

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GÜÇ HATTI HABERLEŞME SİSTEMİNİN  
MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU**

**Elektrik-Elektronik Mühendisi Oğuzhan ÇAKIR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Elektronik Yüksek Mühendisi"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

170892

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13.05.2005  
Tezin Savunma Tarihi : 23.06.2005**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İsmail H. ÇAVDAR**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ayten ATASOY**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Cemal KÖSE**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT**

**Trabzon 2005**

## ÖNSÖZ

Güç hattı haberleşmesi 1838 yılında ortaya çıkmış, fakat teknolojik yetersizlikler nedeniyle 1990'lı yıllara kadar yavaş bir gelişim süreci izlemiştir. 1990'lı yıllarda yariletken teknolojisindeki gelişmeler ve yeni modülasyon tekniklerinin bulunması ile hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. Bu çalışmada, güç hattı haberleşme sistemi modellenmiş ve bu model doğrultusunda haberleşme sisteminin simülasyonu yapılmıştır.

Çalışmalarım boyunca bana değerli zamanını ayıran ve verdiği fikirler ile beni yönlendiren değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. İsmail H. ÇAVDAR'a ve çalışmalarımda desteğini esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. İsmail KAYA'ya, sayın Doç. Dr. İsmail H. ALTAŞ'a, sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN'a, ağabeyim sayın Öğr. Gör. Ömer ÇAKIR'a ve sayın Osman GEDİKLİ'ye çok teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Oğuzhan ÇAKIR  
Trabzon, 2005

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Sayısal Haberleşme.....	2
1.2.1. Sayısal Haberleşme Sisteminin Öğeleri.....	2
1.2.2. Haberleşme Kanalları ve Karakteristikleri.....	4
1.2.2.1. Kablolu Kanallar.....	5
1.2.2.2. Fiber-Optik Kanallar.....	5
1.2.2.3. Kablosuz Elektromanyetik Kanallar.....	6
1.2.2.4. Sualtı Akustik Kanallar.....	10
1.2.3. Haberleşme Kanallarının Matematiksel Modelleri.....	12
1.2.3.1. Toplamsal Gürültülü Kanal.....	12
1.2.3.2. Doğrusal Filtre Davranışlı Kanal.....	13
1.2.3.3. Zamanla Değişen Doğrusal Filtre Davranışlı Kanal.....	14
1.2.4. Sayısal Haberleşmenin Tarihçesi.....	15
1.3. İletim ve Dağıtım Şebekeleri.....	18
1.3.1. Gerilimlere Göre Şebeke Çeşitleri.....	19
1.3.1.1. Alçak Gerilim Şebekeleri.....	19
1.3.1.2. Orta Gerilim Şebekeleri.....	19
1.3.1.3. Yüksek Gerilim Şebekeleri.....	20
1.3.1.4. Çok Yüksek Gerilim Şebekeleri.....	20
1.3.2. Dağıtım Şekillerine Göre Şebeke Çeşitleri.....	21

1.3.2.1.	Dalı Şebekeler ve Özellikleri.....	21
1.3.2.2.	Halka Şebekeler ve Özellikleri.....	22
1.3.2.3.	Ağ Şebekeler ve Özellikleri.....	23
1.3.2.4.	Enterkonekte Şebekeler ve Özellikleri.....	24
1.3.3.	Trafo Merkezleri.....	25
1.4.	Kablo ve İletkenler.....	26
1.5.	Havai Hat İletkenleri İle Elektrik İletimi ve Dağıtımını.....	27
1.5.1.	Yapılarına Göre İletken Çeşitleri.....	28
1.5.2.	Kullanılan Gerilim Değerlerine Göre İletken Çeşitleri.....	28
1.6.	Güç Hattı Haberleşmesi.....	28
1.6.1.	Güç Hattı Haberleşmesinin Tarihçesi.....	29
1.6.2.	Gürültü.....	32
1.6.2.1.	Şebeke Frekansı ile Eşzamanlı Gürültüler.....	33
1.6.2.2.	Düzensiz Tayflı Gürültüler.....	34
1.6.2.3.	Tek Darbeli Gürültüler.....	34
1.6.2.4.	Şebeke Frekansı ile Eşzamanlı Olmayan Periyodik Gürültüler.....	34
1.6.3.	Şebeke Empedansı.....	35
1.6.4.	Sinyal Zayıflaması.....	37
1.6.5.	İşaret Gürültü Oranı.....	38
1.6.6.	Kanala Sinyal Kuplajı.....	38
1.6.7.	Güç Hattı Haberleşmesinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri.....	39
1.6.8.	Güç Hattı Haberleşmesi Teknolojileri.....	40
1.6.8.1.	LonWorks Teknolojisi.....	40
1.6.8.2.	CEBus Teknolojisi.....	43
1.6.8.3.	Passport ve Plug-in PLX Teknolojisi.....	44
1.6.8.4.	X-10 Teknolojisi.....	45
1.6.8.5.	PowerPacket Teknolojisi.....	46
1.6.8.6.	Cogency's HomePlug Teknolojisi.....	46
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA.....	48
2.1.	Giriş.....	48
2.2.	Güç Hattı Haberleşme Sisteminin Modellenmesi.....	48
2.2.1.	Güç Hattı Haberleşmesi Kanal Modeli.....	49
2.2.2.	Giriş Empedansı.....	50

2.2.3.	Sinyal Zayıflaması.....	54
2.2.4.	Gürültü.....	58
2.3.	Güç Hattı Haberleşme Sisteminin Simülasyonu.....	60
2.3.1.	Güç Hattı Simülatör Programı.....	60
2.3.2.	Güç Hattı Simülatör Programı Sistem Birimleri.....	61
2.3.3.	Güç Hattı Simülatör Programı ile Analiz.....	63
2.3.3.1.	Giriş Empedansı.....	64
2.3.3.2.	Transfer Fonksiyonu.....	65
2.3.3.3.	Sinyal Zayıflaması.....	66
2.3.3.4.	Zayıflamış İşaret.....	66
2.3.2.5.	İşaret Gürültü Oranı.....	67
2.3.4.	PLSIM Programının Multisim Programı ile Karşılaştırılması .....	71
2.4.	Gürültü Ölçümleri.....	80
2.4.1.	Zaman Ekseninde Gürültü Ölçümü.....	81
3.	SONUÇLAR.....	82
4.	ÖNERİLER.....	83
5.	KAYNAKLAR.....	84
	ÖZGEÇMİŞ.....	92

## ÖZET

Güç hattı haberleşmesi 1838 yılında ortaya çıkmış, fakat teknolojik yetersizlikler nedeniyle 1990'lı yıllara kadar yavaş bir gelişim süreci izlemiştir. 1990'lı yıllarda yarıiletken teknolojisindeki gelişmeler ve yeni modülasyon tekniklerinin bulunması ile hızlı bir gelişim sürecine girmiştir.

Güç hattı haberleşmesinde, yüksek hızlı ev içi haberleşme uygulamaları ve haberleşme hizmetlerinin evlere veya işyerlerine ulaştırılmasında mevcut elektrik hatları kullanılır. Güç hattı haberleşmesi üzerinde yapılan çalışmalar otomasyon, geniş bantlı haberleşme uygulamaları, otomatik sayaç okuma (*AMR, Automatic Meter Reading*) ve şebeke üzerinden internet erişimi (*IPL, Internet Over Powerline*) gibi konular üzerinde yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmada, güç hattı haberleşme sistemi modellenmiş ve bu model doğrultusunda haberleşme sisteminin simülasyonu yapılmıştır. Haberleşme sisteminin simülasyonu için bir simülatör programı (*PLSIM, Powerline Simulator*) geliştirilmiş ve endüktif kuplaj yöntemi kullanılarak güç hattındaki arkaplan gürültüsü zaman bölgesinde incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güç Hattı Haberleşmesi, Güç Hattı Haberleşme Sisteminin Modellenmesi ve Simülasyonu, Endüktif Kuplaj, Sayısal Haberleşme, Enerji Nakil Hatları, Kablolar ve İletkenler

## SUMMARY

### **Modeling and Simulating of Powerline Communication System**

The development of powerline communication that was introduced in 1938 has been slow to progress until the 1990's because of technological deficiencies. Starting from the 1990's, it has showed fast development due to continual improvements in semiconductor technology and the advancement of new modulation techniques.

In powerline communication, existing electrical lines are used to provide communication services to homes and businesses and high speed indoor communication running various multimedia applications. Researches about powerline communication technology are intensified for areas such as automation, broadband communication applications, automatic meter reading (*AMR*) and internet over powerline (*IPL*).

In this study, a model is developed to simulate the behavior of a powerline communication system. A simulation program called PLSIM (*Powerline Simulator*) is implemented and background noise of powerline was observed in time domain, using inductive coupling technique.

**Keywords:** Powerline Communication, Modeling and Simulating of Powerline Communication System, Inductive Coupling, Digital Communication, Power Transmission Networks, Cables and Conductors

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1. Sayısal haberleşme sisteminin temel elemanları .....	3
Şekil 2. Kılavuzlu kablolu kanallar için frekans dizilimi .....	6
Şekil 3. Kablosuz elektromanyetik kanallar için frekans aralıkları .....	7
Şekil 4. Yer dalgası yayılımı .....	8
Şekil 5. Gök yüzü dalgası yayılımı .....	9
Şekil 6. Toplamsal gürültülü kanal .....	13
Şekil 7. Toplamsal gürültülü doğrusal filtre davranışlı kanal .....	14
Şekil 8. Topalsal gürültülü zamanla değişen doğrusal filtre davranışlı kanal .....	14
Şekil 9. Değişik tipte dallı şebekeler .....	22
Şekil 10. Halka şebeke .....	23
Şekil 11. Ağ şebeke .....	24
Şekil 12. Enterkonnekte şebeke .....	25
Şekil 13. Güç hattı haberleşmesi ile ilgili kitaplar .....	29
Şekil 14. MELKO™ yük yönetim sistemi .....	31
Şekil 15. 60 Hz güç devresiyle çalışan ışık reostası ile üç üniversal motorun gerilim tayflarının karşılaştırılması .....	33
Şekil 16. Toplam Avrupa şebeke empedansı .....	35
Şekil 17. Merkezileştirilmiş kontrol mimarisi modeli .....	41
Şekil 18. LonWorks dağıtılmış kontrol mimarisi .....	42
Şekil 19. Güç hattı haberleşmesi sistem modeli .....	48
Şekil 20. Güç hattı kanalında görülen bozucu etkiler .....	49
Şekil 21. Güç hattı kanalının basitleştirilmiş modeli .....	50
Şekil 22. Tek fazlı alçak gerilim kablosu .....	51
Şekil 23. Hat modeli .....	51
Şekil 24. Sistem modeli .....	52
Şekil 25. Basitleştirilmiş yapı .....	2
Şekil 26. Üniversal motor, televizyon seti ve arka plan gürültüsü .....	59
Şekil 27. Ortalama gürültü tayfi ve modellenmiş arka plan gürültüsü .....	59
Şekil 28. ELEX'deki ve PH'deki gürültü .....	60



Şekil 29. PLSIM programı logoları .....	61
Şekil 30. PLSIM programından genel bir görünüm .....	61
Şekil 31. Verici ve verici özellikleri .....	62
Şekil 32. Kanal ve kanal özellikleri .....	62
Şekil 33. Gürültü ve gürültü özellikleri .....	63
Şekil 34. Alıcı ve alıcı özellikleri .....	63
Şekil 35. AFB ve YFB analiz menüsü .....	64
Şekil 36. Güç hattı haberleşmesi sistem modeli .....	64
Şekil 37. Giriş empedansı .....	65
Şekil 38. Transfer fonksiyonu .....	65
Şekil 39. Sinyal zayıflaması .....	66
Şekil 40. Zayıflamış işaret .....	66
Şekil 41. Ortalama gürültü tayfi .....	67
Şekil 42. Ortalama gürültü tayfi için SNR grafiği .....	67
Şekil 43. Modellenmiş arka plan gürültüsü .....	68
Şekil 44. Modellenmiş arka plan gürültüsü için SNR grafiği .....	68
Şekil 45. ELEX'deki gürültü tayfi .....	69
Şekil 46. ELEX'deki gürültü tayfi için SNR grafiği .....	69
Şekil 47. PH'deki gürültü tayfi .....	70
Şekil 48. PH'deki gürültü tayfi için SNR grafiği .....	70
Şekil 49. Direnç-direnç durumu için sistem modeli .....	71
Şekil 50. Direnç-direnç durumu .....	71
Şekil 51. Direnç-endüktans durumu için sistem modeli .....	72
Şekil 52. Direnç-endüktans durumu .....	72
Şekil 53. Direnç-kapasite durumu için sistem modeli .....	73
Şekil 54. Direnç-kapasite durumu .....	73
Şekil 55. Endüktans-direnç durumu için sistem modeli .....	74
Şekil 56. Endüktans-direnç durumu .....	74
Şekil 57. Endüktans-endüktans durumu için sistem modeli .....	75
Şekil 58. Endüktans-endüktans durumu .....	75
Şekil 59. Endüktans-kapasite durumu için sistem modeli .....	76
Şekil 60. Endüktans-kapasite durumu .....	76

Şekil 61. Kapasite-direnç durumu için sistem modeli .....	77
Şekil 62. Kapasite-direnç durumu .....	77
Şekil 63. Kapasite-endüktans durumu için sistem modeli .....	78
Şekil 64. Kapasite-endüktans durumu .....	78
Şekil 65. Kapasite-kapasite durumu için sistem modeli .....	79
Şekil 66. Kapasite-kapasite durumu .....	79
Şekil 67. Kuplaj devresinin şeması ve kuplaj devresi .....	80
Şekil 68. Ölçüm cihazları .....	81
Şekil 69. Ölçülen gürültüler .....	81



## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Direnç-direnç durumu.....	71
Tablo 2. Direnç-endüktans durumu.....	72
Tablo 3. Direnç-kapasite durumu.....	73
Tablo 4. Endüktans-direnç durumu.....	74
Tablo 5. Endüktans-endüktans durumu.....	75
Tablo 6. Endüktans-kapasite durumu.....	76
Tablo 7. Kapasite-direnç durumu.....	77
Tablo 8. Kapasite-endüktans durumu.....	78
Tablo 9. Kapasite-kapasite durumu.....	79
Tablo 10. Kuplaj devresi parametre değerleri.....	80

## SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Amper
A	: Sinyal genliği
$A_s$	: Genlik çözünürlüğü
AC	: Alternatif Akım
AG	: Alçak gerilim
$a_h$	: Ara değişken
$a_k(t)$	: Zamanla değişen zayıflama faktörü
AM	: Genlik Modülasyonu
AMR	: Otomatik Sayaç Okuma
$A_{max}$	: En büyük genlik
$a_n$	: İkili veri dizisi
ASK	: Genlik Kaydırmalı Modülasyon
$a_z$	: Ara değişken
BEP	: Bit Hata Olasılığı
$b_h$	: Ara değişken
bps	: Saniye başına bit sayısı
$b_z$	: Ara değişken
c	: Işık hızı
C	: Hat kapasitesi
C	: Kanal kapasitesi
CEBus	: Elektronik Tüketici Yolu
CEBus CAL	: CEBus Ortak Uygulama Dili
CIC	: CEBus Endüstri Komisyonu
$C_{km}$	: km başına hat kapasitesi
$c_h$	: Ara değişken
CTP	: Merkezileştirilmiş Simge Geçişi
$c(t)$	: Doğrusal filtrenin darbe cevabı
$c(\tau ; t)$	: Zamanla değişen darbe cevabı
ÇYG	: Çok Yüksek Gerilim

D	: Sinyal zayıflaması
d	: Hat boyu
d	: Yayın ufku
dB	: Desibel
DSMA	: Datagram Duyarlı Çoklu Erişim
$d_h$	: Ara değişken
dp	: Denklem parçası
$dp_1$	: 1 numaralı denklem parçası
$dp_2$	: 2 numaralı denklem parçası
$e_h$	: Ara değişken
EHF	: Aşırı Derecede Yüksek Frekans
EIA	: Elektronik Endüstrisi Birliği
ELF	: Aşırı Derecede Alçak Frekans
F	: Farad
f	: Frekans
$f_c$	: Çalışma frekansı
$f_h$	: Ara değişken
$f_s$	: Kaynak frekansı
FSK	: Frekans Kaydırmalı Modülasyon
G	: Giga
$g(t)$	: Temel dalga şekli
H	: Henry
H	: Transfer fonksiyonu
$ H $	: Transfer fonksiyonunun genliği
h	: Yükseklik
HF	: Yüksek Frekans
HMI	: İnsan-Makine Arayüzü
$h(t)$	: Darbe cevabı
Hz	: Hertz
I	: Ana kol akımı
$I_C$	: Kondansatör üzerinden akan akım
$I_L$	: Çıkış akımı
IPL	: Güç Hattı Üzerinden İnternet Erişimi

IS-60	: Geçici Standart 60
k	: Kilo
k/n	: Kod oranı
L	: Hat endüktansı
L	: Sinyal parçası sayısı
l	: İletken boyu
$l_A$	: Anten boyu
LAN	: Yerel Ağ
LED	: Işık Yayan Diyot
$L_{km}$	: km başına hat endüktansı
LOS	: Görüş Hattı
LON	: Yerel Çalışma Ağı
M	: Mega
m	: Metre
m	: Mili
MAC	: Ortam Erişim Protokolü
MF	: Orta Frekans
n	: Nano
$n(t)$	: Toplamsal gürültü
NVs	: Ağ Değişkenleri
$N_0$	: Toplamsal gürültü gücü yoğunluğu
OFDM	: Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama
OG	: Orta Gerilim
OOK	: Aç-Kapa Anahtarlama
P	: Ortalama güç yoğunluğu
p	: Piko
PHY	: Fiziksel
PLC	: Güç Hattı Haberleşmesi
PLC	: Güç Hattı Taşıyıcısı
PLSIM	: Güç Hattı Simülatörü
PSK	: Faz Kaydırmalı Modülasyon
R	: Hat direnci
R	: Veri hızı

RCS	: Dalgalı Taşıyıcı Sinyali
RF	: Radyo Frekansı
$R_{km}$	: km başına hat direnci
$r(t)$	: Alıcı sinyali
SCR	: Silikon Kontrollü Doğrultucu
SHF	: Süper Yüksek Frekans
SNR	: İşaret Gürültü Oranı
$s_p$	: En büyük verici sinyal genliği
$s(t)$	: Verici sinyali
$ s(t) $	: Verici sinyal genliği
UHF	: Ultra Yüksek Frekans
V	: Volt
$V_L$	: Alıcı giriş gerilimi
$V_s$	: Kaynak gerilimi
VHF	: Çok Yüksek Frekans
VLf	: Çok Alçak Frekans
VoIP	: İnternet Üzerinden Ses Transferi
YG	: Yüksek Gerilim
Z	: Giriş empedansı
$ Z $	: Giriş empedansının genliği
$Z_L$	: Alıcı giriş empedansı
$Z_{Lx}$	: Alıcı giriş empedansının reel bileşeni
$Z_{Ly}$	: Alıcı giriş empedansının sanal bileşeni
$Z_T$	: Verici çıkış empedansı
$z(t)$	: Zayıflamış sinyal
$Z_y$	: Giriş empedansının sanal bileşeni
$Z_x$	: Giriş empedansının reel bileşeni
QoS	: Servis Kalitesi
$X_C$	: Kapasitif reaktans
$X_L$	: Endüktif reaktans
W	: Bant genişliği
W	: Watt
$\alpha$	: Zayıflama sabiti

$\alpha_z$	: Giriş empedansının fazı
$\alpha_h$	: Transfer fonksiyonunun fazı
$\delta$	: Dalma derinliği
$\lambda$	: Dalga boyu
$\mu$	: Mikro
$\mu C$	: Mikrobilgisayar
$\mu P$	: Mikroişlemci
$\Omega$	: Ohm
$\omega$	: Açısal hız
$\tau$	: Geçen zaman
$\tau_k$	: Zaman gecikmesi





## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Güç hattı haberleşmesi (*PLC, Powerline Communication, Power Line Communication, Power-Line Communication*), kamuya ait elektrik dağıtım şebekeleri veya ev içi dağıtım şebekeleri üzerinden bir veri transfer yöntemi olarak kullanılmıştır. Bu uygulamaların nitelikleri farklılaşmıştır. Ev içi uygulamalar için geliştirilen cihazlar daha ziyade ev içindeki elektrikli cihazların kontrolü için tasarlanmıştır. Aydınlatma, yangın alarm sistemi ve ısıtma kontrolü uygulamaları bu tip uygulamalara örnek olarak verilebilir. Dağıtım şirketleri tarafından kullanılan sistemler ve cihazlar, çoğunlukla otomatik sayaç okuma (*AMR, Automatic Meter Reading*), tarife değişikliği, enerji harcaması denetimi ve yük yönetimi uygulamalarında kullanılmaktadır. Son yıllarda, alçak gerilim hatları üzerinden geniş bantlı internet erişimi (*IPL, Güç Hattı Üzerinden İnternet Erişimi, Internet Over Powerline*) sıcak bir tartışma konusu olmuştur. Güç hattı kanallarının karakteristikleri ve farklı sayısal modülasyon teknikleri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Teknik ve düzenleme problemleri nedeniyle şebeke üzerinden internet erişimi fikri kısmen çökmüştür. Bu olumsuzluğa rağmen güç hattı kanalı, cihaz kontrolü ve büyük bant genişliklerine ve yüksek veri hızlarına ihtiyaç duyulmayan uygulamalar için uygun bir kanaldır [1].

Her ne kadar şebeke üzerinden internet erişimi çok kullanıcı sistemler için mümkün olmasa da. Az kullanıcı özel uygulamalar için mümkündür. İnternet erişim hizmetlerinin bina içi kullanıcılara ulaştırılması veya bina içi yüksek hızlı yerel ağların oluşturulması güç hattı haberleşmesi ile mümkündür. Günümüzde uygun sistemler ve modülasyon teknikleri kullanılarak güç hattı üzerinden 100 Mbps (*saniye başına milyon bit, Mega bit per second*) ve üzeri veri hızlarında haberleşme yapmak mümkündür.

1990'lı yıllar ve sonrasında güç hattı haberleşmesi üzerinde kapsalı çalışmalar yapılmış ve büyük başarılarla imza atılmıştır. Bu çalışmalarda farklı modülasyon teknikleri kullanılmış olup, halen yeni modülasyon teknikleri üzerinde çalışılmaktadır. Bu modülasyon teknikleri içinde, OFDM ön plana çıkmıştır. OFDM kullanılarak, geniş bantlı ve yüksek hızlı haberleşme uygulamaları gerçekleştirmek mümkündür.

Güç hattı haberleşmesinde kullanılan frekans bantları geçmişten günümüze farklılıklar göstermektedir. Başlangıçta güç hattı haberleşmesi çok dar bir frekans aralığında yapılmakta iken günümüzde 0 Hz – 100 MHz frekans bandı bu amaç için kullanılmaktadır. Ayrıca 100 MHz'in üstündeki frekanslarda dünyanın çeşitli yerlerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, güç hattı haberleşme sistemi modellenmiş ve bu model doğrultusunda haberleşme sisteminin simülasyonu yapılmıştır. Haberleşme sisteminin simülasyonu için bir simülasyon programı (*PLSIM, Güç Hattı Simülatörü, Powerline Simulator*) geliştirilmiş ve endüktif kuplaj yöntemi kullanılarak güç hattındaki arkaplan gürültüsü zaman bölgesinde incelenmiştir.

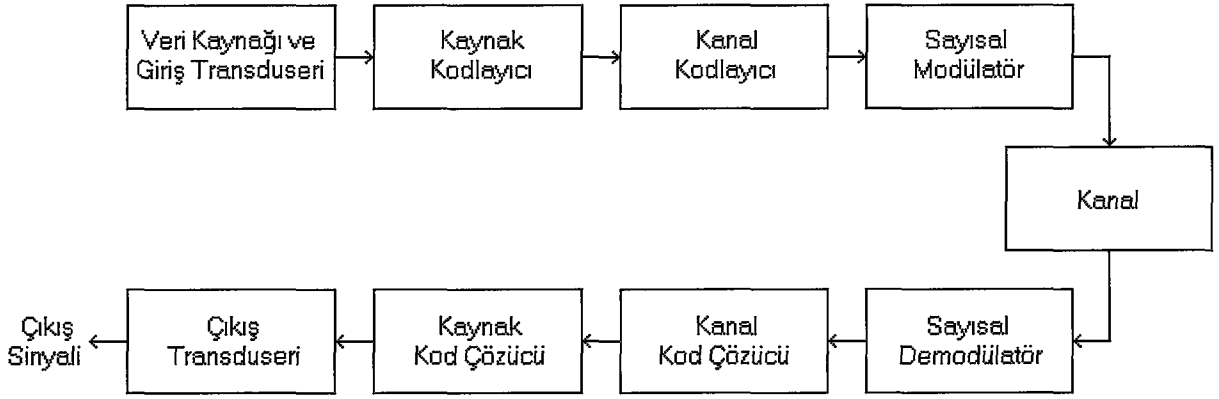
Bu kısımda öncelikle sayısal haberleşme ve enerji nakil hatlarından bahsedilecek. Ardında güç hattı haberleşmesi, tarihçesi ve teknolojileri hakkında bilgi verilecektir.

## 1.2. Sayısal Haberleşme

Sayısal haberleşmenin konusu, veri üreten bir kaynaktan alınan bilgilerin sayısal olarak bir veya daha fazla hedefe iletilmesini kapsamaktadır. Bilginin iletiildiği fiziksel kanalın karakteristikleri haberleşme sisteminin analizinde ve tasarlanmasında özel bir öneme sahiptir. Kanalın karakteristikleri genelde haberleşme sisteminin temel yapı bloklarının tasarımını etkiler. Bu bölümde haberleşme sisteminin öğelerini ve bu öğelerin işlevlerini tanımlayacağız [2].

### 1.2.1. Sayısal Haberleşme Sisteminin Öğeleri

Şekil 1.'de sayısal haberleşme sisteminin temel öğeleri görülmektedir. Kaynak çıkışı, analog ses veya görüntü işareti olabileceği gibi bir telem makinesinin sayısal çıkış işareti de olabilir. Bir sayısal haberleşme sisteminde mesaj, kaynak çıkışının bit (*ikilik sayı sisteminde her bir hane*) dizileri haline getirilmesi ile elde edilir. İdealde, kaynak çıkışının (*mesajın*) mümkün olduğunca az bitle temsil edilmesine çalışılır. Başka bir ifade ile kaynak çıkışı mümkün olduğunca gereksiz bitlerden arındırılmış olarak tanımlanır. Analog veya dijital bir kaynak çıkışının verimli bir şekilde dönüştürülme işlemine *kaynak kodlama* veya *veri sıkıştırma* denir [2].



Şekil 1. Sayısal haberleşme sisteminin temel elemanları [2].

*Bilgi dizisi* olarak tanımlanan kaynak kodlayıcı çıkışındaki bit dizisi, kanal kodlayıcıya yollanır. Kanal kodlayıcının görevi, sinyalin kanalda iletimi sırasında karşılaşılan gürültü ve girişim etkilerinin ortadan kaldırılmasında kullanılan ve bilgi dizisi içerisinde bulunan ilave bitlerin alıcıya tanıtılmasını sağlamaktır. Bilgi dizisine eklenen ilave bitler alınan verinin güvenilirliğini ve alınan sinyalin doğruluğunu artırır. Bu ilave bitler alıcının istenen veri dizisini elde etmesine yardımcı olur. Örneğin, veri dizisini kodlamanın basit bir şekli, dizideki her bitin  $m$  kere tekrarlanmasıdır. Burada  $m$  pozitif bir tamsayıdır. Daha karmaşık kodlama yöntemleri ise  $k$  tane veri biti ve bu veri bitlerine göre haritalanmış  $n$  tane bit içeren *kod cümlelerini* kullanır. Kod cümlesindeki ilave bitlerin miktarı  $n/k$  oranı ile ölçülür.  $n/k$  oranının tersi olan  $k/n$  oranı *kod oranı* olarak adlandırılır.

Kanal kodlayıcı çıkışındaki veri dizisi, haberleşme kanalı ile bağlantıyı sağlayan *sayısal modülatöre* iletilir. Sayısal modülatörün temel görevi veri dizisini dalga şekillerine dönüştürmektir. Bunu daha iyi anlamak için kodlanmış veri dizisinin, her seferinde tek bit yollanacak şekilde, sabit  $R$  bit/saniye veri hızı ile iletildiğini varsayalım. Modülatör, 0 değerli veri bitlerini  $s_0(t)$  dalga şekli ile 1 değerli veri bitlerini de  $s_1(t)$  dalga şekli ile tanımlamış olsun. Bu durumda kanal kodlayıcı çıkışındaki her bit, ayrı ayrı yollanmış olur. Bu yöntem *ikili modülasyon* adı verilir. Farklı olarak, modülatör  $b$  tane kodlanmış veri bitini tek seferde  $M=2^b$  tane farklı  $s_i(t)$  dalga şekli ile yollayabilir. Bu yöntemde  $b$  bitli her veri dizisi tek bir dalga şekline sahiptir. Bu yöntem *M-ary modülasyon* ( $M>2$ ) olarak isimlendirilir.

