meydana gelen sızıntının etkilerini azaltmak için ham verilere pencereleme uygulanır. Bu amaçla, bant dışı emisyonunu ve spektral yan lobu azaltmak için, Yükseltilmiş Kosinüs filtre (raised cosine shaping) tüm veri sembollerine uygulanmaktadır. Sonrasında ardışık sembollerin kuyrukları ve başları üst üste bindirilerek eklenir. Sembolün her bir yanından 8 kuyruk ve 8 baş şeklindeki numunesi, bitişik sembollerin kuyruk ve baş numuneleri üst üste bindirilmektedir. $(n-1)$ 'inci sembolün 8 kuyruk örneği ile $(n+1)$ inci sembolün 8 baş örneği ile üst üste gelir. Son olarak, karşılık gelen örtüşen parçalar eklenerek son sembolün kuyruğu, üst üste bindirme yapılmadan gönderilir.

6. ENERJİ HATLARI

Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi elektrik veya güç şebekeleri diye adlandırılan sistemler; santrallerde su, rüzgâr, doğal gaz, kömür gibi kaynaklardan elde edilen enerjinin önce mekanik enerjiye ardından da jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek tüketicilere ulaştırılması amacıyla kurulan tesislerden meydana gelmektedir. Elektrik enerjisi terminallerde üretildikten sonra iletim ve dağıtım hattı ile tüketiciye ulaştırılmaktadır. Bugün kentlerde ve kırsalda her eve ulaştırılmış elektrik hatları ile birbirine bağlı devasa bir elektrik ağı mevcuttur. Elektrik üretim santralleri ile tüketim bölgeleri arasındaki mesafe genellikle birbirine uzaktır. Uzak mesafelere enerji iletilirken yüksek gerilimde enerji daha az kayba uğrayacağı için, güç transformatörleri yardımıyla elektriğin gerilimi yükseltilerek iletim sağlanır. Elektrik enerjisinin santrallerden yerleşim yerlerine iletimi için kurulan bu hatta iletim şebekesi adı verilir. Fabrikalarda, şehir içi ulaşım, aydınlatma ve sinyalizasyon sistemlerinde kullanılmak üzere; güvenlik ve kullanım açısından genelde şehirlerin dışında yer alan enterkonnekte şebekede yüksek gerilimli elektrik enerjisi 34,5 kV orta gerilim değerlerine düşürülür. Elektrik enerjisi ev ve işyerlerinde kullanılmak üzere genellikle özel kabinler içerisine yerleştirilen küçük trafolar yardımıyla alçak gerilim seviyelerine düşürülür. Bu değer ülkemizde ev ve ofislerde kullanım için 220 V ve 380 V olarak belirlenmiştir. Orta ve alçak gerilim hatlarının şehir içi elektrik enerjisinde kullanımı dağıtım şebekesini oluşturur [21]. Şekil 6.1’de elektrik iletim ve dağıtım sisteminin bir gösterimi bulunmaktadır.

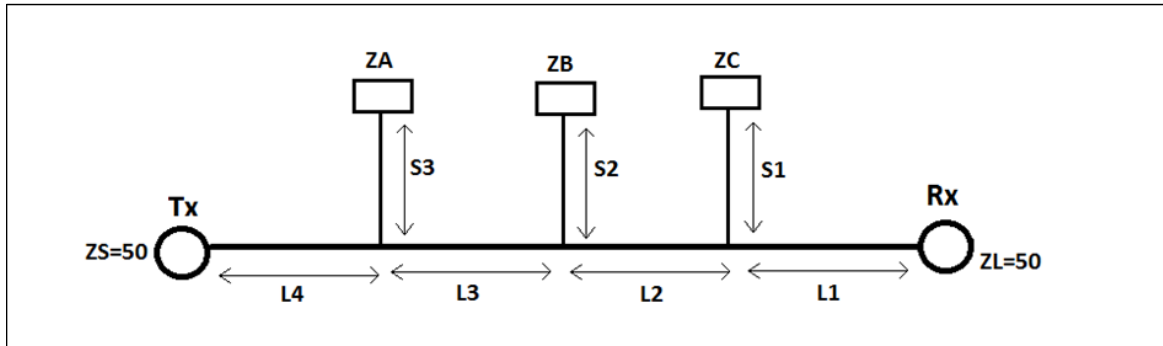


Şekil 6.1. Elektrik iletim ve dağıtım sistemi [21]

İletim ve dağıtım şebekeleri, dağıtım şekilleri yanında kullandıkları gerilim bakımından da sınıflandırılabilir. Bunlar:

- Alçak gerilimli şebekeler (AG şebekeleri) - 1 kV 'a kadar olan gerilim,
- Orta gerilimli şebekeler (OG şebekeleri) - 1 ila 35 kV arası gerilimler,
- Yüksek gerilimli şebekeler (YG şebekeleri) 35 kV 'dan 154 kV 'a kadar olan gerilimler,
- Çok yüksek gerilimli şebekeler (ÇYG şebekeleri) - 154 kV ' tan daha büyük gerilimler

Dağıtım trafolarından abonelere kadar olan elektrik dağıtım hatları alçak gerilim dağıtım sistemlerini oluştururlar. 1000 V'un altındaki gerilimi tanımlayan alçak gerilim şebekeleri abonelerde 220 V ve 380 V olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de alçak gerilim dağıtım sistemlerinde kullanılan mevcut kablolar: NYY 4x95 mm² tipi PVC kaplamalı dağıtım kabloları ve NYY 4x70 mm² tipi PVC kaplamalı bağlantı kabloları şeklindedir [22]. Bu kablolar üç faz bir toprak olmak üzere dört iletkenle meydana gelmektedir. Dört iletkenle meydana gelen kabloların modellenmesinin de buna uygun olarak "çok iletkenli iletim hattı" (multi-conductor transmission line) teorisine dayalı yapılması beklenir. Ancak, güç hattı haberleşmesinde tek faz ve bir nötr kullanılacağı için kablo modellenmesi yapılırken kablonun "iki iletkenli iletim hattı" (2-conductor transmission line) teorisine uygun olarak benzetilebilir [23]. Şekil 6.2'de tasarlanan PLC ağ yapısı tasvir edilmiştir. Ağ verici – alıcı arasına üç tane empedans üreten aygıt yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 6.2. Bir noktadan diğer noktaya tasarlanan üç yükten oluşan ağ topolojisi

6.1. Alçak Gerilim Güç Hattı Haberleşmesinde Kanal Modelleri

PLC kanal modeli için yaygın kabul edilmiş tek bir yöntem bulunmamaktadır. Bu sebeple gözlemlenmek istenen değerler ve araştırma türüne göre farklı seçimler yapılmaktadır. Elektrik hattı iletişimindeki ana teknik zorluklar arasında elektrik hattı kanalı, modellemesi çok zor olan çok sert ve gürültülü bir iletim ortamıdır. Güç hattı kanalı, hem frekans seçici hem de zamana göre değişkendir. Ayrıca renkli arka plan gürültüsü ve itici gürültü nedeniyle bozuk bir kanaldır. Ek olarak, şebekenin yapısı ülkeden ülkeye hatta aynı ülkede şehirden şehire farklılık göstermektedir. Aynısı iç mekân kablolama uygulamaları için de geçerlidir.

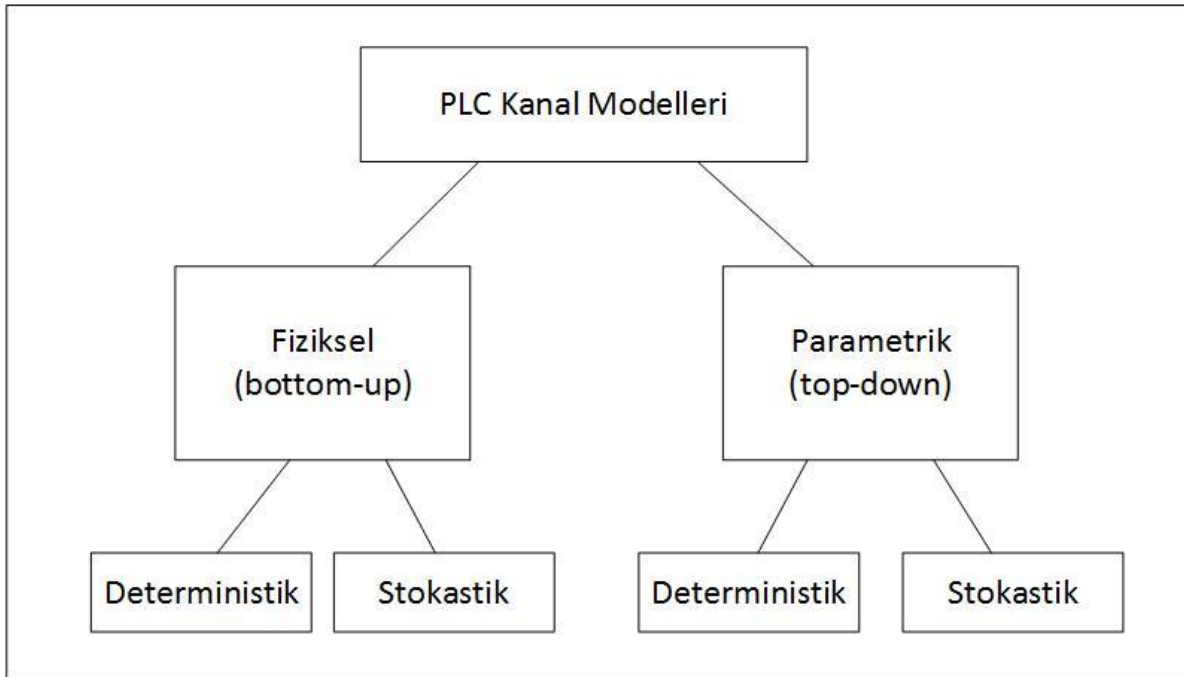
Enerji hattı transfer fonksiyonunu modellemenin zorluğundan dolayı, ilk modelleme girişimleri çoğunlukla kapsamlı ölçüm kampanyalarından elde edilen istatistiksel analizlere dayanıyordu. Daha yakın zamanlarda, deterministik yaklaşımlara teşebbüs eden makaleler ortaya çıkmıştır, bu nedenle iletişim sinyallerinin elektrik hatları üzerinden fiziksel yayılımının daha temel bir anlayışının ortaya çıktığını göstermektedir. Bu son deterministik yaklaşımların sonuçlarının, analitik yaklaşımların uygun görülmediği zamanlarda formüle edilen bazı varsayımların geçerliliğini gerçekten doğrulaması dikkat çekicidir. Güç hattı kabloları boyunca sinyal yayılımının çok yollu olması da ayrı bir zorluk olarak değerlendirilebilir.