*Haberleşme kanalı* vericinin alıcıya yolladığı sinyalin ilerlediği fiziksel ortamdır. Kablosuz haberleşmede, kanal atmosfer olabilir. Diğer taraftan, telefon kanallarında genelde metal veya fiber-optik kablolar gibi farklı fiziksel malzemeler kullanılabilir. Veri iletiminde hangi fiziksel kanal kullanılırsa kullanılsın, ortak özellik yollanan sinyalin elektronik cihazların yaydığı termal gürültü, insan kaynaklı gürültüler, otomobillerin enjeksiyon gürültüleri, şimşek veya yıldırımların oluşturdukları gürültüler gibi rasgele ve çok değişken gürültülere maruz kalmasıdır.

Sayısal haberleşme sisteminin sonunda bulunan *sayısal demodülatör* birimi kanal bozulmasına uğramış olan işareti sayı dizilerinden oluşan bir dalga şekline dönüştürür. Bu dalga işareti kanal kod çözücüye iletilir. Kanal kod çözücü, kanal kodlayıcının kullandığı kodlama yönteminden yararlanarak, içerisinde ilave bitlerin olduğu orijinal veri dizisini yeniden oluşturur.

Son olarak, kaynak kod çözücü, kanal kod çözücü çıkışındaki veri dizisini alır ve kaynak kodlayıcının kullandığı kodlama yöntemi doğrultusunda kaynak tarafından üretilen orijinal sinyali yeniden oluşturur.

### 1.2.2. Haberleşme Kanalları ve Karakteristikleri

Bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi, haberleşme kanalı verici ile alıcı arasındaki bağlantıyı sağlar. Fiziksel kanal, elektrik sinyallerini taşıyan bir parça tel, üzerine bilgi modüle edilmiş bir ışını taşıyan optik fiber, bilginin akustik olarak iletiildiği okyanus altı bir kanal veya antenler vasıtasıyla bilginin elektromanyetik olarak yayıldığı bir atmosfer olabilir. Manyetik bant, manyetik disk ve optik diskler gibi veri saklama araçları da bir haberleşme kanalı gibi düşünülebilir [2].

Haberleşme kanalında sinyal iletimi sırasında karşılaşılan en yaygın problemlerden biri toplamsal gürültüdür. Genelde toplamsal gürültü, haberleşme sistemlerinde kullanılan dirençler ve katı haldeki elemanlar tarafından üretilir. Bu tip gürültüler bazen *termal gürültü* olarak da adlandırılırlar. Başka bir gürültü kaynağı da kanalı kullanan diğer kullanıcıların neden olduğu girişimlerdir. Gürültü ve girişimin istenen sinyalle aynı frekans bandında bulunduğu durumlarda, yollanan işaretin ve alıcı taraftaki demodülatörün uygun şekilde tasarlanması ile gürültünün ve girişimin neden olduğu bozulmalar en aza indirilebilir. Sinyal iletiminde karşılaşılan diğer bozucu etkiler sinyal zayıflaması, genlik ve faz bozulması ve çoklu yol (*multipath*) bozulmasıdır.

Yollanan sinyalin gücünün artırılması ile gürültünün etkileri azaltılabilir. Ancak teknik ve diğer pratik engeller yollanan işaretin gücü sınırlar. Diğer bir temel sınırlayıcı etken de mevcut bant genişliğidir. Bant genişliği, iletim ortamı ve verici-alıcıda kullanılan elektronik elemanlar nedeniyle sınırlıdır. Aşağıda farklı haberleşme kanallarının birkaç önemli karakteristiği tanımlanmıştır.

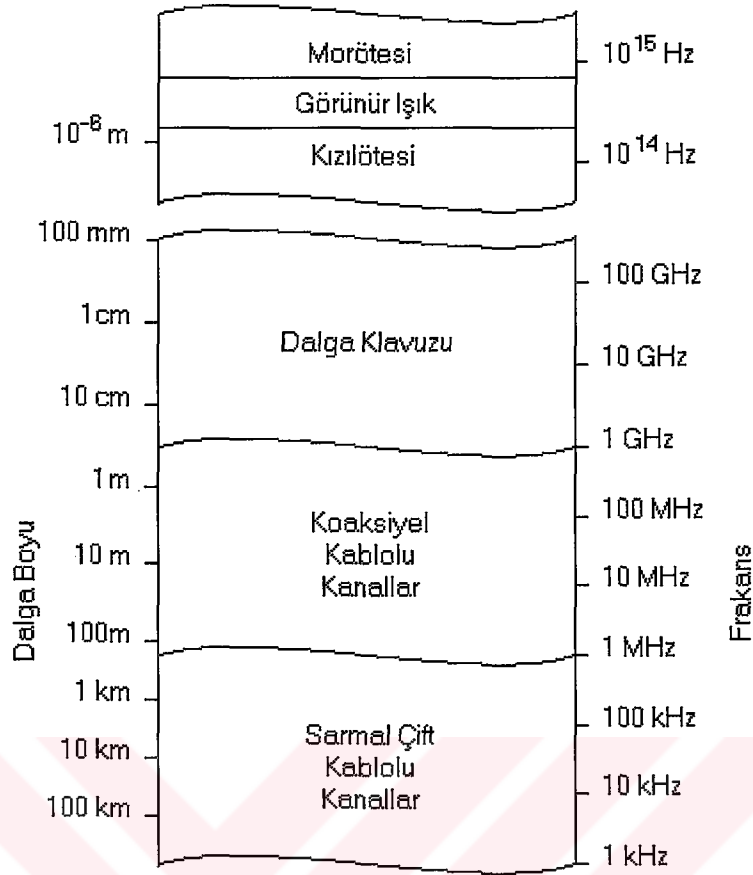
### **1.2.2.1. Kablolu Kanallar**

Telefon şebekesinde, ses iletimi için genelde kablolar kullanılmaktadır. Telefon hattı, genelde kullanıcıyı birkaç yüz kilohertzlik bant genişliği ile santrale bağlamakta kullanılır. Diğer taraftan koaksiyel kablolar birkaç megahertzlik bant genişlikleri için uygundur [2].

Bu tip kanallarda, yollanan sinyal gürültü nedeniyle hem genlik hem de faz bozulmasına uğrar. Sarmal çift kablolu kanallarda ayrıca diğer kanalların oluşturduğu girişimlerin etkisi görülür. Çünkü kablolu kanallar gündelik haberleşmelerimizde gerek ülkemizde gerekse dünyada yoğunlukla kullanılmaktadır. Kablolu kanallarda, sinyal iletimi sırasında karşılaşılan genlik ve faz bozulmalarını en aza indirmek için kanalın iletim özellikleri ve iletim yöntemleri üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır.

### **1.2.2.2. Fiber-Optik Kanallar**

Optik fiberler haberleşme sistem tasarımcılarına koaksiyel kablolu kanalların sağladığı bant genişliğinin birkaç katı büyüklüğünde bir bant genişliğini sunmaktadır. Son yirmi yıl boyunca, düşük sinyal zayıflatmalı optik fiber kablolar ve sinyal üretimi ve saptanmasını sağlayan yüksek güvenilirlikli fotonik aygıtlar geliştirildi. Bu teknolojik avantajlarından dolayı optik fiber kanallar hızlı bir gelişim süreci geçirdi. Fiber-optik kanalların büyük bant genişliklerine sahip olmaları, telefon şirketlerinin kullanıcılarına ses, veri, faks ve görüntü iletimi gibi geniş kapsamlı hizmetler vermesini sağladı [2].



Şekil 2. Kılavuzlu kablolu kanallar için frekans dizilimi [2].

Fiber-optik haberleşme sistemlerinde verici veya modölatör ışık yayan bir diyot (*LED, Light-Emitting Diode*) veya lazer olabilir. Veri farklı ışık yoğunluklarına sahip ışık kaynaklarının mesaj sinyalleri ile iletilir. Işık fiber içerisinde ışık dalgası şeklinde ilerler ve sinyal zayıflamalarına karşı iletim yolu üzerinde periyodik olarak güçlendirilir. Alıcıda, ışık şiddetine bağı olarak elektriksel çıkış veren fotodiyotlar vasıtasıyla ışık, elektriksel bir sinyale dönüştürölür. Fiber-optik kanallardaki gürölü kaynakları fotodiyotlar ve elektronik amplifikatörlerdir.

### 1.2.2.3. Kablosuz Elektromanyetik Kanallar

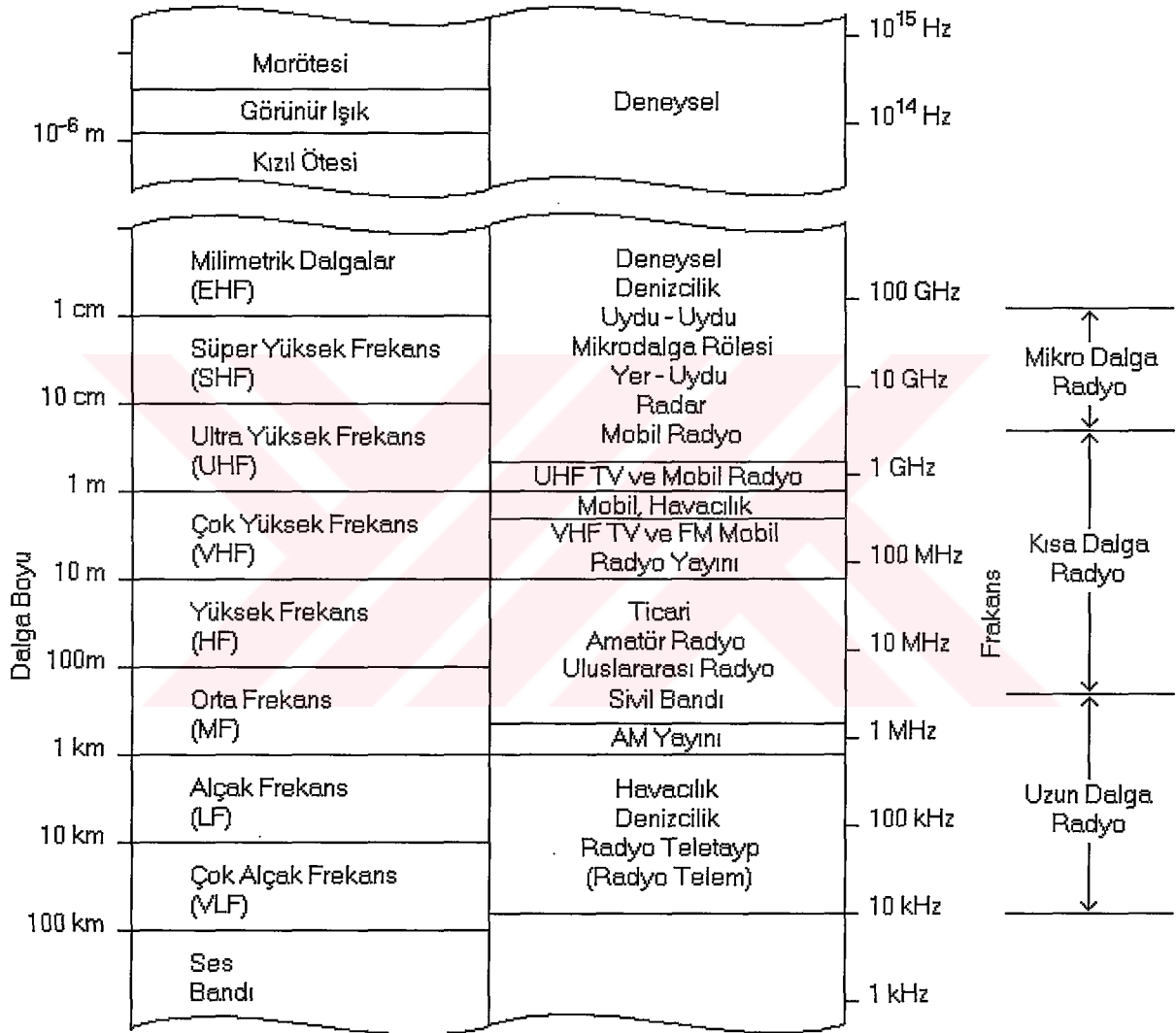
Kablosuz haberleşme sistemlerinde, elektromanyetik enerji iletim ortamına antenler vasıtasıyla aktarılır. Antenin fiziksel boyutu ve konfigürasyonu esas olarak çalışma frekansına bağıdır. Elektromanyetik dalganın verimli bir şekilde ışınımının sağlanması için  $\ell_A$  anten boyunun en az dalga boyunun  $1/10$ 'u kadar olması gerekir. Örneğin, genlik

modülasyonu (*AM, Amplitude Modulation*) kullanan bir radyo istasyonunun  $f_c = 1$  MHz çalışma frekansı için boyu en az 30 m olan bir anten kullanması gerekir [2].

$$\lambda = c/f_c = 300 \text{ m}$$

$$\ell_A = \lambda/10 = 30 \text{ m}$$

(1)



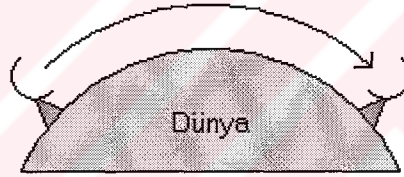
Şekil 3. Kablosuz elektromanyetik kanallar için frekans aralıkları [3].

Şekil 3.'de elektromanyetik spektrumun farklı frekans bantları görülmektedir. Elektromanyetik dalganın yayılım şekli yer dalgası yayılımı, gökyüzü dalgası yayılımı ve görüş hattı (*LOS, Line-Of-Sight*) yayılımı olmak üzere üç grup halinde incelenebilir. Çok alçak frekanslar (*VLF, Very Low Frequency*) ve ses frekans bandında olduğu gibi dalga



boyunun 10 km'yi aştığı durumlarda, yeryüzü ve iyonosfer elektromanyetik dalgalara, dalga kılavuzu görevi görür. Bu frekans aralığında, haberleşme sinyalleri kolaylıkla yerküre etrafında yayılabilir. Bu nedenle, bu frekans bantları özellikle denizcilikte sahil-gemi haberleşmesinde kullanılır. Bu frekans bantlarında kanal bant genişlikleri küçük ve bundan dolayı haberleşme hızları düşüktür. Bu durum sayısal haberleşme olanaklarını sınırlamaktadır. Bu frekans bandındaki baskın gürültü çeşidi, özellikle tropikal bölgelerde görülen gök gürültülü sağanak yağışların oluşturduğu gürültülerdir. Ayrıca bu frekans bandının birçok kullanıcı tarafından kullanılıyor olması girişimlere yol açar.