Elektrik hattı kanalının bir diğer önemli özelliği zamana göre değişen davranışdır. Elektrik hattı kanalının kanal transfer fonksiyonu, topoloji değiştiğinde, yani cihazlar takılıp çıkarıldığında, açıldığında veya kapatıldığında aniden değişebilir. Bununla birlikte, güç hattı transfer fonksiyonu, ağın topolojisi ve buna bağlı yükün (cihazların) ani değişikliklere uğramasına bile zamanla değişen bir davranış sergiler. Özellikle, elektrik hattı kanalı kısa süreli bir değişkenlik gösterir, çünkü elektrikli cihazların yüksek frekans parametreleri, yük empedanslarının periyodik değişimlerinde çevrilebilecek olan ana gerilimin ani genliğine bağlıdır. Ek olarak, cihazlar tarafından kanala enjekte edilen ses de şebeke geriliminin ani genliğine bağlıdır. Bu nedenle, kanalın zaman seçiciliği ve gürültüyle ilgili döngüsel bir davranış ortaya çıkar. Periyot tipik olarak şebeke periyodunun yarısı kadardır.

Hem zaman hem de frekans alanındaki elektrik hattı kanalları için bir Lineer Zaman Değişimi (LTV) sistemi bulunur. Evrişim operatörü matris formunda ifade edilir ve hem doğrusal zamanla değişmeyen (LTI) hem de lineer zamanla değişen (LTV) durumları

dikkate alınır. LTI durumunda, kanal olağan Toeplitz matrisleri tarafından modellenirken, LTV durumunda, kanal özel bantlı matrisler tarafından modellenir. Dikkat edilmesi gereken en önemli husus, ya çok yollu yayılmaya dayanan geleneksel kanal modellerinin zaman seçiciliğini yakalayamamasıdır.

PLC modeller şekil 6.3'te gösterildiği gibi fiziksel (bottom up) ve parametrik (top down) modeller olarak iki ana grupta toplanabilmektedir. Bu modeller de kendi içinde ölçüm tabanlı çok yollu (multipath) modelleri ve iletim hattı teorisine (transmission line theory - TL theory) dayalı deterministik modeller olarak gruplandırılabilir [24]. Bottom up yaklaşımı, frekans kısıtlamaları olmadan ağı tüm topolojik bilgilerini kullandığından, fiziksel gerçeklikle ile sağlam bir örtüşme sağlamaktadır. Bottom up yaklaşımı, TL teorisini kullanarak kanal aktarım işlevini yönetir.



Şekil 6.3. PLC kanal modeli

Birkaç grup, ilgili istatistiksel davranışı, fiziksel modellerin ve ölçümlerden, diğer gruplar ise kesin kanal modellerini temel alan belirleyici bir yaklaşımı izlemektedir. Deterministik modeller bağlantı topolojisi ve kablo modelleri hakkında ayrıntılı bilgi gerektirir, ancak ölçüm gerektirmez. İstatistiksel modeller ise, ölçüm sonuçlarına uyularak veya ağ topolojisinin istatistiksel bir açıklaması ile elde edilebilir.

Son sonuçlar, eğer uygun şekilde modellenirse, güç hattı kanalı transfer fonksiyonunun, genel olarak inanıldığından daha belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu, sağlam modem tasarımı ve sistem optimizasyonu için kullanılabilir.

6.2. Linear Zamanla Değişen Kanal Modeli (LPTV)

PLC hattındaki yüklerin kapalı/açık olma durumları ve hattaki yüklerin AC deviriyle zamana bağlı değişmesi, PLC kanalının zamanla değişken bir yapıya dönüşmesini sağlar. Alçak gerilim ve dar bant PLC için de bu durumu inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur. 3-500 kHz aralığında etkisi olmasına karşın CENELEC A bandının 35-90 kHz aralığında empedans etkileri kanal frekans cevabına daha az etki etmesi ve ihmal edilebilir olması sebebiyle çalışmamızda kanaldaki yüklerin zaman değişkenliği yönü çalışılmamıştır. Buna karşın, modelde hattaki yüklerin kapalı / açık moduna uygun olarak düşük empedans (~ 1 ohm) değerleri alınarak analiz edilmesi de mümkündür [25].

Hattaki yüklerin frekans seçici olması durumu da yükler eşitlik 6.11'deki gibi uygulanabilir. Eşitlikteki ω açısal frekansı ve ω_0 kritik açısal hızı ifade ederken Q ise kalite faktörüne (quality factor) karşılık gelmektedir. Hattaki yükün zamanla değişken olması için yük eşitlik 6.12'deki gibi modellenir. Bu eşitlikte $Z_B(\omega)$ yine frekans seçici bir yüküdür ve Z_A (50 ohm) offset empedansıdır. T_0 , AC akım periyodu ve Φ ise açılardır ($0-\pi$ aralığında).

$$Z(\omega) = \frac{R}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (6.11)$$

$$Z(\omega, t) = Z_A(\omega) + Z_B(\omega) \left| \sin \left(\frac{2\pi}{T_0} t \right) + \Phi \right| ; \quad 0 \leq t \leq T_0 \quad (6.12)$$

Modellenen MATLAB kodunda kanaldaki yüklerin sabit alınmasına (5-50-100 ohm) karşın; frekans seçici ve zamanla değişken özellikli empedanslar üretilerek de sonuç alınması mümkündür.

6.3. İletim Hattı Teorisine Dayalı Alçak Gerilim Güç Hattı Kanal Modeli

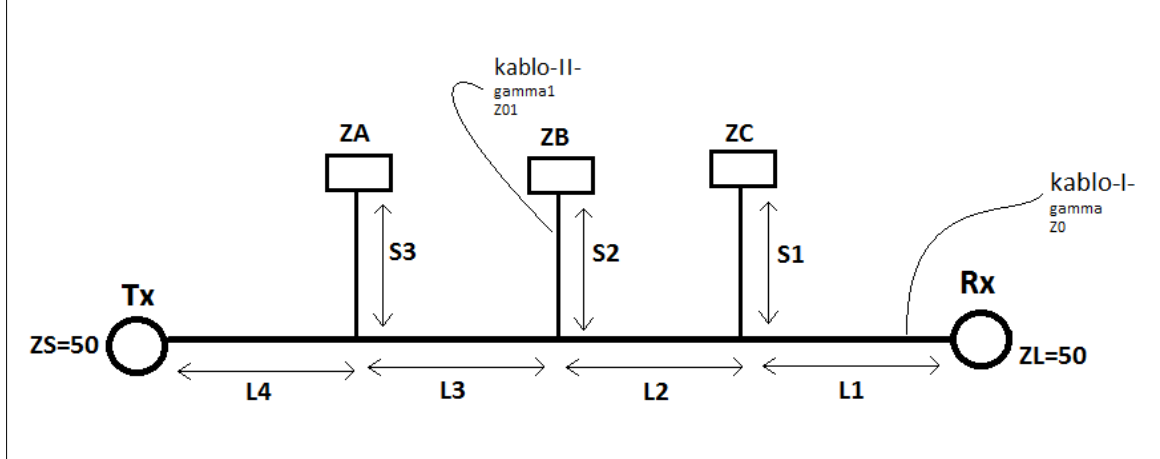
Kablo karakteristiği, hattın kablo uzunluğu ve hattaki empedanslara bağlı deterministik fiziksel PLC kanal modeli geliştirilirken 2-port ABCD ağ modeli ve voltaj oran yaklaşımı olarak yaygın iki yöntem literatürde mevcuttur. Her iki yöntemde de kanal giriş empedanslarının hesaplamasına bağlı frekans cevabı alınır. Daha öncesinde bahsedildiği gibi alçak gerilim kabloları içinde 3 ya da 4 iletken kabloya sahip olmasına karşın haberleşme sadece bir faz ve bir nötr iletkenleri yardımıyla yapılacağı için PLC haberleşme kanalı 2-iletkenli RLGC iletim hattı olarak tasarlamak mümkündür [26]. Güç hattı kanal modellemesinde R, L, C ve G sırasıyla kablonun her bir metreye düşen direncini, indüktansını, kapasitansını ve iletkenliğini ifade eder. Matlab’da güç hattı kanal modeli geliştirilirken kablo karakteristiği için kaynak [12]’de yer alan kablo türlerinden Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi faydalanılmıştır.

Çizelge 6.1. Bina içi birim kablo karakteristiği (_/m) [10]

Kablo	H07V-U	H07V-U
Kesit alanı (mm ²)	1.5	2.5
ϵ_{eq}	1.45	1.52
C (pF/m)	15	17.5
L (µH/m)	1.08	0.96
R ₁	1.2×10^{-4}	9.34×10^{-5}
G ₁	30.9	34.7
$R=R_1\sqrt{f} \text{ (}\Omega/\text{m)}, G=2 \pi f l G_1 10^{-14} \text{ (S/m)}$		

Şekil 6.2’de tasarlanan topolojide alıcı ve verici arasındaki hat kablosu ‘kablo-I’, hattaki üç dallanmanın kabloları ise ‘kablo-II’olarak adlandırılmıştır. Kablo karakteristikleri için Çizelge 6.1’den faydalanılmıştır. Buna göre kablo-I için 2.5 mm² kesitli kablo ve kablo-II için 1.5 mm² kesitli kablo seçilmiştir. MATLAB’da modellenen güç hattı haberleşmesi kanal

topolojisi Şekil 6.4'te gösterilmektedir. Alıcı-verici hattındaki kablo ile haberleşme hattına bağlı olarak enerji harcayan elektronik cihazlarının kabloları için iki farklı kablo kesitinin seçilmesinin sebebi gerçek uygulamalara daha yakın bir tasarım yapılmasının amaçlanmasıdır.

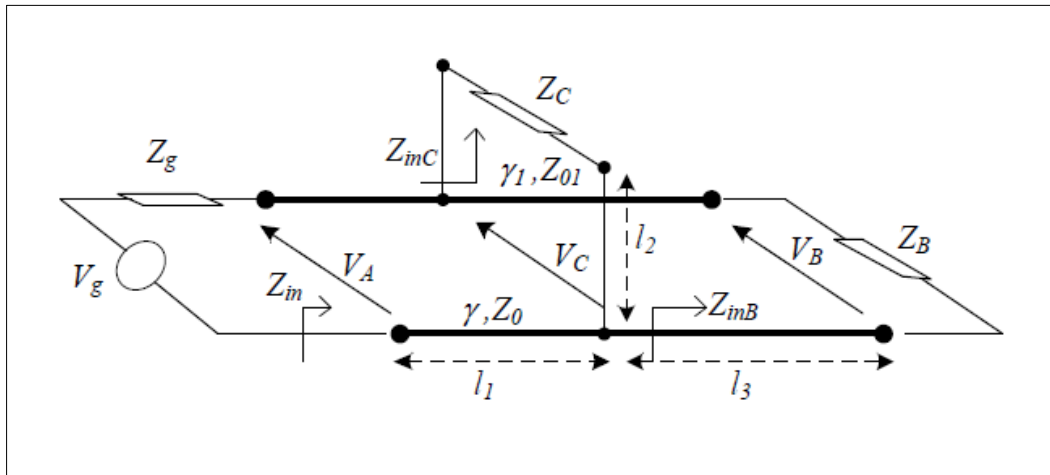


Şekil 6.4. MATLAB'da modellenen güç hattı haberleşmesi kanal topolojisi

MATLAB'da geliştirilen kanal modelinde voltaj oran yaklaşımı tercih edilmiş olup [27], kablo karakteristiğine göre yayılma sabiti (Propagation constant - γ) ve karakteristik empedans (Characteristic impedance Z_0) eşitlik (6.1.) ve (6.2.)'de gösterildiği gibidir.

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (6.1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (6.2)$$



Şekil 6.5. Tek dallanmalı ağ parametrisasyonu

Tek dallanmanın olduğu şekil 6.5'teki basit ağda; Z_{in} (giriş empedansları) hesapları Eşitlik 6.5, 6.6, ve 6.7'deki gibidir. Kanalin frekans cevabı Eşitlik 6.3'te gösterildiği gibi elementeri frekans cevaplarının çarpımıyla elde edilmektedir. Elementeri frekans cevabı ise Eşitlik 6.4'te verildiği gibi voltaj oran yaklaşımı ile bulunmaktadır. Giriş empedanslarının bulunmasının ardından kanaldaki dallanma ve kablo farklılıklarından kaynaklanan yansıma katsayıları Eşitlik 6.8'deki gibi hesaplanır. Voltaj oranlarının Eşitlik 6.9 ve 6.10'daki gibi hesaplanmasının ardından basit kanal frekans cevabı Eşitlik 6.3'teki gibi hesaplanabilir. Birden fazla dallanmalar için işlemler yine aynı mantıkla gerçekleştirilir. Buradan anlaşılacağı gibi hattaki dallanmalar yansıma katsayılarıyla frekans cevabına etki eder.

$$H(f) = \prod_n H_e(f) \quad (6.3)$$

$$H_e(f) = \frac{V_B}{V_C} \times \frac{V_C}{V_A} \times \frac{V_A}{V_G} \quad (6.4)$$

$$Z_{inB} = Z_0 \frac{Z_B + Z_0 \tanh(\gamma l_3)}{Z_0 + Z_B \tanh(\gamma l_3)} \quad (6.5)$$

$$Z_{inC} = Z_{01} \frac{Z_C + Z_{01} \tanh(\gamma l_2)}{Z_0 + Z_C \tanh(\gamma l_2)} \quad (6.6)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(Z_{inB} // Z_{inC}) + Z_0 \tanh(\gamma l_1)}{Z_0 + (Z_{inB} // Z_{inC}) \tanh(\gamma l_3)} \quad (6.7)$$

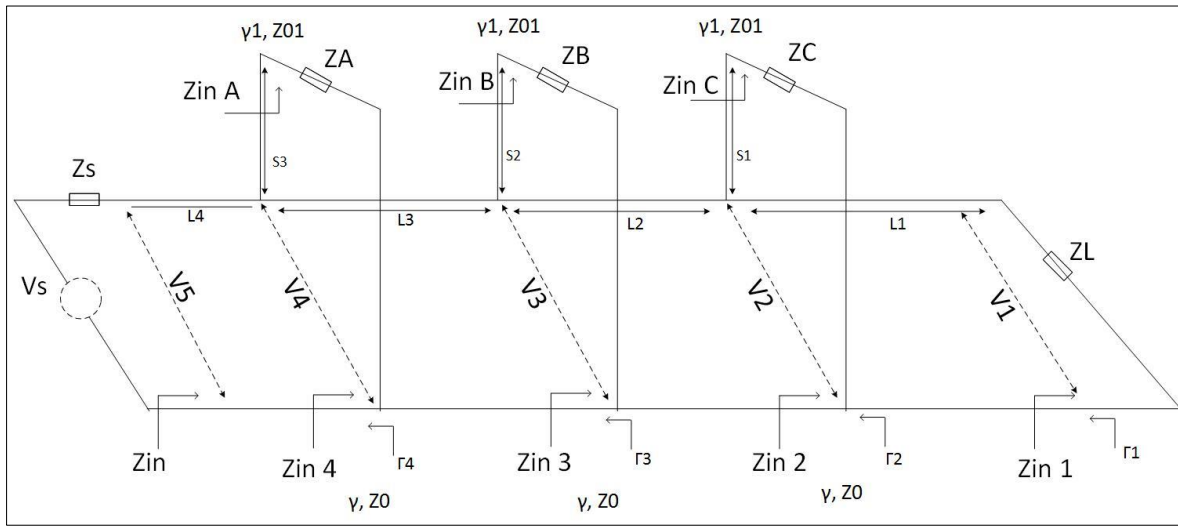
$$\Gamma_1 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad \Gamma_2 = \frac{(Z_{inB} // Z_{inC}) - Z_0}{(Z_{inB} // Z_{inC}) + Z_0} \quad (6.8)$$

$$\frac{V_B}{V_C} = \frac{(1 + \Gamma_1) \exp(-\gamma l_1)}{1 + \Gamma_1 \exp(-\gamma l_1)} \quad \text{ve} \quad \frac{V_C}{V_A} = \frac{(1 + \Gamma_2) \exp(-\gamma l_2)}{1 + \Gamma_2 \exp(-\gamma l_2)} \quad (6.9)$$

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} \quad (6.10)$$

Şekil 6.3'te tasarlanan güç hattı kanal modeli Şekil 6.5'te belirtildiği gibi parametrize edilmiş olup, PLC voltaj oran yaklaşımı (voltage ratio approach – VRA) yöntemiyle

MATLAB’da oluşturulmuştur. Modelde L1, L2, L3, L4 uzunlukları eşit ve 25’er metre; S1, S2, S3 uzunlukları eşit ve 10’ar metre kablo-I- için tablo 2’deki 2.5 mm^2 kablusunun RLGC değerleri ve kablo-II- için 1.5 mm^2 ’lik kablo değerleri alınmış ve $Z_A=5 \text{ ohm}$, $Z_B=50 \text{ ohm}$, $Z_C=100 \text{ ohm}$ olarak kullanılmıştır. Çalışmada 3 dallanma uygulandığı için Şekil 6.6’ya uygun olarak matematiksel hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamaların formülleri Eşitlik 6.11 ile Eşitlik 6.27 arasında sunulmuştur. Kanalin 1-500 kHz (dar bant) ve 35-90 kHz (CENELEC A- PLC) aralıklarındaki kanal frekans cevabı sırasıyla Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmiştir. Kanalin darbe cevabı (impulse response) ise Şekil 6.9’deki gibi gözlemlenmiştir.



Şekil 6.6. Modellenen ağ parametrisasyonu

$$H_e(f) = \frac{V_{RX}}{V_{TX}} = \frac{V_1}{V_2} \times \frac{V_2}{V_3} \times \frac{V_3}{V_4} \times \frac{V_4}{V_5} \times \frac{V_5}{V_G} \quad (6.11)$$

$$Z_{in1} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma L_1)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma L_1)} \quad (6.12)$$

$$Z_{inC} = Z_{01} \frac{Z_C + Z_{01} \tanh(\gamma_1 S_1)}{Z_{01} + Z_C \tanh(\gamma_1 S_1)} \quad (6.13)$$

$$Z_{in2} = Z_0 \frac{(Z_{in1} // Z_{inC}) + Z_0 \tanh(\gamma L_2)}{Z_0 + (Z_{in1} // Z_{inC}) \tanh(\gamma L_2)} \quad (6.14)$$

$$Z_{inB} = Z_{01} \frac{Z_B + Z_{01} \tanh(\gamma_1 S_2)}{Z_{01} + Z_B \tanh(\gamma_1 S_2)} \quad (6.15)$$

$$Z_{in3} = Z_0 \frac{(Z_{in2} // Z_{inB}) + Z_0 \tanh(\gamma L_3)}{Z_0 + (Z_{in2} // Z_{inB}) \tanh(\gamma L_3)} \quad (6.16)$$

$$Z_{inA} = Z_{01} \frac{Z_A + Z_{01} \tanh(\gamma_1 S_3)}{Z_{01} + Z_A \tanh(\gamma_1 S_3)} \quad (6.17)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(Z_{inA} // Z_{in3}) + Z_0 \tanh(\gamma L_4)}{Z_0 + (Z_{inA} // Z_{in3}) \tanh(\gamma L_4)} \quad (6.18)$$

$$\Gamma_1 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6.19)$$

$$\Gamma_2 = \frac{(Z_{in1} // Z_{inC}) - Z_0}{(Z_{in1} // Z_{inC}) + Z_0} \quad (6.20)$$

$$\Gamma_3 = \frac{(Z_{in2} // Z_{inB}) - Z_0}{(Z_{in2} // Z_{inB}) + Z_0} \quad (6.21)$$

$$\Gamma_4 = \frac{(Z_{in3} // Z_{inA}) - Z_0}{(Z_{in3} // Z_{inA}) + Z_0} \quad (6.22)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{(1 + \Gamma_1) \exp(-\gamma L_1)}{1 + \Gamma_1 \exp(-\gamma L_1)} \quad (6.23)$$