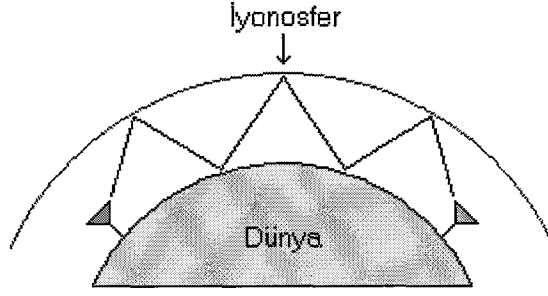
Yer dalgası yayılımı, Şekil 4.'de görülmektedir. Bu tip yayılıma çoğunlukla orta frekans (*MF, Medium Frequency, 0.3-3 MHz*) bandında rastlanmaktadır. Bu frekans bandı AM yayınları ve denizcilik radyoları tarafından kullanılır. AM yayıncılıkta, güçlü radyo istasyonları dışında yayın mesafesi 150 km'dir. Atmosferik gürültü, insan kaynaklı gürültü ve alıcıdaki elektronik elemanların oluşturduğu termal gürültü MF bandındaki başlıca bozucu etkilerdir.



Şekil 4. Yer dalgası yayılımı [2].

Gökyüzü dalgası yayılımı, Şekil 5.'de görülmektedir. Bu tip yayılımda, yeryüzünün yukarısında 50 ile 400 km aralığında bulunan yüklü parçacıklar tarafından oluşturulmuş iyonosfer, yansıtıcı olarak kullanılır. Gündüz boyunca güneş tarafında ısıtılan, atmosferin 120 km'ye kadar olan alt katmanının karakteristiği değişir. Bu alt katman özellikle D tabakası, 2 MHz'in altındaki frekansları soğurur. Bu durum AM radyo yayınlarının, gök yüzü dalgası yayılımı şeklinde yapılmasını önemli ölçüde sınırlar. Ancak gece boyunca iyonosferdeki elektron yoğunluğunun hızlı bir şekilde düşmesi, geceleyin gerçekleşen frekans soğurulmasının, gündüze göre belirgin bir şekilde azalmasını sağlar.





Şekil 5. Gök yüzü dalgası yayılımı [2].

Yüksek frekans (*HF, High Frequency*) değerlerinde, elektromanyetik dalgaların gökyüzü dalgası şeklinde yayılımında, en çok karşılaşılan problemlerden biri de sinyalin alıcıya farklı yollar izleyerek ulaşmasıdır. Bu durum sayısal haberleşme sistemlerinde iç sembol girişimine yol açar. Ayrıca sinyal parçalarının alıcıya farklı yolları izleyerek ulaşması, sinyal parçalarının alıcıda birbirlerini sönmülmesine yani *sinyal kaybolmasına (signal fading)* yol açar. Çoğu insan, geceleyin radyo dinlerken sesin birden gidip sonra tekrar geldiğine şahit olmuştur. Bunun nedeni sinyal kaybolmasıdır. Yüksek frekanslardaki toplamsal gürültü, atmosferik gürültü ile termal gürültünün bir kombinasyonudur.

Gökyüzü dalgası iyonosferik yayılım HF bandının sonu yani 30 MHz'in üstündeki frekans değerlerinde sona erer. Ancak sinyalin iyonosferin alt tabakalarından saçılması sağlanarak, 30-60 MHz frekans aralığında iyonosferik saçılımlı yayılım yapmak mümkündür. Ayrıca 40-300 MHz frekans aralığında troposferik saçılım kullanılarak, birkaç yüz mil mesafeli haberleşme yapmak da mümkündür. Fakat bu tip yayılımda sinyal zayıflatması fazla olduğu için büyük güçlü vericilere ve nispeten büyük antenlere ihtiyaç duyulur.

30 MHz'in üstündeki frekans değerinde iyonosferin içinden sinyal iletilmesi nispeten küçük kayıplarla gerçekleştirilebilir. Bu nedenle çok yüksek frekanslarda (*VHF, Very High Frequency*) daha ziyade LOS yayılımı kullanılır. LOS yayılımı kullanılan karasal haberleşme sistemlerinde, verici ve alıcı antenlerin arada küçük veya hiçbir engel olmadan birbirlerini görmeleri gerekir. Dolayısıyla VHF ve ultra yüksek bant (*UHF, Ultra High Frequency*) televizyon vericileri yüksek kulelerin tepelerine yerleştirilir.

Genelde LOS yayılımının kapsama alanı yer kabuğunun eğimi ile sınırlandırılır. Eğer verici anten yerden  $h$  m yüksekliğe yerleştirilmiş ve arada herhangi bir fiziksel engelin bulunmadığı kabul edilirse,  $d$  yayın ufku yaklaşık olarak

$$d = \sqrt{15h} \text{ km} \quad (2)$$

formülü ile kolayca hesaplanabilir. Örneğin 300 m yüksekliğe monte edilmiş bir televizyon anteninin yayın ufku yaklaşık olarak 67 km'dir. Benzer şekilde, 1 GHz'in üstündeki frekanslarda telefon ve görüntü iletiminde kullanılan mikrodalga röle sistemlerinin antenleri de yüksek kulelerin veya binaların tepelerine yerleştirilir.

VHF ve UHF frekanslarında haberleşme sisteminin performansını sınırlayan gürültü kaynakları, alıcı girişinde oluşan termal gürültü ve antende yoğunlaşan kozmik gürültüdür. 10 GHz'in üstündeki süper yüksek frekans (*SHF, Super High Frequency*) bandında atmosferik şartlar önemli bir rol oynar. Örneğin 10 GHz'de hafif yağmurun oluşturduğu sinyal zayıflatması (*attenuation*) kilometre başına 0.003 dB/km iken şiddetli yağmurun oluşturduğu zayıflatma kilometre başına 0.3 dB/km'dir. Benzer şekilde 100 GHz'de hafif yağmur kilometre başına 0.1 dB/km, şiddetli yağmur ise 6 dB/km zayıflamaya yol açar. Bu frekans aralığında şiddetli yağmur, haberleşme servisinin tamamen durmasına yol açabilecek çok büyük sinyal zayıflamalarına sebep olabilir.

Aşırı derecede yüksek frekans (*EHF, Extremely High Frequency*) bandının üzerinde yer alan kızıl ötesi ve görünür ışık bölgeleri, atmosferde LOS optik haberleşme uygulamalarında kullanılabilir. Bu frekans bantları uydudan uduya bağlantı gibi araştırma amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır.

#### 1.2.2.4. Sualtı Akustik Kanallar

Elli yılı aşkın bir süredir, okyanus araştırma çalışmaları istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Bu çalışmalarda, sualtındaki sensörlerin topladığı verilerin sağlıklı bir şekilde okyanus yüzeyine iletilmesi gerekmektedir. Bu noktada, verilerin uydular vasıtasıyla veri toplama merkezlerine iletilmesi mümkündür [2].

Aşırı derecede düşük frekanslar (*ELF, Extremely Low Frequency*) dışında elektromanyetik dalgaların suyun derinliklerine iletilmesi mümkün değildir. Ancak sinyalin ELF frekanslarda iletimi, güçlü vericiler gerektirdiği için oldukça masraflıdır. Elektromanyetik dalgaların su altındaki zayıflaması *dalma derinliği (skin depth)* terimi ile açıklanabilir. Bu sinyalde 1/e oranı kadar zayıflatma meydana getirecek mesafe demektir. Dalma derinliği

$$\delta = 250/\sqrt{f} \quad (3)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada frekans  $Hz$  cinsinden, dalma derinliği ise  $m$  cinsinden tanımlanmaktadır. Örneğin 10 kHz için dalma derinliği 2,5 m'dir. Buna karşın akustik dalgalarla suyun yüzlerce kilometre altına sinyal iletmek mümkündür.

Su altı akustik kanal sinyalin yüzeyden ve deniz dibinden yansımından dolayı çok yollu kanal gibi karakterize edilir. Çünkü dalga hareketleri, sinyal parçalarının farklı yayılma gecikmelerine sahip olmalarına ve bunun sonucunda da sinyal kaybolmasına yol açar. İlave olarak sinyal zayıflaması haberleşme frekansının karesi ile orantılıdır. Normalde ses hızı 1500 m/s'dir. Fakat bu değer sinyalin yayıldığı derinliğe göre artar veya azalır.

Akustik okyanus ortam gürültüsü karidesler, balıklar ve çeşitli memeliler tarafından meydana getirilir. Liman yakınlarında ortam gürültüsüne, ek olarak insan kaynaklı gürültüler de ilave olur. Tüm bu bozucu etkilere karşın sayısal sinyallerin uzun mesafelere aktarılması için verimli ve yüksek doğruluklu sualtı akustik haberleşme sistemlerinin tasarlanması mümkündür.

#### 1.2.2.5. Depolama Kanalları

Bilgi depolama ve geri dönüşüm sistemleri, günlük veri saklama işlemlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Manyetik bantlar, büyük miktarlarda bilgisayar verilerinin depolanmasında kullanılan manyetik diskler, bilgisayar verilerinin saklanmasında kullanılan optik diskler ve kompakt diskler haberleşme kanalları olarak karakterize edilebilir. Manyetik bant veya manyetik disk ve optik disklerde veri saklama işlemi, bir sinyalin telefon veya radyo kanalında iletilmesi ile eşdeğer işlemlerdir. Geri okuma ve sinyal işleme yöntemlerinin kullanılması gereken veri kurtarma işlemleri, telefon veya radyo haberleşmesinde yollanan sinyalin geri kazanılması işlemleri ile eşdeğer işlemlerdir [2].

Depolama sistemlerinde geri okuma işlemi sırasında, genelde elektronik elemanlar tarafından üretilen toplamsal gürültü ve komşu trakların oluşturdukları girişimlerle karşılaşılır.

Depolanabilecek veri miktarı genelde, manyetik disk veya bant boyutu ve yoğunluğu tarafından sınırlandırılır. Veri depolama yoğunluğu okuma-yazma sitemlerinin elektronik kısımlarına ve okuma-yazma kafalarına bağılı olarak değişmektedir. Veri yoğunluğu  $10^9$  bir bölü inç kare şeklinde ifade edilebilir. Veri depolama hızı, verinin depolandığı ortama, depolanma şekline ve depolama aygıtının elektriksel ve mekanik birimlerine bağılı olarak değişmektedir.

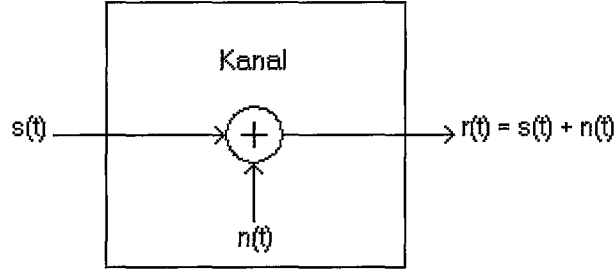
İyi tasarlanmış sayısal manyetik veya optik depolama sisteminin, temel öğeleri kanal kodlama ve modülasyon birimleridir. Geri okuma işleminde sinyal demodüle edilir ve alınan sinyaldeki ilave kısımlar yardımı ile gerekli düzeltmeler yapılarak istenen sinyal elde edilir.

### 1.2.3. Haberleşme Kanallarının Matematiksel Modelleri

Fiziksel ortamlarda veri iletimi için haberleşme sistemi tasarımında, iletim ortamının en önemli karakteristiklerini yansıtan matematiksel modellerin oluşturulmasını kullanışlı bulduk. Sonra kanal için oluşturulan matematiksel model, vericideki kanal kodlayıcı ve modülatör ve alıcıdaki demodülatör ve kanal kod çözücü tasarımlarında kullanıldı. Aşağıda uygulamada karşılaştığımız birçok fiziksel kanalın karakterize edilmesinde sıklıkla kullanılan kanal modellerinin kısaca tanımlamaları verilmiştir [2].

#### 1.2.3.1. Toplamsal Gürültülü Kanal

Şekil 6.'da görülen toplamsal gürültülü kanal en basit matematiksel modeldir. Bu modelde verici sinyali  $s(t)$ , toplamsal rasgele gürültü  $n(t)$  tarafında bozulur. Fiziksel olarak toplamsal gürültü, elektronik elemanlar ve haberleşme sisteminin alıcı tarafındaki kuvvetlendiriciler veya sinyal iletimi sırasında maruz kalınan girişimler tarafından oluşturulur [2].



Şekil 6. Toplamsal gürültülü kanal [2].

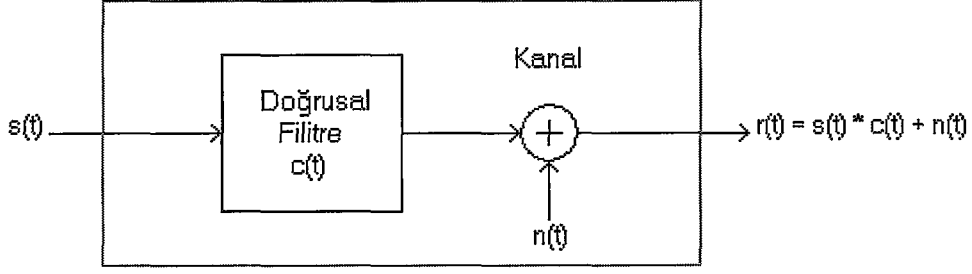
Eğer gürültü esas olarak elektronik elemanlar ve alıcı tarafındaki kuvvetlendiriciler tarafında oluşturuluyorsa termal gürültü olarak karakterize edilirler. Bu tip gürültüler *Gaussian gürültü (Gaussian noise)* olarak da karakterize edilebilir. Bu nedenle kanalın matematiksel modeli genellikle *toplamsal Gaussian gürültülü kanal (additive Gaussian noise channel)* olarak isimlendirilir. Matematiksel uyumluluğu nedeniyle haberleşme sistem analizinde ve tasarımında yaygın olarak kullanılan bu kanal modeli, birçok fiziksel haberleşme kanalı için kullanılabilir. Kanal zayıflatması bu modele kolaylıkla eklenebilir. Sinyalin iletim esnasında zayıflaması durumunda alınan işaret

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t) \quad (4)$$

şekline ifade edilebilir. Burada  $\alpha$  zayıflama faktörüdür.