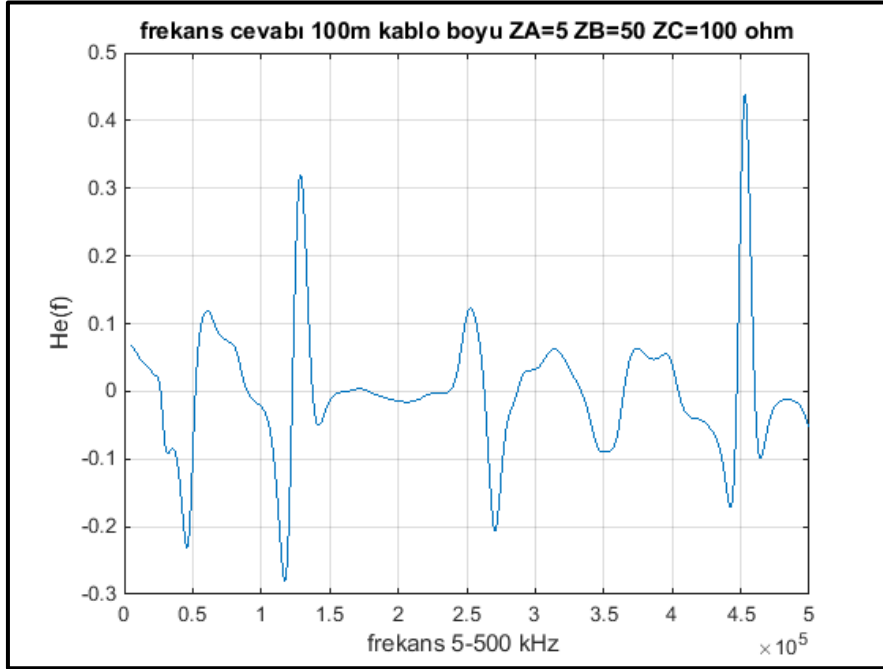
$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{(1 + \Gamma_2) \exp(-\gamma L_2)}{1 + \Gamma_2 \exp(-\gamma L_2)} \quad (6.24)$$

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{(1 + \Gamma_3) \exp(-\gamma L_3)}{1 + \Gamma_3 \exp(-\gamma L_3)} \quad (6.25)$$

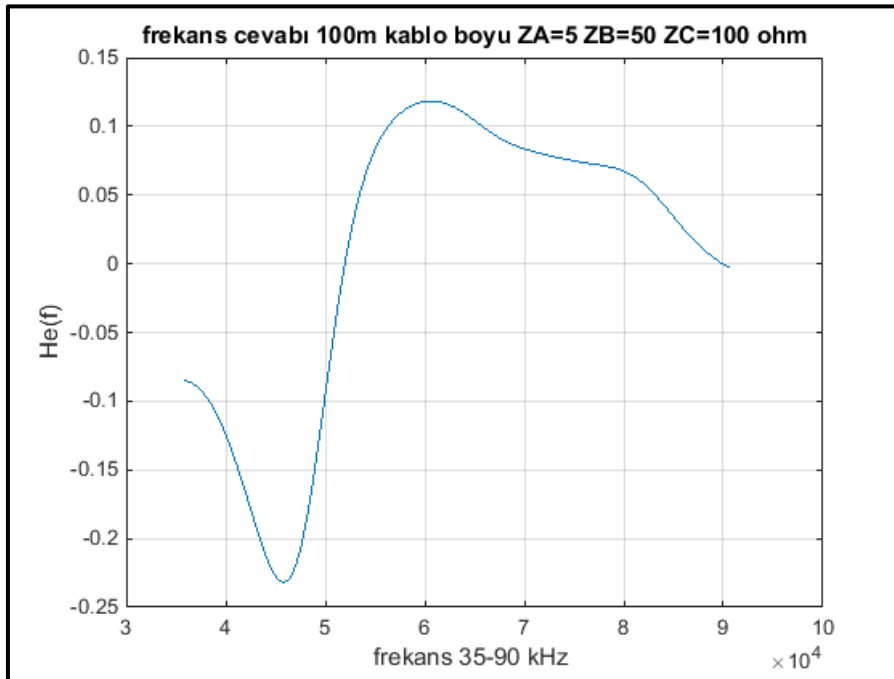
$$\frac{V_4}{V_5} = \frac{(1 + \Gamma_4) \exp(-\gamma L_4)}{1 + \Gamma_4 \exp(-\gamma L_4)} \quad (6.26)$$

$$\frac{V_5}{V_g} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_g} \quad (6.27)$$

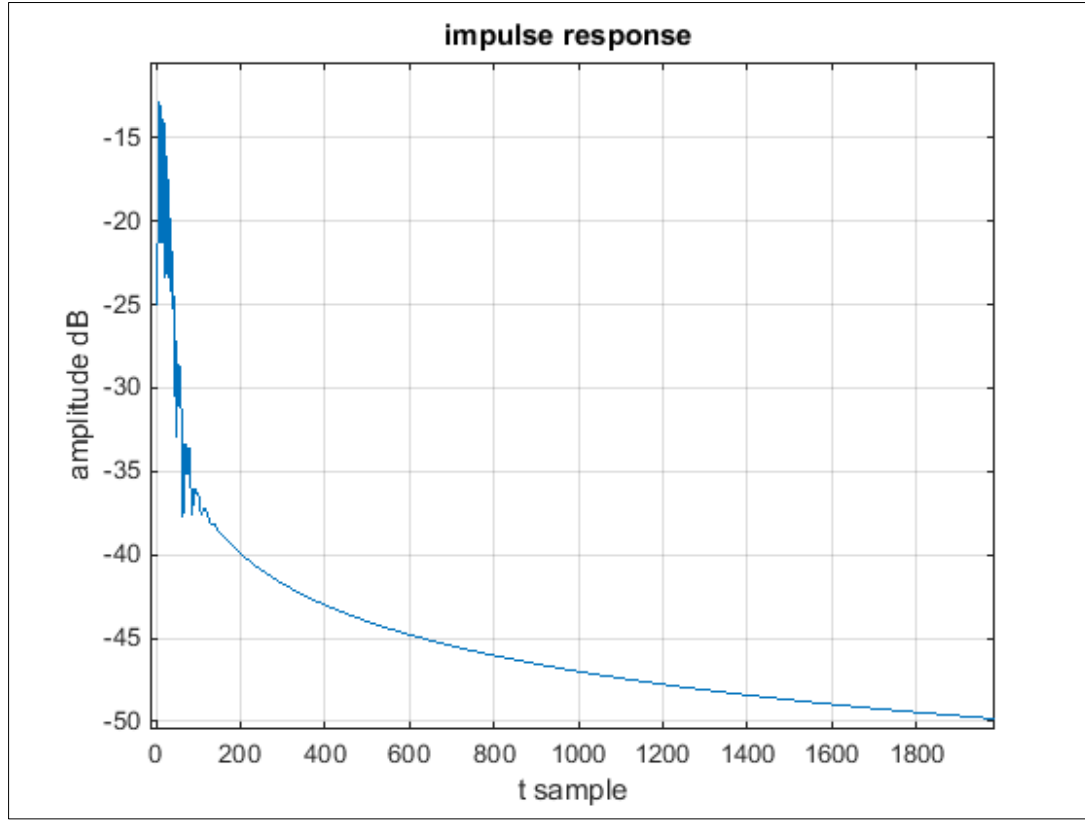
Şekil 6.7’de görülebileceği gibi 3-500 kHz bandında PLC kanalı frekans seçici bir yapıya sahiptir. G3 PLC’de CENELEC A bandında çalışıldığı için 35-90 kHz aralığında kanal frekans cevabı ise Şekil 6.8’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 6.7. MATLAB’da modellenen PLC kanalının dar bantta (5-500 KHz) frekans cevabı



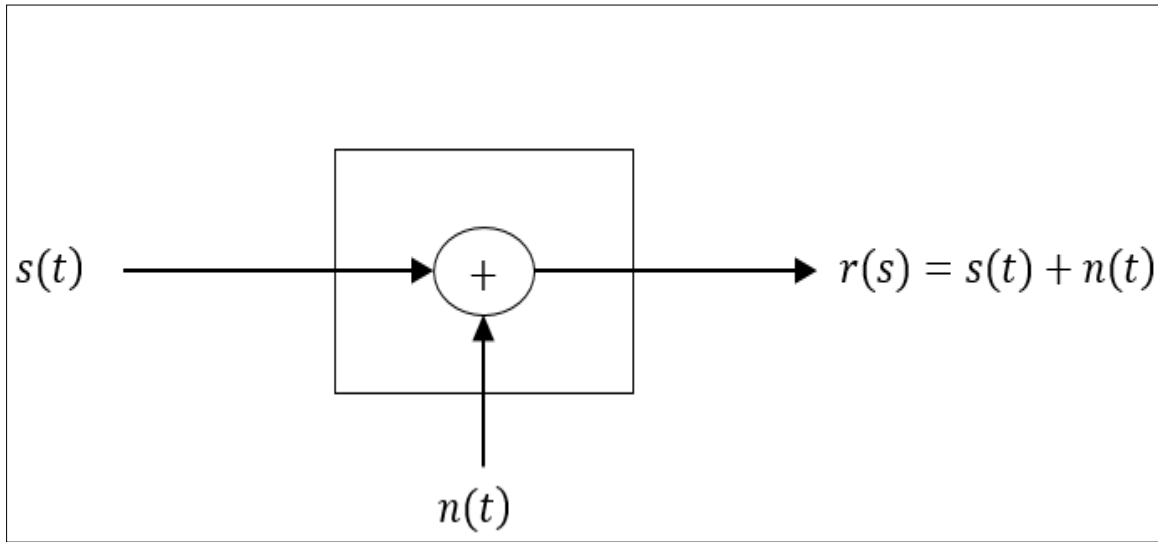
Şekil 6.8. MATLAB’da modellenen PLC kanalının 35.9-90.6 KHz frekans aralığında frekans cevabı



Şekil 6.9. MATLAB’da modellenen kanalın darbe cevabı

7. GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİNDE GÜRÜLTÜ

Herhangi bir iletişim sisteminde, sinyalin haberleşme kanalında iletimi sırasında veya sinyali alırken, bazı istenmeyen sinyaller ilettime girer, bu da iletişimin güvenilirliğini ve kalitesini düşüren bir etmendir. Bu doğrultuda gürültünün en genel tanımı; bir haberleşme sisteminde ilettime giren istenmeyen sinyallerin bütünüdür. Bir diğer ifade ile gürültü; doğal ve bazen insan yapımı kaynaklardan doğan istenmeyen veya rahatsız edici enerjinin toplamıdır. Kablolu ve kablosuz her haberleşme sisteminde kanalda muhakkak çevresel etkilerden kaynaklı gürültü bulunmaktadır. Fiziksel olarak gürültünün sebebi, iletişim sisteminin alıcısındaki elektronik bileşenlerden ve yükselticilerden ortaya çıkabilir. Şekil 7.1’de basitçe sisteme giren sinyale gürültünün eklenmesi gösterilmiştir.

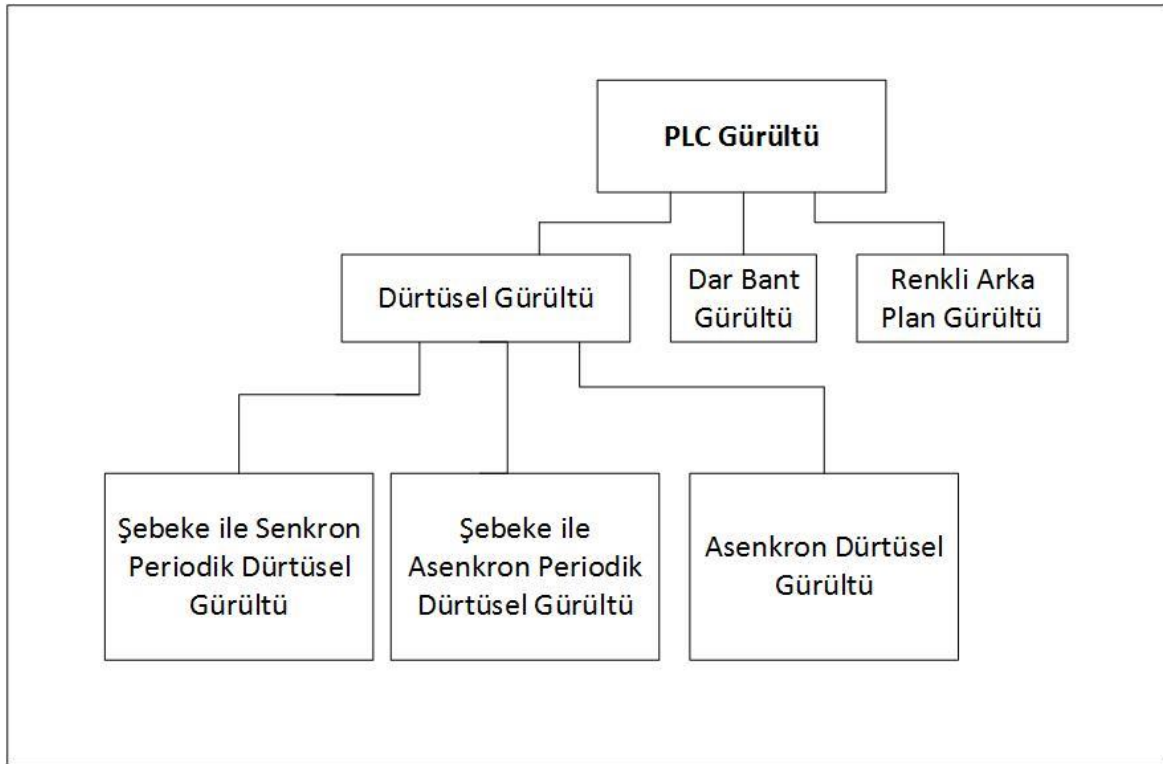


Şekil 7.1. Haberleşme sisteminde sinyale gürültü ekleme

Eğer gürültü öncelikle elektronik bileşenler ve amplifikatörler tarafından alıcıda verilirse, termal gürültü olarak karakterize edilebilir. Bu gürültü türü istatistiksel olarak Gauss gürültüsü olarak nitelendirilir. Dolayısıyla, kanal için ortaya çıkan matematiksel modele genellikle ‘Eklenen Gauss Gürültü Kanalı’ (Additive Gaussian Noise-AGN) denir. Bu kanal modeli iletişim sistemlerinin analiz ve tasarımında kullanılan en yaygın kanal modelidir [27]. Sinyal kanal üzerinden iletimde zayıflama geçirdiğinde, alınan sinyal Eşitlik 7.1’de gösterildiği gibidir. Bu formülde a ile ifade edilen sönümlenme (zayıflama) faktörüdür.

$$r(t) = as(t) + n(t) \quad (7.1)$$

PLC kanalı üzerinden aktarılan sinyal, PLC kanal yapısından kaynaklı olarak, alıcıda ciddi düşüşe uğrar ve diğer birçok haberleşme kanalının aksine, enerji hatları Toplam Beyaz Gauss Gürültülü (AWGN) kanal olarak tanımlanamaz. Noktadan-noktaya PLC iletişim kanalı yol kayıplı, zamanla değişken, frekans seçici ve çok yollu sönümlemeli bir kanal olup 6 farklı türde beyaz ve beyaz olmayan gürültü eklemeli olarak mevcuttur. Güç hattı tarafından temsil edilen gürültü daha karmaşıktır ve Şekil 7.2’de gösterildiği üzere dürtüsel, dar bant ve arka plan gürültü olmak üzere üç ana tür altında incelenebilir. Ayrıca dürtüsel gürültü kendi içinde şebeke ile senkron periodik, şebeke ile asenkron periodik ve son olarak da asenkron gürültü olarak üç alt gürültüden meydana gelmektedir [28].



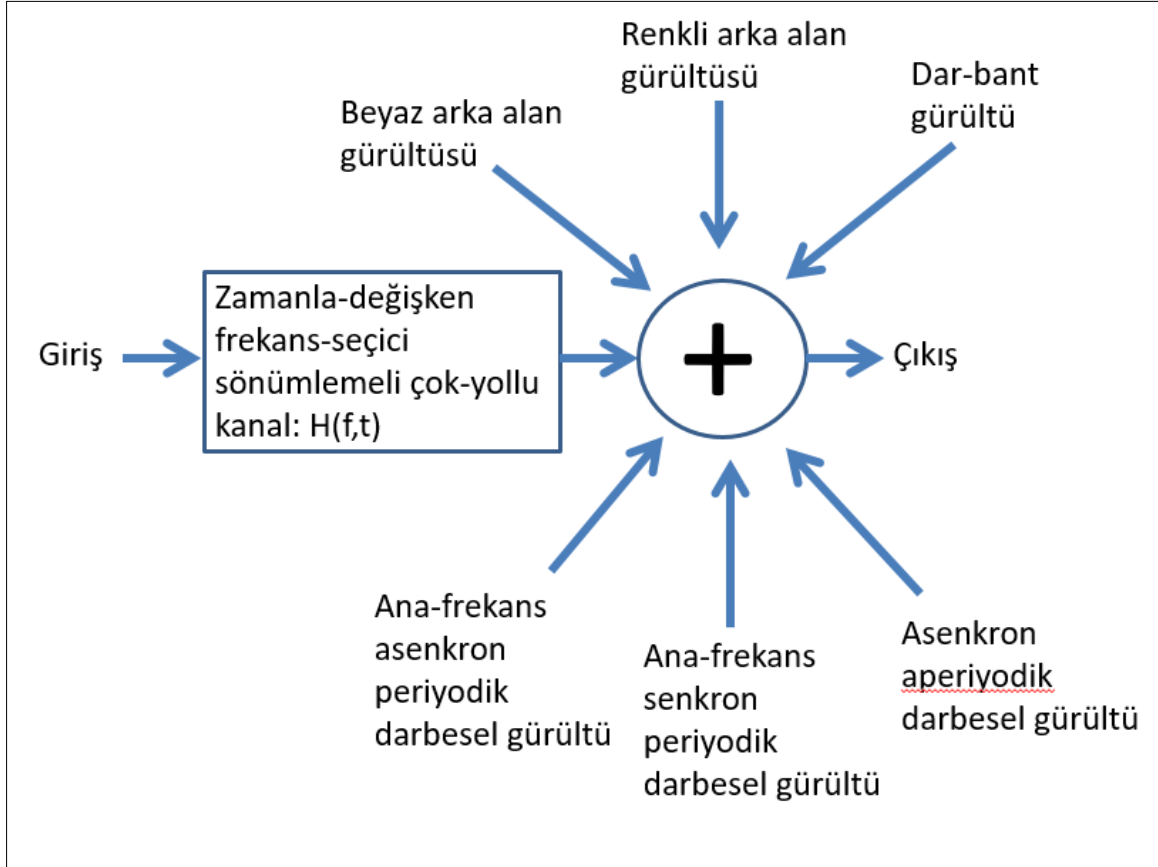
Şekil 7.2. PLC gürültü çeşitleri ve sınıflandırması

- Beyaz arka alan gürültüsü: Haberleşme almacı önyüz termal beyaz gürültüsüdür.
- Şebeke ile Senkron Periodik Dürtüsel Gürültü (periodic impulsive noise synchronous to the mains): Bu tür gürültü tekrarlama periyodu 50 Hz veya 100 Hz olup ana güç hattı frekansı ile senkronudur. Genellikle ana güç hattı üzerindeki güç kaynakları ve güç dönüştürücüleri nedeniyle oluşur. Şebekeye bağlı çoğunlukla doğrultucu diyotlar gibi yarı iletken bileşenlerin değiştirilmesi sonucu ortaya çıkar. Bu sınıftaki gürültünün tipik nedeni silikon kontrollü bir rektifiye veya tiristör tabanlı ışık dimmerlerdir.