### 1.2.3.2. Doğrusal Filtre Davranışlı Kanal

Kablolu telefon kanalları gibi bazı fiziksel kanallarda, verici sinyalinin diğer sinyaller üzerinde girişime yol açmaması için bant genişliği filtreler kullanılarak sınırlandırılır. Bu tip kanallar genellikle matematiksel olarak *toplamsal gürültülü doğrusal filtre davranışlı kanal (linear filter channel with additive noise)* olarak karakterize edilir [2].



Şekil 7. Toplamsal gürültülü doğrusal filtre davranışlı kanal [2].

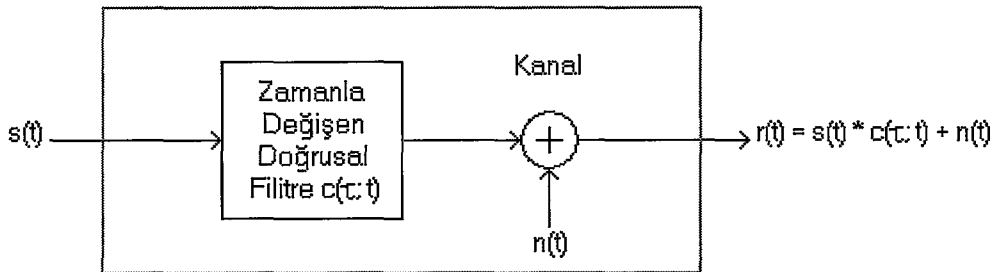
Bu durumda  $s(t)$  giriş sinyali için  $r(t)$  kanal çıkış sinyali

$$r(t) = s(t) * c(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $c(t)$  doğrusal filtrenin darbe cevabı ve  $*$  katlama (*convolution*) işlemidir.

### 1.2.3.3. Zamanla Değişen Doğrusal Filtre Davranışlı Kanal

Kanala verilen sinyalin, zamanla değişen çok yönlü bir yayılıma sahip olduğu sualü akustik kanalları ve iyonosferik radyo kanalları gibi kanallar, matematiksel olarak *zamanla değişen doğrusal filtre davranışlı kanallar (linear time-variant filter channel)* olarak karakterize edilebilir. Bu tip filtreler, zamanla değişen darbe cevabı  $c(\tau; t)$  ile karakterize edilirler. Burada  $c(\tau; t)$ , kanalın  $t - \tau$  anında kanala uygulanan darbeye  $t$  anında vermiş olduğu cevaptır.  $\tau$  ise *geçen zamanı (elapsed-time)* temsil eder. Topalsal gürültülü zamanla değişen doğrusal filtre davranışlı kanal Şekil 8.'de görülmektedir [2].



Şekil 8. Topalsal gürültülü zamanla değişen doğrusal filtre davranışlı kanal [2].

Giriş sinyali  $s(t)$  için kanal çıkış sinyali  $r(t)$

$$r(t) = s(t) * c(\tau; t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau; t) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Çok yollu sinyal yayılımına sahip iyonosfer ve mobil hücresel radyo kanalları gibi fiziksel kanallar için zamanla değişen darbe cevabı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$c(\tau; t) = \sum_{k=1}^L a_k(t) \delta(\tau - \tau_k) \quad (7)$$

Burada  $a_k(t)$ ,  $L$  tane çok yollu yayılım için olası zamanla değişen zayıflatma faktörünü ve  $\tau_k$  ise zaman gecikmesini temsil eder. (7) numaralı formül (6) numaralı formül gibi ifade edilirse,  $r(t)$  alınan işaret aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$r(t) = \sum_{k=1}^L a_k(t) s(t - \tau_k) + n(t) \quad (8)$$

Burada alınan sinyal, her biri  $\tau_k$  kadar gecikmiş,  $a_k(t)$  kadar zayıflamış  $L$  tane sinyal parçasından oluşmaktadır.

Böylelikle pratikte karşılaşılan fiziksel kanalların büyük çoğunluğunu modelleyebilecek üç tane matematiksel kanal modeli tanımlanmış oldu.

#### 1.2.4. Sayısal Haberleşmenin Tarihçesi

İlk elektriksel haberleşme şekli olan *telgraf* bir sayısal haberleşme sistemidir. Samuel Morse tarafından geliştirilen telgrafın tanıtımı 1837 yılında yapılmıştır. Morse, İngiliz alfabesindeki harfleri temsil etmek için nokta ve tire dizilerinden oluşan farklı uzunluklardaki ikili kodlar tasarladı. Bu kodlamada, sıkça kullanılan harfler kısa kodlarla, az kullanılan harfler ise uzun kodlarla temsil edilmiştir. Bu özelliğinden dolayı *Mors kodu*, *farklı uzunluklu kaynak kodlama yöntemlerinin (variable-length source coding methods)* ilki olarak kabul edilir [2].



Yaklaşık kırk yıl sonra 1875’de Emile Baudot, telgraf sistemi için her biri beş bitten oluşan sabit uzunluklu bir kod geliştirdi. *Baudot kodda*, kod parçaları eşit uzunluklu boşluklar ve çizgilerden oluşmaktaydı.

Her ne kadar ilk elektriksel sayısal haberleşme sistemini Morse tasarlamış olsa da modern sayısal haberleşme sistemleri Nyquist’in çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır [4]. Nyquist bu çalışmasında, iç sembol girişimi olmadığı durumda verilen bir bant genişliğinde, telgraf kanalı üzerinden gerçekleştirilebilecek en yüksek sinyal oranını belirlemeye çalışmıştır. Bu çalışmasında telgraf sistemi için bir model geliştirmiştir. Bu modelde, yollanan sinyalin genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT) \quad (9)$$

Burada  $g(t)$  temel darbe şeklini,  $a_n$  ise  $1/T$  bit/s veri hızında yollanan ikili veri dizisini temsil etmektedir. Nyquist  $W$  Hz’lik bir bant genişliğinde kullanılabilen en iyi darbe şeklini ve  $k/T$  örnekleme zamanında herhangi bir iç sembol girişimine yol açmadan elde edilebilecek en büyük bit oranını tespit etmeye çalışmıştır. Çalışmalarıyla, ulaşılabilecek en büyük darbe oranının  $2W$  darbe/s olabileceği ortaya koymuştur. Bu oran *Nyquist oranı* olarak adlandırılmaktadır. Nyquist’in sonuçları, sonradan *Shannon* tarafında ortaya konan sınırlandırılmış bant sinyalleri için örnekleme teoreminin sonuçları ile eşdeğerdir [5]. Bu teorem  $2W$  örnek/s örnekleme oranı ile örneklenen  $W$  bant genişlikli bir işaretin, interpolasyon formülü kullanılarak, tekrar oluşturulabileceğini ortaya koymuştur.

$$s(t) = \sum_n s\left(\frac{n}{2W}\right) \frac{\sin[2\pi W(t - n/2W)]}{2\pi W(t - n/2W)} \quad (10)$$

Nyquist’in çalışmaları ışığında, Hartley farklı genlik seviyeleri kullanılarak sınırlandırılmış bant genişliğine sahip bir kanal üzerinden iletilebilecek veri miktarını belirlemeye çalıştı [6]. Hartley, alıcının alınan sinyal genliğini  $A_\delta$  doğrulukla kestirebileceğini varsaydı. Bu varsayıma yola çıkan Hartley,  $A_{\max}$  maksimum sinyal genliği ve  $A_\delta$  genlik çözünürlüğü ile sınırlandırılmış bant genişlikli kanallarda, maksimum veri hızında güvenilir haberleşme yapılabileceği sonucuna vardı.



Haberleşmenin gelişimindeki diğer önemli gelişmeler, 1939 yılında Kolmogorov ve 1942 yılında Wiener tarafından yapılan çalışmalardır [7, 8]. Bu çalışmalarda, istenen sinyal şeklinin ( $s(t)$ ), toplamsal gürültü ( $n(t)$ ) nedeniyle bozulan, alınan işaretten ( $r(t) = s(t) + n(t)$ ) elde edilmesi amaçlanmıştır. Kolmogorov ve Wiener, sinyal demodülasyonunda karşılaşılan bu problemi çözmek için *optimum filtre* (*optimum filter*) olarak bilinen, doğrusal bir filtre geliştirmişlerdir.

Hartley ve Nyquist'in maksimum sayısal bilgi transferi ile ilgili çalışmaları Shanon'un 1948 yılındaki çalışmalarının ilham kaynağı olmuştur [5, 9]. Shanon bu çalışmalarında, bilgi iletiminin matematiksel esaslarını kurmuş ve sayısal haberleşme sisteminin asıl sınırlarını tespit etmiştir. Shanon, istatistiksel koşullardaki bilgilerin iletiminde karşılaşılan temel problemleri, bilgi kaynağının ve haberleşme kanalının olasılıksal modellerini kullanarak çözmüştür. Aynı zamanda, verici gücü, bant genişliği ve toplamsal gürültünün etkilerini kanal ile ilişkilendirmiş ve hepsini *kanal kapasite* (*channel capacity*) olarak bilinen tek bir parametre altında toplamıştır. Örneğin ideal  $W$  bant genişlikli, beyaz Gaussian gürültülü bir kanalın kanal kapasitesi ( $C$ ) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{P}{WN_0} \right) \quad (11)$$

Burada  $P$  ortalama verici gücü,  $N_0$  toplamsal gürültünün güç yoğunluğudur. Kanal kapasitesinin önemi şu şekilde açıklanabilir. Eğer kaynağı veri hızı  $R$ ,  $C(R < C)$ 'den küçük ise teorik olarak uygun kodlama yapılarak, kanalda güvenilir bir şekilde veri iletişimi yapmak mümkündür. Eğer  $R > C$  ise güvenilir haberleşme, verici ve alıcıdaki sinyal işleme miktarı ne olursa olsun mümkün değildir. Böylelikle Shannon, veri iletişimin sınırlarını tespit etmiş ve bugün *bilgi teorisi* (*information theory*) olarak bilinen yeni bir alanın doğmasını sağlamıştır.

Sayısal haberleşme alanındaki bir diğer önemli gelişme, 1947 yılında Kotelkinov'un yaptığı çalışmalardır [10]. Kotelkinov, geometrik yaklaşımla çeşitli sayısal haberleşme kanallarının analizini yapmıştır. Kotelkinov'un bu yaklaşımı, 1965 yılında Wozencraft ve Jacobs tarafından yapılan çalışmalarla daha da genişletilmiştir [11].

Shannon'un yayınlarını, Hamming'in kanal gürültüsünün bozucu etkilerini ortadan kaldırmaya yönelik olarak yapmış olduğu hata yakalama ve hata düzeltme kodları üzerine

olan klasik çalışmaları izlemiştir [12]. Hamming'in çalışmaları, modern haberleşme sistemlerinde bugün bile kullanılan çeşitli kodlama tekniklerini geliştiren birçok araştırmacıya, ışık kaynağı olmuştur.

Son otuz-kırk yıl boyunca, haberleşme ihtiyaçlarının artması ve gelişmiş entegre devrelerin üretilmesi, çok verimli ve daha güvenilir sayısal haberleşme sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Shannon ve bilgi teorisine katkıda bulunan diğer araştırmacıların elde ettikleri teorik limitler, daha gelişmiş haberleşme sistemlerini tasarlamamız ve geliştirmemiz için bize nihai hedefler olmuştur.

Shannon, Kotelkinov ve Hamming'in çalışmalarının ardından sayısal haberleşme alanında bir çok gelişmeler yaşanmıştır. Bunlardan çok önemli olan bazıları aşağıda verilmiştir.

- 1954 Muller, 1954 Reed, 1960 Reed ve Solomon, 1960 Bose ve Ray-Chaudhuri, ve 1970-1971 Goppa tarafında yapılan çalışmalarla blok kodların geliştirilmesi [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].
- 1966 yılında dönüşlü kodların Forney tarafından geliştirilmesi [20].
- Bose-Chaudhuri-Hozquenghem (*BCH*) kodlarının verimli bir şekilde çözümlenmesi [21, 22].
- 1961 Wozencraft ve Reiffen, 1963 Fano, 1966 Zigangirov, 1969 Jelinek, 1970-1974 Forney ve 1967-1971 Viterbi tarafında yapılan çalışmalarla katlamalı kodlama yöntemlerinin ve bu kodların çözüm algoritmalarının geliştirilmesi [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31].
- 1982 Ungerboeck, 1984 Forney ve diğerleri ve 1987 Wei tarafında yapılan çalışmalarla trellis kodlamalı modülasyon tekniğinin bulunması [32, 33, 34].
- 1977-1978 Ziv ve Lempel ve 1980 Linde ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışmalarla veri sıkıştırma uygulamaları için verimli kaynak kodlama yöntemlerini geliştirilmesi [35, 36, 37].
- 1993 yılında turbo kodların ve bunların iteratif kod çözümünün Berrou ve diğerleri tarafından geliştirilmesi [38].

Geçen yüzyıl boyunca radyo ve haberleşmenin tarihsel gelişimi, birkaç farklı şekilde ele alınmıştır [2]. Bunlar McMahan, Milman ve Ryder-Fink'in kitaplarında bulunabilir [39, 40, 41]. Shannon tarafından toplanan yayınlar önce 1963 yılında Dobrushin ve Lupanov tarafından düzenlenip Rusya'da bastırılmış, sonra 1993'de Slona ve Wyner tarafından düzenlenip, IEEE tarafında bastırılmıştır [42, 43]. Berlekam ve Slepian tarafında

düzenlenen benzer bir diğer çalışma da 1974 yılında yine IEEE tarafından bastırılmıştır [44, 45].

### 1.3. İletim ve Dağıtım Şebekeleri

Elektrik enerjisini üretmeye, iletmeye, dağıtmaya ve tüketmeye yarayan ve bir yerde birbirine bağlanan, elektrikli işletme gereçlerinin tümüne *elektrik tesisleri* denir [46].

Aynı anma gerilimli, birbirine bağlı elektrik tesislerinin tümüne *şebeke* denir. İletimde kullanılan şebekelere *iletim şebekeleri*, dağıtımda kullanılan şebekelere de *dağıtım şebekeleri* adı verilir.

Elektrik iletim ve dağıtım şebekeleri, elektrik enerjisinin üretilmesinden tüketilmesine kadar enerjinin kesintisiz ve güvenilir bir şekilde iletilip dağıtılmasına uygun olmalıdır.

Elektrik şebekeleri çok iyi planlanmış ve kurulmuş olmalıdır. Şebekede oluşacak arızalar ve olumsuz etkiler tüketicileri ve alıcıları etkilememelidir. Dağıtım şebekelerinde hat başında, hat ortasında ve hat sonunda bulunan abonelerin hepsi aynı özellikte (*sabit gerilim ve frekansta*) elektrik enerjisini kullanabilmelidir.