- Şebeke ile Asenkron Periyodik Dürtüsel Gürültü (periodic impulsive noise asynchronous to the mains): Bu tür gürültü genellikle 50-200 Khz tekrarlama frekansına sahip periyodik Dirac darbeler şeklinde kendini gösterir. Genellikle anahtarlama güç kaynakları bu tür gürültüye neden olur. 50 ve 200 kHz arasında tekrarlama oranı olan ve çoğunlukla anahtarlama güç kaynaklarından kaynaklanan dürtüsel bir gürültü olarak tanımlanır.
- Asenkron Dürtüsel Gürültü (asynchronous impulsive noise): Asenkron darbesel gürültü genellikle PLC Ağlarında geçici anahtarlama oluşumları nedeniyle meydana gelir ve PSD'si diğer gürültülerin yaklaşık 50 dB üzerinde olup büyük oranda PLC kanallarındaki dijital haberleşme hatalarının oluşumunun nedenidir. Asenkron dürtüsel gürültü, rastgele zamanlarda geçici anahtarlamalardan kaynaklanan, çoğunlukla uzun (saniyeden fazla) aralıklarla oluşan yüksek genlikli dürtülerden oluşur. PSD arka plan gürültüsünün üstünde 50 dB değerlerine ulaşabilir. Bu tür gürültüye örnek olarak ısıtıcı, termostat gibi araçların şebeke AC akımını açtığına ya da kestiğinde ortaya çıkması verilebilir.
- Renkli Arka Plan Gürültüsü (colored background noise): PLC kanalındaki bu gürültü tipinin PSD'si göreceli olarak düşüktür ve frekansla azalır. Bu gürültü çeşidi birçok daha düşük güce sahip gürültü tipinin üst üste binmesiyle oluşur ve istatistiksel parametreleri zamanla değişir. Düşük güçlü çok sayıda gürültü kaynağının üst üste binmesinden meydana gelmektedir. Arka plan Gürültüsü ile alıcıların ön uç amplifikatörlerinde meydana gelen termik gürültünün birleşiminden oluşur. Genellikle artan frekans ile birlikte bir bozucu güç spektral yoğunluğu (PSD) sergiler.
- Dar Bant Gürültüsü (narrowband noise): Bu tür gürültü modüleli-genliğe sahip biçimde sinusoidal formda bulunur. Gönderilen sinyalin birçok alt bandı düşük genliğe sahip olması sebebiyle bu tür gürültüden etkilenir. Şebekedeki radyo sinyalleri ve elektrikli cihazlar ile bağlı sinüzoidler PLC kanallarını dar bant gürültüsü olarak kirlitebilir. NB-PLC frekans aralığındaki yayın sinyallerinin tipik olarak genlik modülasyonlu sinüs eğrilerinden meydana gelmektedir.

OFDM, dar bant gürültüsünün kötü etkilerini önlemekte başarılı iken, haberleşmede birkaç frekans yaydığından dürtü gürültüsünü artırıcı yönde kötü bir etkisi de bulunmaktadır. Bu durumun olumsuz etkilerini azaltmak için gürültünün korelasyonu kullanılabilir. Darbe gürültüsü birkaç frekansa yayılır ve birkaç OFDM alıcı frekansının (sadece iki veya üç) veya çapraz bantlı gürültü önleyici ile bantlar arasındaki bağlantı demodülasyonu yardımıyla

gürültü azaltılır. Dar darbeler için, zaman içerisinde etki gürültüsü daha kolay bir şekilde ele alındığında ileriye doğru hata düzeltme ve hata bitlerini yok saymak için kullanılabilir. Şekil 7.3'te PLC zamanla değişen ve frekans seçici iletişim kanalına eklenen gürültü türleri görülmektedir.



Şekil 7.3. PLC iletişim kanal modeli ve gürültü türleri

Renkli arka plan ile dar-bant gürültü değerleri nispeten daha uzun süre (saniyeler, dakikalar ve hatta bazen saatler) sabit kalır. Bunların aksine, dürtüsel gürültü çeşitleri milisaniye ve mikrosaniye zaman aralığında oluşan ve zamanla değişen bir yapıya sahiptir. Bu yönüyle PLC gürültüsü için belli dönemli-durağan (cyclostationary) modeller geliştirilmiştir. Dar bant PLC sistemleri genellikle düşük hızlı uygulamalar için kullanılmasına rağmen, düşük frekanslarda mevcut yüksek gürültü seviyeleri nedeniyle güvenilir olmadığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, dar bantlı PLC sistemlerinin düşük hız ve düşük kalitesi çözümlenebilir bir işlemdir. Bu çalışmada modellenen PLC kanalında, implementasyonu daha uygun olduğu için Katayama ACGN modeli tercih edilmiştir.

7.1. Döngüsel Durağan Gauss Gürültü Modeli (Cyclostationary Gaussian Noise)

Elektrik hatlarının en zorlayıcı özelliklerinden biri güçlü ve zamanla değişen beyaz olmayan gürültü içermesidir. Bir çıkıştaki güç hattı gürültüsü, güç hattı ağına bağlı cihazlardan hatlara üretilen ve yayılan gürültü dalga formlarının toplamıdır. Geleneksel iletişim sistemlerinin tasarımında ve analizinde, genellikle Eklenir Beyaz Gauss Gürültü (AWGN) modeli kullanılmakla birlikte, PLC sistemlerinde insan yapımı gürültünün istatistiksel davranışı, sabit AWGN'den oldukça farklıdır. Enerji hattı gürültüsü ile ilgili birçok çalışmada, gürültünün sabit olduğu varsayılmakta olup, bu nedenle sadece zaman ortalamalı güç spektrumu yoğunlukları ve zamandan bağımsız yoğunluk dağılımları dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, güç hatlarındaki gürültünün özellikleri sabit değildir. Güç hattı gürültüsü beyaz değildir ve karmaşık bir güç yoğunluğu spektrumuna (PDS) sahiptir. PLC kanal modellemesinde gürültü olarak önceki bölümde bahsedilen gürültü çeşitlerini bir arada modelleyen ve Eklenir Döngüsel Durağan Gauss Gürültü (ACGN - Additive Cyclostationary Gaussian Noise) olarak çalışılan gürültü modeli KATAYAMA ile çalışılmıştır [29]. Eşitlik 7.1'de gürültü varyansı formülize edilmiştir.

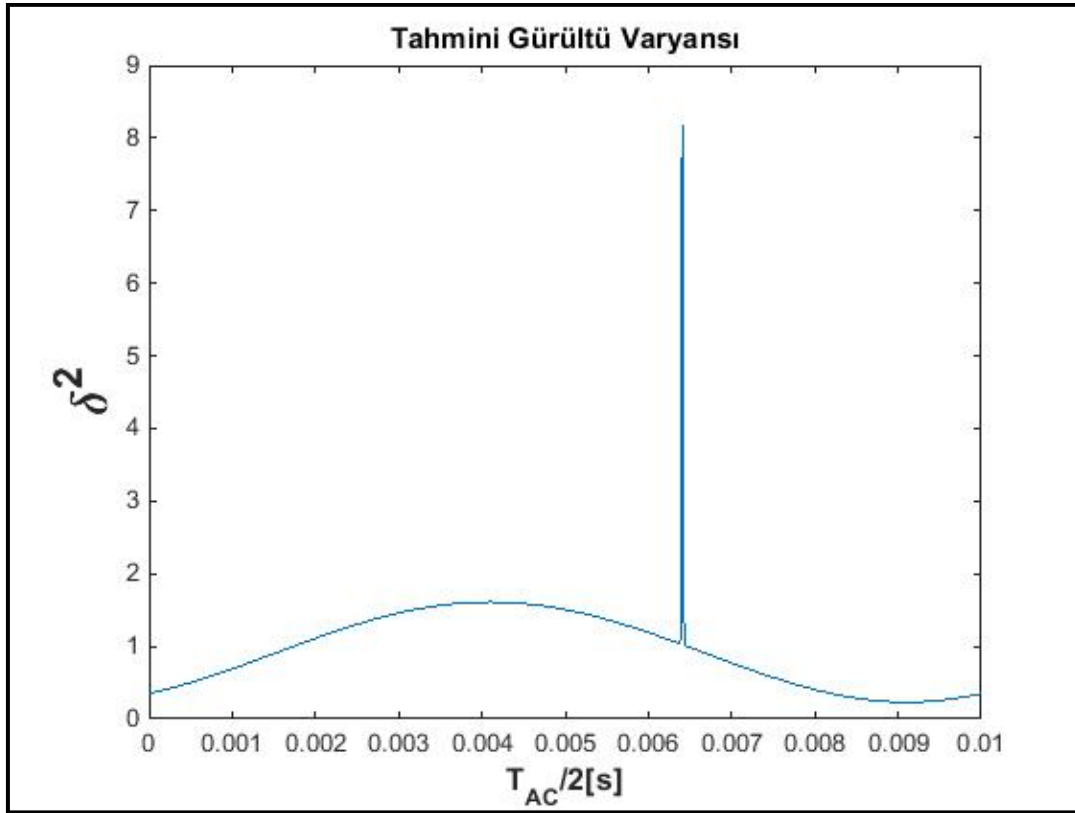
$$\hat{\sigma}^2(t) = \sum_{l=0}^{L-1} A_l \left| \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{AC}} + \theta_l\right) \right|^{n_l} \quad (7.1)$$

Eşitlik 7.1'de $l=0,1,2$ gürültünün karakteristiğini tanımlayarak; sırasıyla dar bant, arka plan ve dürtüsel gürültüleri temsil etmektedir [29].

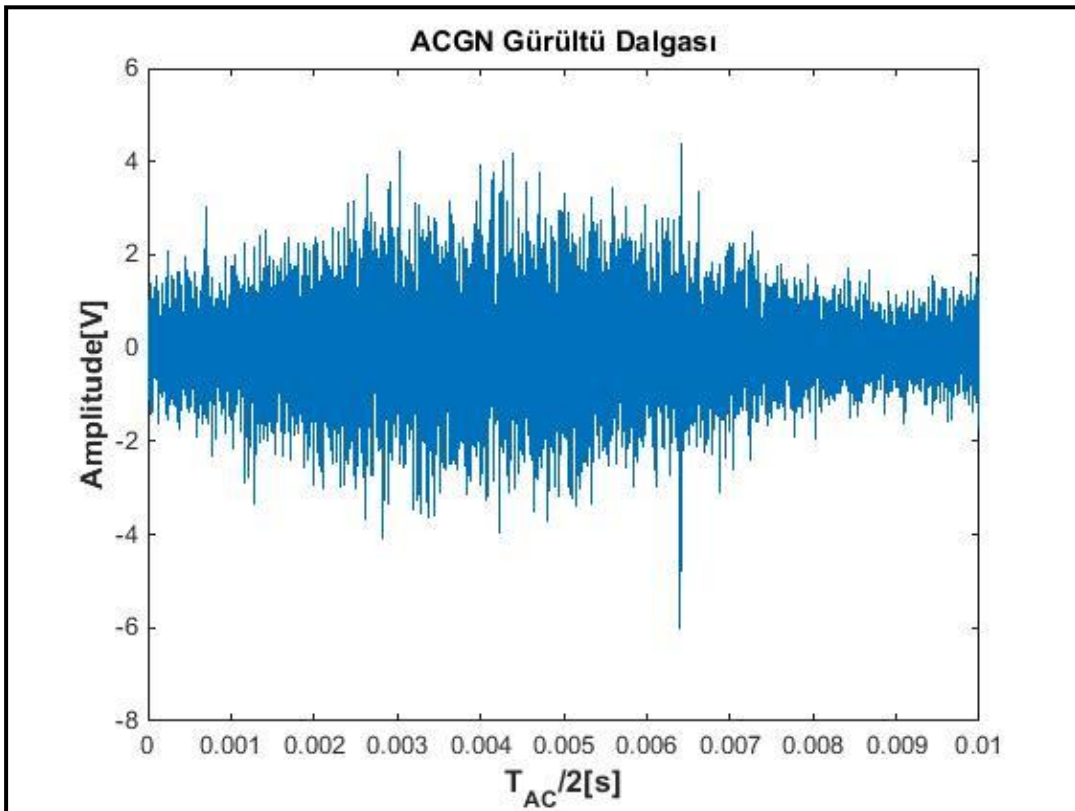
Çizelge 7.1. Gürültü ölçümlerine uygun varyans parametreleri [29]

l	A_L	θ_l [deg]	n_l
0	0.23	-	0
1	1.38	-6	1.91
2	7.17	-35	1.57×10^5

Bu gürültünün varyansı ve bu varyans karakteristiğine uygun olarak oluşturduğumuz gürültü dalgası sırasıyla Şekil 7.4. ve Şekil 7.5.'te görülmektedir. Oluşan gürültü AC (alternative current) periyonun yarısı bir periyotta cyclostationary (döngüsel durağan) bir yapıya sahiptir.