Elektrik şebekeleri her an değişen koşullara ve güçlere cevap verebilmelidir.

#### 1.3.1. Gerilimlere Göre Şebeke Çeşitleri

Elektrik şebekeleri kullanıldıkları gerilimlere göre dört gruba ayrılır [46].

1. Alçak gerilim şebekeleri (*1V-1000 V arası*)
2. Orta gerilim şebekeleri (*1 kV-35 kV arası*)
3. Yüksek gerilim şebekeleri (*35 kV-154 kV arası*)
4. Çok yüksek gerilim şebekeleri (*154 kV'dan fazla*)

##### 1.3.1.1. Alçak Gerilim Şebekeleri

Alçak gerilim şebekeleri 1 V ile 1000 V arası gerilime sahip olan şebekelerdir. Bu şebekeler dağıtım trafolarından tüketicilere kadar olan elektrik hatlarından oluşur. Alçak gerilim şebekeleri yalıtımı ve korunması kolay olduğu için abonelere yakın kısımlarda

kurulur. Alçak gerilimle yapılan iletimlerde gerilim düşümü ve güç kaybı fazla olduğu için alçak gerilim iletimden ziyade dağıtım şebekelerinde kullanılır [46].

Ülkemizde alçak gerilim, abonelerde 220 V ve 380 V olarak kullanılır.

### **1.3.1.2. Orta Gerilim Şebekeleri**

Orta gerilim şebekeleri 1 kV ile 35 kV arasındaki gerilimi kullanan şebekelerdir. Bu şebekeler yüksek ve çok yüksek gerilim şebekeleri ile alçak gerilim şebekelerinin birbirine bağlanması işleminde kullanılır. Yüksek gerilimlerin direkt olarak abonelere verilmesi izolasyon ve güvenlik açısından uygun değildir. Bu sebeple yüksek gerilimler uygun değerlere indirilerek orta gerilim şebekelerine bağlanır. Orta gerilim şebekeleri küçük şehirler ve sanayi bölgelerine elektrik enerjisinin taşınmasında kullanılır. Orta gerilimler şehirlerin girişindeki dağıtım trafolarına bağlanır. Buradan abonelere dağıtılır. Türkiye'de kullanılan orta gerilim şebekelerinde 10, 15 ve 33 kV'lik gerilimler kullanılmaktadır. Orta gerilim şebekelerinde kullanılan hattın uzunluğuna göre hat gerilimi tespit edilir. Buna göre şu genellemeyi yapabiliriz. 10 km'ye kadar olan uzunluklarda 3 kV-10 kV, 20 km ile 30 km arasındaki uzunluktaki hatlarda 10 kV-20 kV, 30 km ile 70 km arasındaki uzaklıklarda 20 kV-35 kV'luk gerilimlerin kullanılması uygun olurken 70 km'yi geçen uzunluktaki hatlarda yüksek gerilimler kullanılmaktadır [46].

### **1.3.1.3. Yüksek Gerilim Şebekeleri**

Yüksek gerilim şebekeleri 35 kV ile 154 kV arasındaki gerilimi kullanan şebekelerdir. Elektrik enerjisinin üretildiği santrallerden başlayan ve büyük şehirler ile bölgelerin başlangıcı arasında kullanılan şebekelerdir [46].

Yüksek gerilimde dağıtım yapılmaz. Yüksek gerilimler iletime en uygun gerilimlerdir. Çok uzak mesafelere enerji iletiminde alçak gerilimlerde güç kaybı çok olurken yüksek gerilimlerde güç kaybı az olduğu için yüksek gerilimler çoğunlukla iletim şebekelerinde kullanılır. Türkiye'de kullanılan yüksek gerilim değerleri 66 kV ve 154 kV'tur.

Örneğin Kuzey-Batı Anadolu şebekesi 154 kV'luk gerilimle Güney Anadolu şebekesi de 66 kV'luk gerilimle beslenmektedir. Yüksek gerilim şebekelerinde 70 km-150

km arasındaki uzaklıklarda 60 kV-100 kV, 150 km-230 km arasındaki uzaklıklarda 100 kV-154 kV ve 230 km'den uzun hatlarda ise çok yüksek gerilimler kullanılır.

#### 1.3.1.4. Çok Yüksek Gerilim Şebekeleri

Çok yüksek gerilim şebekeleri 154 kV'un üstündeki gerilimi kullanan şebekelerdir. Türkiye'de çok yüksek gerilim olarak 380 kV kullanılmaktadır. Bazı yabancı ülkelerde 500 kV ve 750 kV'a kadar gerilimler kullanılmaktadır. Şehirlerarası ve santraller arası bağlantılar için çok yüksek gerilim şebekeleri tesis edilir. Ülkemizde Atatürk Barajı'ndan İstanbul'a hatta İzmir'e kadar uzanan 380 kV gerilimli şebeke mevcuttur [46].

#### 1.3.2. Dağıtım Şekillerine Göre Şebeke Çeşitleri

Elektrik enerjisinin üretildiği santraller çoğu zaman yerleşim birimlerine uzak olur. Bazı yerlerde ise hiç santral yoktur. Bu sebeple üretilen elektrik enerjisini iletmek yani taşımak gerekir. Elektrik enerjisinin tüketicilere ulaştırılması için tesis edilen iletim ve dağıtım şebekeleri iletim ve dağıtımın yapılacağı şehir, sanayi, köy ve benzeri yerlerin özelliklerine göre en uygun, güvenli ve kesintisiz enerji verebilecek nitelikte elektrik şebekeleri tesis etmek gerekir [46].

Elektrik şebekeleri köy, kasaba, şehir ve benzeri durumdaki yerleşim veya iş merkezlerinde bulunan alıcıların elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak için tesis edilen ve çok sayıda hat parçalarının bir araya gelmesinden oluşan bir hatlar topluluğu olarak düşünülebilir.

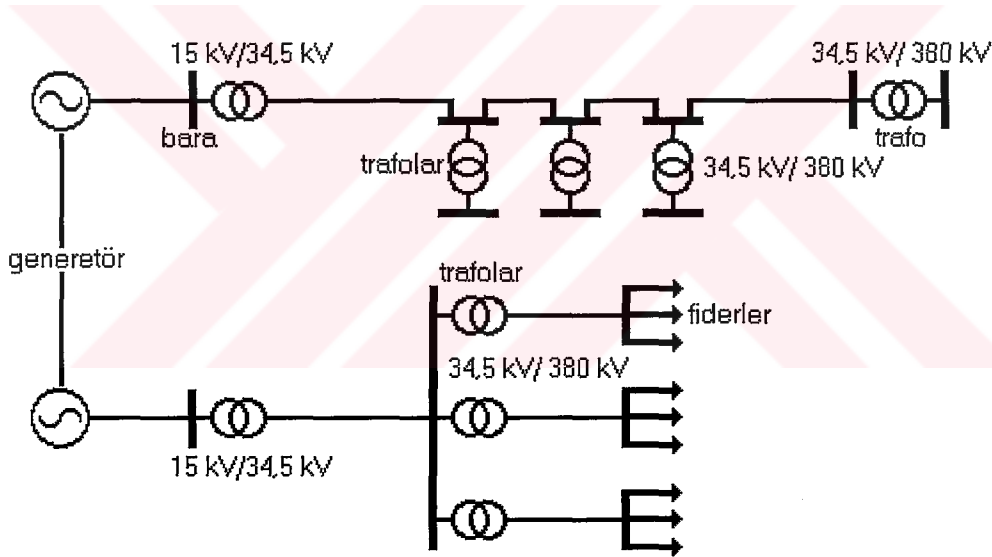
Yerleşim birimleri ve sanayilerdeki cadde, yol, meydan ve geçitler boyunca döşenen hat parçalarının birbirine eklenmesinden *kollar* ve kolların birbirine eklenmesinden de *dağıtım şebekeleri* meydana gelir. Elektrik şebekelerinin kurulmasında alıcıların teknik yönden uygun, ekonomik ve ergonomik bir şekilde beslenmesi ana kuraldır. Bu kuralları yerine getirebilmek için değişik şebeke sistemleri geliştirilmiştir. Dağıtım şekillerine göre en uygun olan ve kullanılan şebeke sistemleri şunlardır:

1. Dallı şebekeler
2. Halka şebekeler
3. Ağ şebekeler
4. Enterkonnekte şebekeler

### 1.3.2.1. Dalı Şebekeler ve Özellikleri

Yerleşim merkezleri, sanayi merkezleri, şehir, kasaba ve köy gibi yerlerde beslemesi genellikle tek kaynaktan yapılan ve şekli ağaç dallarına benzeyen şebeke türüne *dalı şebeke* denir. Dalı şebekede elektrik enerjisinin dağıtılacağı yerin yük bakımından ağırlık merkezlerine dağıtım trafoları yerleştirilir. Bu trafonun etrafındaki alıcılara elektrik enerjisi, bir ağacın dalları gibi önce ana kollara daha sonra ince kollara ve dallara ayrılarak son alıcıya kadar ulaştırılır. Dağıtım şekli bir ağacın dallarına benzediği için bu şebeke tipine *dalı (dalbudak) şebeke* denir [46].

Dalı şebekede dağıtım trafosuna yakın olan kısımlarda kullanılan ve kalın kesitli hatlara *ana hat* denir. Trafodan uzaklaştıkça incelen ve son alıcıya kadar ulaşan hatlara da *bransman hatları* denir.



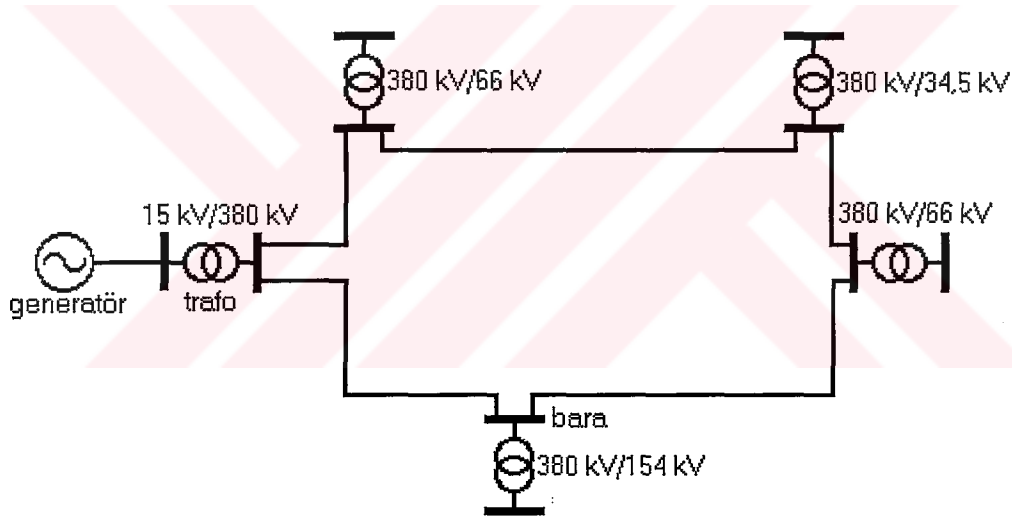
Şekil 9. Değişik tipte dalı şebekeler [46].

Dalı şebekeler, tesis bedellerinin ucuz, bakım ve işletmelerinin kolay olması, oluşan arızaların kolay tespit edilmesi gibi nedenlerden dolayı tercih edilir. Bu avantajları yanında sakıncalı olan yanları da vardır. Dalı şebekelerde emniyet azdır ve arıza olduğunda çok sayıda abone enerjisiz kalabilir. Hatlarda gerilim eşitliği yoktur ve dağıtım trafosundan uzaklaştıkça alıcılara ulaşan gerilim düşmektedir.

### 1.3.2.2. Halka Şebekeler ve Özellikleri

Şehir, kasaba, köy ve sanayi merkezlerinde uygulanan, beslemenin birden fazla trafo ile yapıldığı ve bütün trafoların birbirine paralel şekilde kapalı bir sistemi oluşturduğu şebeke tipine *halka şebeke* denir [46].

Halka şebekelerde besleme birden fazla trafo ile yapıldığı için halka içerisinde bir arıza olması halinde, sadece arıza olan kısım devre dışı kalarak çok az sayıda abonenin enerjisiz kalması sağlanır. Halka içerisindeki elektrik hatlarının kesitleri her yerde aynıdır. Bu sebeple tesis maliyeti yüksektir. Dallı şebekelere göre daha güvenlidir. Fakat alıcıların artmasıyla hatların çekilen akımı taşımaması durumunda tesisin yenilenmesi çok pahalıya mal olur. Çünkü halka şebekelerdeki tüm hatların değiştirilmesi gereklidir. Dallı şebekelerde ise akımı fazla olan hattın değiştirilmesi yeterli olacaktır.



Şekil 10. Halka şebeke [46].

### 1.3.2.3. Ağ Şebekeler ve Özellikleri

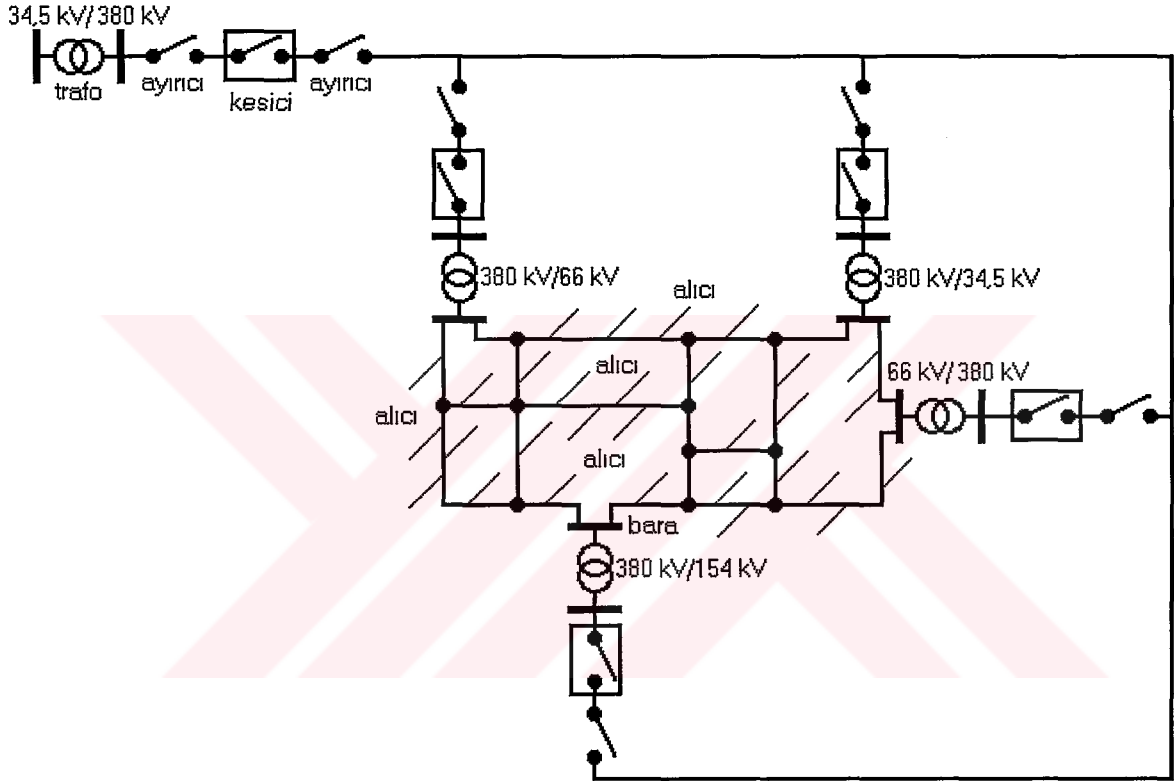
Şehir, kasaba, köy ve sanayi merkezlerinde uygulanabilen, beslemenin birden fazla trafo ile yapıldığı ve alıcıları besleyen hatların bir ağ gibi örülerek, gözlerin oluşturulduğu şebeke tipine *ağ şebeke* denir [46].

Ağ şebekelerde, halka şebekeler gibi beslemenin sürekli yapılabildiği, arızanın sadece arıza olan yeri etkilediği bir sistemdir. Arıza olduğunda arızalı kısım sigortalar veya



özel koruma elemanları ile devre dışı bırakılır. Diğer kısımların enerjisi kesilmez. Bazı ağ şebekelerde besleme bir yerden yapılır. Bu durumda yine kesintisiz enerji verebilir. Fakat trafo arıza yaptığında şebekenin tamamı enerjisiz kalır.

Ağ şebekelerin, kesintisiz enerji alınması, gerilim düşümünün çok az oluşu ve sisteme güçlü alıcıların bağlanabilmesi gibi avantajları vardır. Fakat kurulumu, işletilmesi ve bakımı zordur. Ayrıca ağ şebekelerde kısa-devre akımlarının etkisi büyüktür.



Şekil 11. Ağ şebeke [46].

#### 1.3.2.4. Enterkonnekte Şebekeler ve Özellikleri

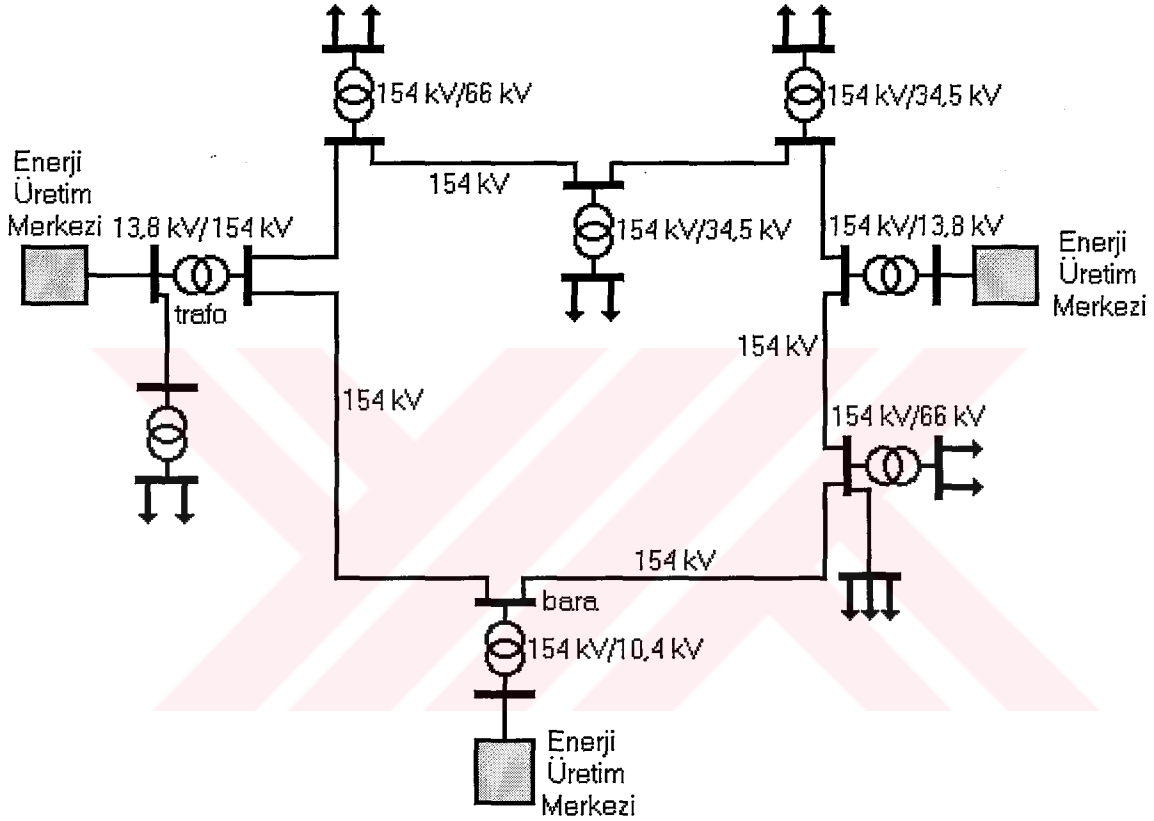
Taşımada, iletimde, nakilde kârlılık ve güvenilirliğin artırılması amacıyla, özellikle önemli miktarlardaki enerji alış-verişi için iki ya da daha fazla sistem veya şebeke arasında bölgelerarası ya da uluslararası bağlantı olanağı sağlayan elektriksel sistemdir. Bu tip şebekelerde, o bölgedeki bütün elektrik üretim ve tüketim araçları büyük küçük ayrımı yapılmaksızın sisteme dahil edilmektedir [46].

Enterkonnekte şebekenin kesintisiz elektrik sağlayabilme, yüksek verim ve ekonomik olması gibi avantajları vardır. Fakat enterkonnekte şebekede kısa-devre akımları



yüksek ve sistemin kararlılığının sağlanmasının zordur.

Enterkonnekte sistemde bir arıza olduğunda, sadece arıza olan yerin enerjisi kesilir. Diğer kısımlarda enerjinin sürekliliği bozulmaz. Sistem içerisinde bir bölgede arızalanan santral veya trafolar devre dışı bırakıldığında diğer santral ve trafolar bu bölgeleri beslemeye devam eder.



Şekil 12. Enterkonnekte şebeke [46].

Her ülkenin kendi alıcılarını beslediği bir enterkonnekte şebekesi vardır. Bununla birlikte bazı komşu ülkelerin sistemleri birbirine bağlanabilir. Ülke içerisinde kendi başına çalışan küçük santraller ve beslenen aboneler olabilir. Bunlar sistemi etkilemez.

Ülkemizde de bir enterkonnekte şebeke vardır. Bu sistem içinde TEAŞ'a, ayrıcalıklı şirketlere, üretim şirketlerine ve otoprodüktörlere ait tam kapasiteyle çalışan 350 kadar elektrik santrali vardır. Bütün bu santraller enterkonnekte şebeke kapsamında birbirlerine paralel bağlıdır. 40428,5 km uzunluğundaki enerji nakil hatları ile bu santraller ve yerleşim birimleri arasında bir ağ şeklinde şebeke tesis edilmiştir.

### 1.3.3. Trafo Merkezleri

Elektrik enerjisi santrallerde üretildikten sonra abonelere ulaşana kadar değişik işlemlerden geçer. İlk önce santral çıkışında elektrik enerjisinin gerilimi yükseltilir. Böylece iletim yüksek gerilimle yapılmış olur. Şehir veya kasabaların girişinde YG (*yüksek gerilim*) düşürülerek orta gerilim haline getirilir. Son olarak da OG (*orta gerilim*) dağıtım trafoları yardımıyla alçak gerilime çevrilir. İşte bu işlemler yerine getirilirken değişik büyüklükte ve özellikte trafolar kullanılabilir. Bu trafolar ve yardımcı elemanlarının yerleştirildiği yerlere *trafo merkezleri* denir. Bir tanım yapacak olursak; değişik gerilim kademelerinde işletme sağlayacak yönde sisteme elektrik enerjisi transfer eden, birincil/ikincil malzeme ve yardımcı donanımdan oluşan açık/kapalı tesislerdir [46].

Bir trafo merkezinin kuruluşunda dikkat edilmesi gereken özellikler vardır. Trafo merkezinin kurulacağı yer veya trafo merkezinin tipi, içine konulacak trafonun özelliğine ve büyüklüğüne bağlıdır. Trafo merkezi hem estetik açıdan hem de enerji dağıtımı ve emniyeti yönünden uygun olmalıdır.

Şehir veya kasabalarda trafo merkezlerinin, dağıtım ve istimlak kolaylığı sağlayan, zemini dayanıklı, estetiği bozmayan yerlere kurulması uygun olur. Bu bakımdan trafo merkezlerinin, yük bakımından ağırlık teşkil eden yerlerde olması en önemli şart değildir.

### 1.4. Kablo ve İletkenler

Elektrik enerjisini ileten, iki elektrik cihazını birbirine elektriksel olarak bağlayan, elektriksel olarak yalıtılmış bir veya daha fazla damardan meydana gelen elektrik malzemesine *kablo* denir [47].

Yerleşim, ticaret ve endüstri merkezlerinde 1, 6, 10, 15, 35 ve 154 kV'luk kablolar kullanılmaktadır. İşletme emniyeti ve kullanma sırasında sağlanan enerji tasarrufu ile kablolar enerji iletiminde önemli unsurdur.

Kablo iletkeni, tavllanmış çıplak yuvarlak elektrolitik bakır tellerden veya alüminyum tellerden burularak yapılır. 16 mm<sup>2</sup> ve daha büyük kesitlerdeki iletkenler sıkıştırılmış olmalıdır. İletken sayısına göre tek damarlı ve çok damarlı olarak imal edilirler.

Kimyevi etkenlere karşı dayanıklılığı mükemmeldir. Ayrıca su emmeyen ve geçirmeyen dış kılıf yalıtkanıyla her türlü ortam şartlarına büyük bir uyum sağlar.

Kablo teknolojisi bakımından değişiklik olmaması nedeniyle bir çok ülkede

alüminyum iletkenli kabloların kullanılması benimsenmiştir. Bu duruma alüminyum kabloların ekonomik oluşu neden olmuştur. Bakırdaki fiyat yükselmelerine karşı, alüminyumun yer kabuğundaki çokluğu, kolay temin edilmesi ve hafif olması kablo iletkeni olarak kullanılmasına sebep olmuştur. Günümüzde alüminyum kablo ve aksesuarlarını temin etmek çok kolaydır. Alüminyum kabloları *alvinal kablo* denilmektedir. Bakır iletkenli kabloların kullanılabileceği her yerde alvinal kablolar da kullanılabilir.

Enerji kabloları döşeme şekillerine ve kullanıldıkları yerlere göre şu şekilde sınıflandırılır.

1. Bina içinde kullanılan kablolar
2. Sualtı ve gemi kabloları
3. Yeraltı kabloları

### **1.5. Havai Hat İletkenleri İle Elektrik İletimi ve Dağıtımı**

Yüksek gerilim hava hatlarında kullanılan iletkenlerin hem enerji taşınması hem de mekanik yönden uygun olarak seçilmesi gerekir. İletkenler, gerekli esnekliği sağlamak, askı ve gergi noktalarında oluşan titreşimler sebebiyle kopmaları önlemek için spiral sarımlı olarak imal edilirler [47].

Spiral örgülü iletkenlerde her bir damarın yüzeyinde meydana gelen kir ve oksit tabakaları nedeniyle akım, damardan damara değil de spiral örgünün içinden akar. Bu bakımdan örgülü iletkenlerin direnç ve endüktansları, dolayısıyla endüktif reaktansları aynı kesit ve cinsteki örgülü olmayan iletkenlere göre daha büyüktür. Endüktans artışını azaltmak için, katlardaki damarlar birbirlerini izleyen katlarda ters yönde konsantrik olarak sarılır.

Seçilecek iletkenin tipi tespit edilirken, elektrik enerjisinin taşınmasında, elektriksel etkilerin olduğu kadar mekanik yapının da dikkate alınması gerekir. Mekanik yapı izolatlara ve direklere etki edeceğinden, elektriksel değerlerle birlikte göz önünde bulundurulmalıdır. İletken seçiminde en çok enerji kaybı, ortalama maliyet, gerilim düşümü, ısınma ve korona kaybı dikkate alınmalıdır.

Hava hatlarında kullanılan iletkenler, masif tel yani içi dolu som tel ile masif örgülü bakır veya alüminyum tellerden yapılır. Masif telden yapılan iletkenler bir cins malzemedir ve içi dolu tek bir tel halinde 10 mm<sup>2</sup> kesite kadar imal edilirler. Bazı özel

durumlar için 16 mm<sup>2</sup>'lik olanları da yapılmaktadır.

Masif örgülü iletkenler ise ayrı veya aynı cins metalden imal edilir. İnce tellerin spiral şekilde örülmesiyle meydana getirilen çıplak iletkenlerdir. Örgülü iletkenler büyük kesitlerde montaj kolaylığı, esnek oluşu, kangal haline getirilebilmeleri ve taşınma kolaylığı sebebiyle tercih edilirler.

### 1.5.1. Yapılarına Göre İletken Çeşitleri

Hava hattı iletkenleri bakır örgülü iletkenler, alüminyum örgülü iletkenler ve çelik özlü alüminyum iletkenler olmak üzere üç gruba ayrılır [47].