Şekil 7.4. MATLAB’da simüle edilen tahmini gürültü varyansı

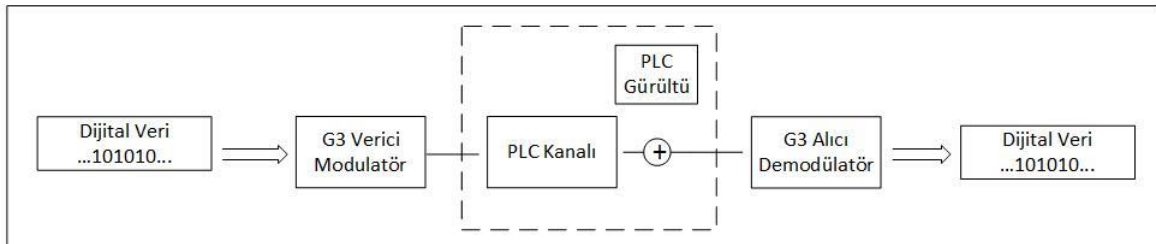


Şekil 7.5. MATLAB’da simüle edilen ACGN gürültü dalgası

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, alçak gerilim elektrik hattı üzerinden, dar bant ve yüksek veri hızında güç hattı haberleşmesi MATLAB’da implemente edilmiştir. ITU-T G.9903 standartının ERDF tarafından geliştirilen G3 spesifikasyonunda fiziksel haberleşme verici-alıcı blokları MATLAB’da oluşturulmuştur. Çalışmada G3’nin robust modunda çalışılmış olup, buna uygun olarak her bir biti 4’er defa tekrarlanan sinyalin, OFDM bloğunda DBPSK ile modülasyonu yapılmıştır. Alçak gerilim güç hattı transmission line teoriye dayalı olarak deterministik yöntemle gerçekleştirilmiştir. Matematiksel olarak döngüsel durağan Gauss (Cyclostationary Gaussian) yöntemiyle modellenen dar bant güç hattı gürültüsü (Katayama gürültü) MATLAB’da simule edilerek güç hattı haberleşme kanalına eklenmiştir.

Şekil 8.1’de gösterildiği gibi rastgele oluşturulan dijital veri öncelikle G3 verici haberleşme bloklarından robust moda uygun şekilde module edilmiştir. Sonrasında module edilen sinyal, üzerinde dar bant güç hattı gürültüsü olan haberleşme kanalına iletilmiştir. Kanaldan geçirilen sinyal alıcıya demodüle edilmek üzere ulaştırılmıştır. Üzerinde dar bant güç hattı haberleşme kanal gürültüsü mevcut olan sinyal, G3 alıcı bloklarında demodüle edilerek haberleşme sağlanmıştır.

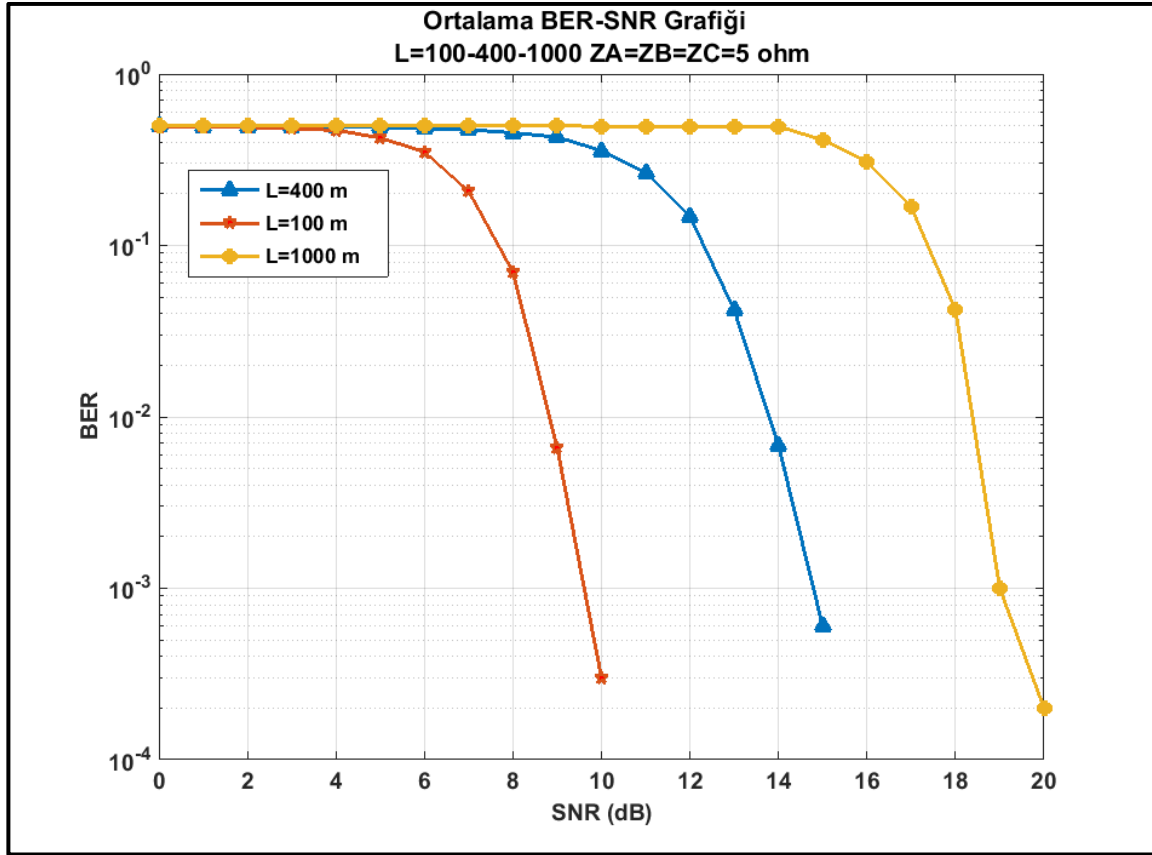


Şekil 8.1. MATLAB’da modellenen PLC haberleşme sistemi

Kanal topolojisi üç dallanmalı olarak tasarlanan ve Şekil 5.3.’te gösterilen alçak gerilim güç hattının kablo boyu ve hattaki yüklerin büyüklükleri değiştirilerek elde edilen BER-SNR sonuçları Şekil 8.2. ve Şekil 8.3.’teki iki figürde paylaşılmıştır.

İlk olarak hattaki alıcı verici mesafesinin haberleşmeye nasıl etki ettiğini gözlemlemek amaçlanmıştır. Bu sebeple, hattaki üç empedans kaynağına eşit olarak 5 ohm değer verilmiştir. Şekil 8.2.’de hattın uzunluğu sırasıyla 100 m, 400 m ve 1000 m olarak değiştirilmiştir. Beklendiği üzere kablo boyu arttıkça bit hata oranının arttığı

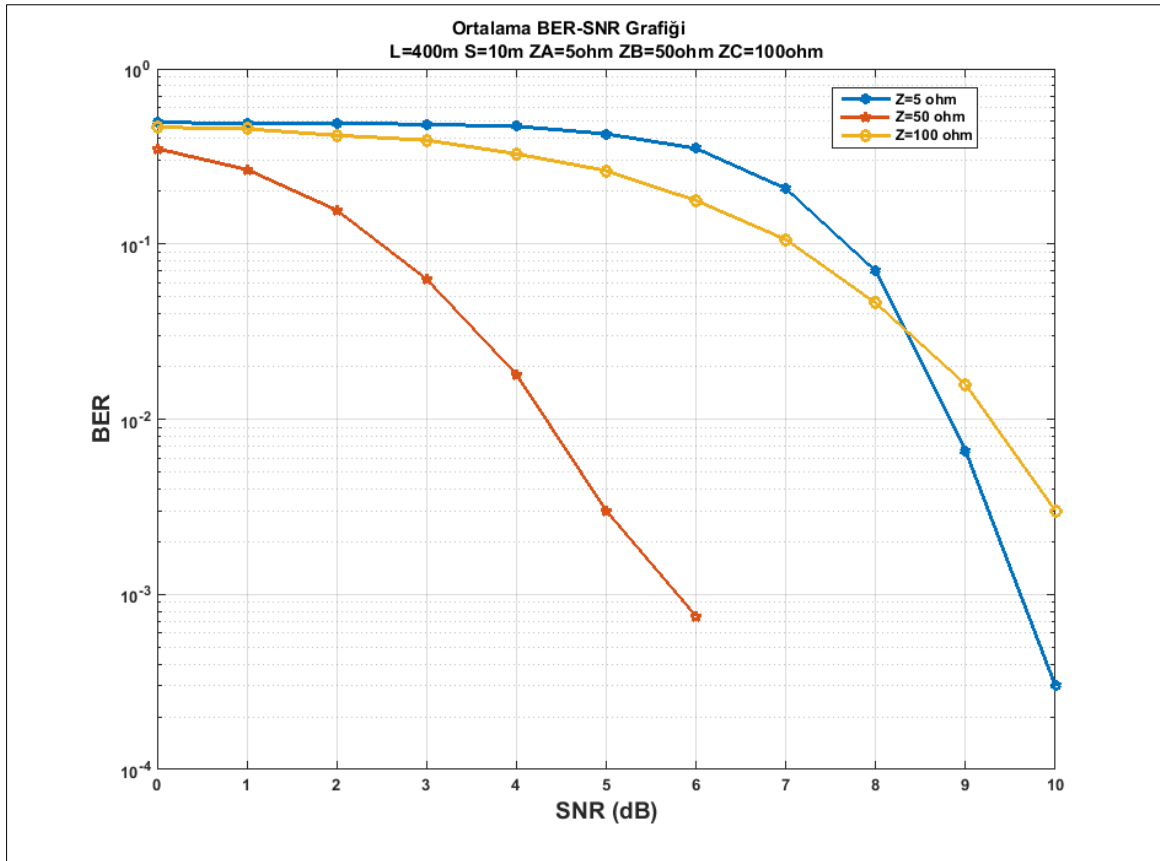
gözlemlenmiştir. Eğer grafiğin BER düzleminde gönderilen her 1000 bitten birinin hatalı olarak alındığı 10^{-3} noktası referans alınacak olursa; sistemin harcadığı güç miktarının kablo uzunluğu ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiş olur. Bu sonuç ile uzaklık değişimlerinin haberleşmeye etkisi gözlemlenmiş olup, beklendiği üzere kablo boyunun haberleşmeye olumsuz yönde etki ettiği ortaya koyulmuştur.



Şekil 8.2. Empedans değerleri sabit iken, kablo uzunluğuna göre BER/SNR grafiği

Bir sonraki incelemede ise, hattaki empedans değişimlerinin haberleşmeye nasıl etki edeceğinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda hattın uzunluğu 400 metre olarak sabit tutulmuştur. Hattaki üç empedansın değerleri sırasıyla 5'er ohm, 50'şer ohm ve 100'er ohm olarak değiştirilerek, şekil 8.3.'teki BER&SNR grafiği elde edilmiştir. Grafikteki BER&SNR eğrilerinde görüldüğü üzere empedans değerlerinin 50 ohm alınarak yapıldığı haberleşme; 5 ohm ve 100 ohm alındıkları durumlara göre oldukça başarılıdır. Bu durum empedans değerleri 50 ohm alındığında haberleşmenin en iyi olduğunu göstermektedir. Bunun en önemli sebebi güç hattı kanal modeli oluşturulurken kanalın karakteristik empedansının 50 ohm alınmış olmasıdır. Böylece haberleşme hattında sönümlerinin eşleşmiş (fading match) olması değerlendirilmiştir. Ayrıca bu durumdan oluşturulan

haberleşme sisteminde empedans değerlerinin 5 ohm ile 50 ohm arasında değiştirildiği sürece haberleşmenin daha güçlü olacağını, buna karşın; empedans değerlerinin 50 ohm'dan 100 ohm'a doğru artırıldığında ise SNR değerinin de artacağı çıkarımlarını yapabiliriz. Sonuç olarak 50 ohm'un empedans uyumlu olması sebebiyle başarılı bir BER elde edilirken, empedans değerlerinin 50 ohm'dan düşürülmesi veya yükseltilmesi ile haberleşmede birbirine yakın zayıflıklar gözlemleneceği değerlendirilmiştir.



Şekil 8.3. Kablo uzunluğu sabit iken, empedans değerlerine göre BER/SNR grafiği

Bu çalışmada lineer ve zamanla değişmeyen alçak gerilim güç hattı kanal modeli üç dallanmalı olarak tasarlanmıştır. Sonraki çalışmalar için mevcut kanal yöntemi değiştirilerek zamanla kanaldaki empedasların değiştiği istatistiksel kanal modelleri ile çalışmalar yürütülebileceği öngörülmektedir. Bir diğer kanal çalışması olarak; bu çalışmadaki üç dallanmalı basit bir kanal yerine gerçek bir alçak gerilim ağının modellenmesi de düşünülebilir. Gerçek ağın tasarlanması ile elde edilen BER&SNR grafikleri ile aynı hatta kullanılacak PLC modemlerin elde ettiği haberleşme kalitesi de kıyaslanabilir. Üçüncü önerimiz olarak, bu tez çalışmasında G3 haberleşme bloğunda kanal kestirimi yapılmamıştır. Sonraki çalışmalarda bu blok gerçekleştirilerek performansa nasıl etki edeceği gözlemlenebilir.

Son araştırma alanı önerisi olarak ise, alçak gerilim güç hattı haberleşmesindeki gürültü türlerinin sönümlenmesine yönelik çalışmalar verilebilir. Tüm bu araştırma alanlarının güç hattı haberleşmesinde iletişim hızı ve güvenilirliğini artırmaya yönelik fayda olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Galli S., Scaglione A. and Wang Z. (2011). For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 998-1027.
2. Sittoni, A., Brunelli, D., Macii, D., Tosato P., Petri, D. (2015). *Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC*. IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), 1-6.
3. Tonello, M., and Pittolo, A. (2015). *Considerations on narrowband and broadband power line communication for smart grids*. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 13-18.
4. Morgül, A. (2010). *Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğine Giriş*. (Birinci Baskı). İstanbul: Papatya Yayıncılık, 175-194.
5. Genç, F. (2019). Monte carlo yöntemi ile bit hata oranı analizi. *Figes İleri Mühendislik ve ARGE Teknolojileri Dergisi*, 1(21), 15-19.
6. Lathi B.P., Ding., Z. (2009). *Modern Digital and Analog Communication Systems*. (Fourth edition). Oxford: University Press.
7. Proakis, J. G. and Salehi, M. (2002). *Communication Systems Engineering*. (second edition). New Jersey: Prentice Hall.
8. Couch, L.W., *Digital and Analog Communication Systems*. (2013). (8th Edition). Pearson.
9. Proakis, J. G., Salehi M., *İletişim Sistemlerinin Temelleri*. (çev. H. Altun, E. Öztürk ve Y.E. Yenice). Ankara: Nobel Yayın. (Eserin orijinali 2004'te yayımlandı), 124-210.
10. Liu, W., Sigle M. and Dostert, K. (2011). Channel characterization and system verification for narrowband power line communication in smart grid applications. *IEEE Communications Magazine*, 49(12). 28-35.
11. Chauvenet, C., Etheve, G., Sedjai, M. and Sharma, M. (2017). *G3-PLC based IoT sensor networks for SmartGrid*. IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). 1-6.
12. Lampe, L., Tonello, A. M. and Swart T. G. (2016). *Power line communications principles, standards and applications from multimedia to smart grid*. (second edition). NJ: John Wiley & Sons.
13. Shlezinger, N. and Dabora, R., (2015). On the Capacity of Narrowband PLC Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 63(4), 1191-1201.
14. Nassar, M., Dabak, A., Kim, I.H., Pande, T. and Evans, B. L. (2012). *Cyclostationary noise modeling in narrowband powerline communication for smart grid applications*. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 3089–3092.

15. Ferreira, H. C., Lampe, L., Newbury, J., Swart, T. G. (2010). *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. Chichester: Wiley.
16. PRIME Alliance Technical Working Group. (May 2010). Draft Standard for PowerLine Intelligent Metering Evolution (PRIME).
17. ITU-T G.9903. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks.
18. Hoch, M. (2011). *Comparison of PLC G3 and PRIME*. Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), IEEE International Symposium.165-169.
19. Berger, L., T., Schwager, A., J. Joaquín Escudero-Garzás. (2013). Power line communications for smart grid applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1(16), 1-10.
20. Electricité Réseau Distribution France-ERDF. (2009). PLC G3 physical layer specification-Physical Layer block for an Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Powerline Communications (PLC).
21. Kul, M., Uyaroğlu, Y., Ayasun, S., Vatansever, F., Eminoğlu, U., İmal, N. (2013). *Elektrik Enerjisi İletimi ve Dağıtımı*. T.C Anadolu Üniversitesi Yayını No: 2786. 34-58.
22. Hasirci Z., Çavdar İ.H., Suljanovic N. , Mujcic A. (2013). *Akıllı Şebeke Uygulamalarında Alçak Gerilim Dağıtım Hatlarındaki Mevcut İletişim Modellerinin Karşılaştırılması*. Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu. 1-1.
23. Bostoen, T. and Van de Wiel, O. (2000). *Modelling the low-voltage power distribution network in the frequency band from 0.5 MHz to 30 MHz for broadband powerline communications (PLC)*. International Zurich Seminar on Broadband Communications. Accessing, Transmission, Networking. Proceedings. 171-178.
24. Corripio, F. J. C., Arrabal, J. A. C., del Rio, L. D. and Munoz, J. T. E. (2006). Analysis of the cyclic short-term variation of indoor power line channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(7), 1327-1338.
25. Kaiser, C., Otterbach, N. and Dostert, K. (2017). *Spectral correlation analysis of narrowband power line noise*. 2017 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). 1-6.
26. Berger, L.T., Schwager A., Pagani, P., Schneider. D. M., (2014). *MIMO Power Line Communications Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing*. CRC Press.

27. Souissi, S., Rhouma O. B. and Rebai, C. (2013). *Bottom-up approach for narrowband powerline channel modeling*. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2987-2992.
28. Korki, M., Hosseinzadeh, N., Vu, H. L., Moazzeni, T. and Foh, C. H. (2011). *Impulsive noise reduction of a narrowband power line communication using optimal nonlinearity technique*. Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC). 1-4.
29. Katayama, M., Yamazato T. and Okada, H. (2006). A mathematical model of noise in narrowband power line communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(7), 1267-1276.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAŞAYAR, Tuğba
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 13.06.1990, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon: : +90 555 705 28 24
 : +90 312 258 28 36
 e-mail: : tugba.basayar@afad.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Çankaya Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	2014
Lise	Kalaba Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017- Halen	T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı-AFAD	Uzman Yardımcısı
2016-2017	TÜBİTAK – Gazi Üniversitesi	Proje Bursiyeri

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

1. Başayar, T. , Ertuğ, Ö. (2018). Alçak Gerilim Güç Hattı Haberleşmesinde Gürültü Eklenmiş Kanal Modelinin Kablo Uzunluğuna Göre BER&SNR İncelemesi. *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı- ELECO*. Bursa. 328-332.
2. Bingöl, H., Kısa, G., Başayar, T., Genç, F., Yengel, E. (2014). Image-Based Remote Control Using FPGA. *Çankaya Üniversitesi 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*. Ankara.189-193

Hobiler

Kitap okumak.



GAZİ GELECEKTİR..