1. Bakır örgülü iletkenler
2. Alüminyum örgülü iletkenler
3. Çelik özlü alüminyum örgülü iletkenler

### 1.5.2. Kullanılan Gerilim Değerlerine Göre İletken Çeşitleri

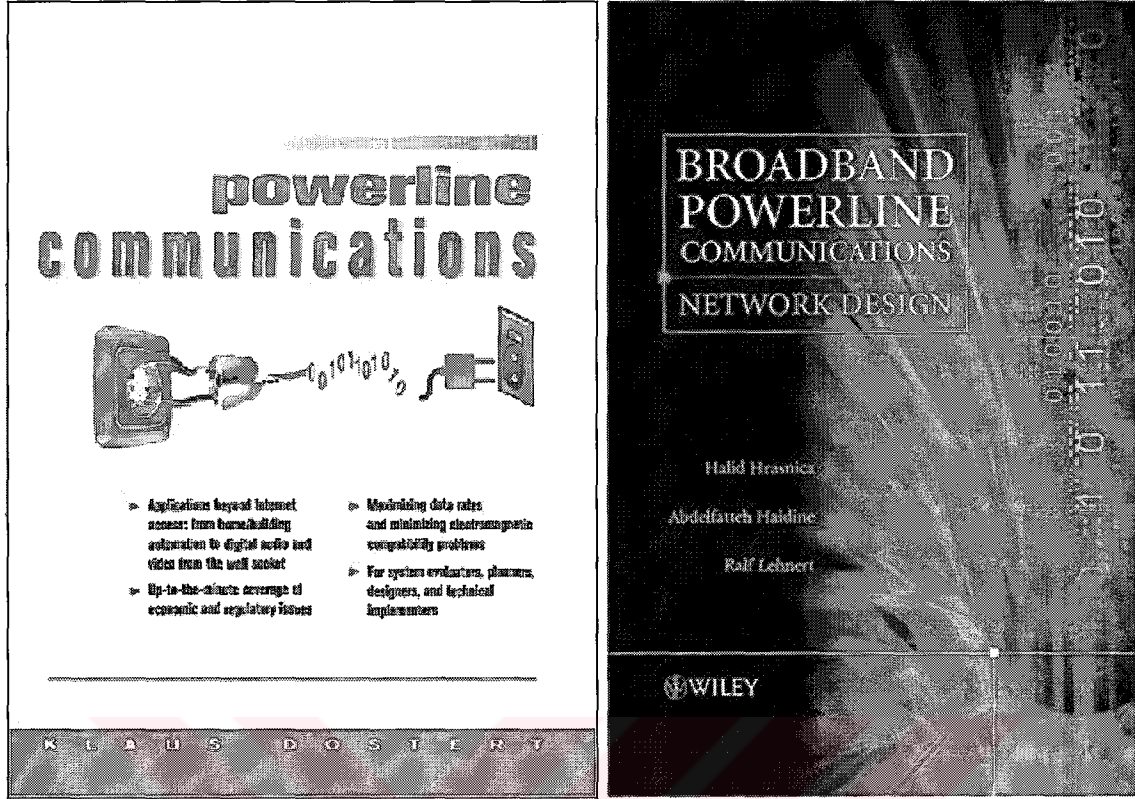
Elektrik enerjisinin iletiminde, dağıtımında ve elektrikle çalışan alıcıların işletilmesinde kullanılan gerilim değerleri standartlaştırılmıştır. Bu gerilim değerleri Alman VDE ve Türk TSE standardına göre dört gruba ayrılmıştır [47].

1. Alçak gerilim (AG) 1 V ile 1000 V arası
2. Orta gerilim (OG) 1 kV ile 35 kV arası
3. Yüksek gerilim (YG) 35 kV ile 154 kV arası

Çok yüksek gerilim (ÇYG) 154 kV'tan fazla gerilim değerleri.

## 1.6. Güç Hattı Haberleşmesi

Bu kısımda güç hattı haberleşmesinden kısaca bahsedilecek ve konu ile ilgili genel bilgiler verilecektir. Güç hattı haberleşmesi hakkında daha geniş bilgi için özellikle [48] ve [49] numaralı kaynaklardan ve bu kısımda referans gösterilen kaynaklardan yararlanabilirsiniz. Ayrıca internet üzerinden bu konu ile ilgili yüzlerce bilimsel makaleye ve yayına ulaşabilirsiniz.



Şekil 13. Güç hattı haberleşmesi ile ilgili kitaplar [50].

### 1.6.1. Güç Hattı Haberleşmesinin Tarihçesi

Güç hattı haberleşmesinin başlangıç tarihçesi Brown tarafından ortaya koyulmuştur [51]. Brown'a göre güç hattı üzerinden sinyal iletimi fikri oldukça eskidir. 1838'de Edward Davy, Londra-Liverpool telgraf sisteminin insansız çalışan kısımlarındaki bataryaların gerilim seviyelerini kontrol etmek amaçlı uzaktan kaynak gerilimi ölçeri sunmuştur [52]. 1897'de Josep Routin ve C. E. L. Brown, kendi geliştirdikleri güç hattı elektrik sayacının Büyük Britanya'da patentini almışlardır [53]. 1905'de Chester Thoradson, Chicago'da geliştirmiş olduğu uzaktan elektrik sayacı okuma sisteminin patentini almıştır [54]. Thoradson'un sistemi sinyalizasyon amaçlı ilave bir kablo daha kullanmaktaydı. Fakat bu çalışma pratiğe geçirilemedi. Çünkü buluşun ticari faydaları yetersizdi [1].

Yüksek gerilim iletim hatları üzerinden sesin taşıyıcı frekanslarla iletimi 1920'li yıllarda başlamıştır. Trafo istasyonları ile güç cihazları arasındaki iletim hatları gibi geniş haberleşme kanalları çift yönlü haberleşmeyi gerekli kılmıştır. Elektrifikasyon sürecinin başlangıcında henüz telefon ağının yaygınlaşmamış olması nedeniyle elektrik hatları üzerinden yönetim ve kontrol amaçlı çift yönlü haberleşme çok önemlidir. Düşük gürültü



seviyesi ve nispeten yüksek taşıyıcı frekansı (15 kHz – 500 kHz) gibi uygun iletim karakteristikleri sayesinde 10 W verici gücü için verici ile alıcı arasındaki mesafe 900 km gibi çok büyük mesafeler olabiliyordu [48]. Başlangıçta sadece genlik modülasyonu (*AM, Amplitude Modulation*) kullanılarak ses iletimi gerçekleştiriliyordu. Sonradan uzaktan ölçüm ve uzaktan kontrol özellikleri de eklenmiştir [1].

Aynı zamanda, yüksek gerilim hatları üzerinden taşıyıcı frekansı iletimi, orta gerilim ve alçak gerilim dağıtım şebekeleri üzerinde de uygulanmıştır. RCS'nin (*RCS, Dalgalı Taşıyıcı Sinyalizasyonu, Riple Carrier Signalling*) ilk pratik uygulamaları, 1930 yılında *Siemes* tarafından Almanya Potsdam'da gerçekleştirilen *Telenerg* projesi ile 1935 yılında *AEF* tarafından Stuttgart ve Madgeburg'da gerçekleştirilen *Transkommando* projesidir [48]. RCS sistemi esasen yük yönetimi amaçlı kullanılmaktaydı. CTS'nin (*Taşıyıcı Frekansı İletimi, Carrier Frequency Transmission*) aksine RCS'de veri iletimi tek yönlüydü ve RCS 125 Hz – 3000 Hz gibi düşük taşıyıcı frekanslarını kullanıyordu. Düşük taşıyıcı frekanslarının kullanılıyor olması hatta verilen sinyalin ortamda küçük kayıplarla yayılmasını sağlıyordu [1].

Ancak alçak taşıyıcı frekanslarında dağıtım hattının giriş empedansı da düşük olur. Bu nedenle RSC vericileri muazzam çıkış gücüne ihtiyaç duyarlar. RSC vericilerinin verici gücü genelde 10 kW ile 100 kW arasında değişmektedir. İlk başlarda RSC'de sayısal veri iletimi de yapılmıştır. Bu iletişimde daha ziyade uygulama kolaylığı açısından genlik kaydırmalı anahtarlama (*ASK, Amplitude Shift Keying*) ve frekans kaydırmalı anahtarlama (*FSK, Frequency Shift Keying*) kullanılmıştır. Gerek alçak taşıyıcı frekanslarının, gerek dar bantlı modülasyon tekniklerinin kullanılıyor olması, RCS sistemlerinin veri hızlarının düşük olmasına neden olmuştur [1].

Orta ve alçak gerilim dağıtım şebekelerinde kullanılan yeni nesil yük kontrol cihazları, yüksek veri hızları sağlayan verimli modülasyon teknikleri göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bu cihazların verici güçleri azaltılmış ve bazıları çift yönlü haberleşmeyi destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Verici gücünün azaltılması yüksek taşıyıcı frekanslarının kullanılması ve daha gelişmiş elektronik haberleşme elemanlarının kullanılması ile sağlanmıştır. *Enermet MELKO™* bu tip sistemlere bir örnek olarak verilebilir. Bu sistem orta ve alçak gerilim dağıtım şebekesi üzerinden baz istasyonları ile ölçüm ve kontrol birimleri arasında 50 bps veri hızıyla çift yönlü haberleşme yapabilmektedir. Veri iletiminde 3025 Hz – 4825 Hz frekans bandında faz kaydırmalı anahtarlama (*PSK, Phase Shift Keying*) kullanılmıştır [55]. *MELKO™* sistemleri

tarafından gerçekleştirilen temel işlevler otomatik sayaç okuma (*AMR*) ve yük yönetimidir. Alçak frekansların kullanılıyor olması, taşıyıcıların dağıtım trafolarından geçebilmesini sağlamaktadır. MELKO™ sistemleri Fin dağıtım firmaları tarafından halen kullanılmaktadır. *ABB DLC-M™* ve *RMS PowerNet™* sistemleri, dağıtım şirketleri tarafından kullanılan benzer sistemlerdir. Bu sistemler 10 kHz – 100 kHz frekans aralığındaki taşıyıcıları kullanmaktadır. Bu sistemlerin gereksinim duydukları verici gücü MELKO™ sistemlerinkinden daha azdır. Ancak bu sistemlerde dağıtım trafolarının baypas edilmesi zorunludur [1].



Şekil 14. MELKO™ yük yönetim sistemi [1].

1958 ve 1959 yılında entegre devrelerin *Texas Instruments* adına *Jack Kilby* ve *Fairchild Semiconductor* adına *Robert Noyce* tarafından keşfedilmesi ve 1971 yılında mikro işlemcilerin *Intel* adına *Ted Hoff* tarafından keşfedilmesi, güç hattı haberleşmesi için düşük maliyetli entegre devreleri geliştirilmesini sağlamıştır. 1980'li yıllarda modülasyon teknikleri, işlem kapasitesi ve hata kontrol alanlarındaki gelişmeler sonucunda, entegre devrelerin veri transfer kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur [1].

İlk düşük maliyetli güç hattı veri transfer modülü *Pico Electronics* tarafından ev içi kullanım amaçlı *Experiment #10* veya kısaca *X-10* modülüdür. Bu modüllerin satışı 1979 yılında başlamıştır. *X-10* vericisi 120 kHz taşıyıcı frekansı ve basit aç-kapa anahtarlama (*OOK, On-Off Keying*) modülasyonu kullanmaktaydı [56]. Ayrıca *X-10* protokolünde yollama ve alma işlemlerinin süreleri tanımlanmıştır. Her bit şebeke geriliminin sıfır geçişlerinde yollanır. Buna göre en büyük veri hızı Amerika için 120 bps, Avrupa için 100 bps'dir. Günümüzde ev içi cihazların kontrolüne yönelik *X-10* uyumlu cihazlar üreten yaklaşık on firma vardır. *X-10* teknolojisini takiben günümüzde kullanıcılarına yüksek veri transfer hızları sunan *LonWorks* ve *CEBus* gibi teknolojiler de mevcuttur [1].

1990'lı yıllarda internetin gelişimine paralel olarak, elektrik dağıtım şebekesi veya ev içi elektrik hatları üzerinde geniş bantlı (*broadband*) haberleşme fikri ortaya çıkmıştır. Güç hattı kanal karakteristikleri, modülasyon teknikleri ve haberleşme protokolleri üzerine yapılan çalışmalar çarpıcı bir biçimde artmıştır. Kanal karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalar sonucunda kullanılan frekanslar değerleri 30 MHz'in üzerine çıkmıştır. Şu ana kadar geniş bantlı güç hattı haberleşmesi amaçlı pek çok ürün ve sistem geliştirilmiştir [1].

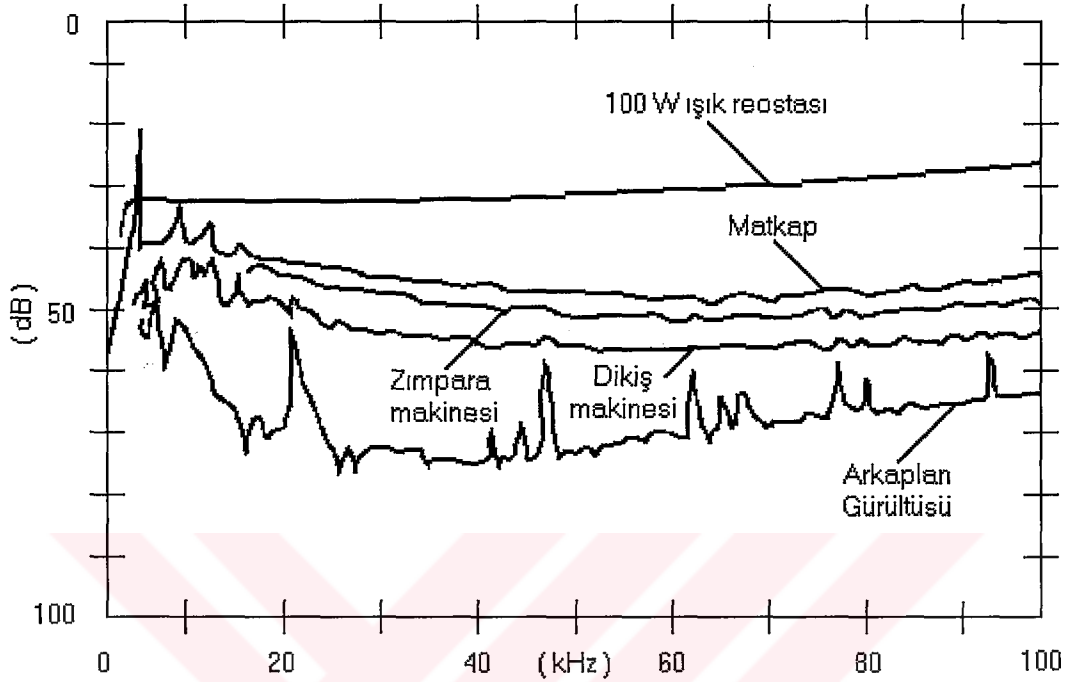
Şebeke üzerinden internet erişimi (*IPL, Internet over Powerline*) üzerine yapılan ilk geniş kapsamlı çalışma 1997 yılında *Nor.Web* şirketi tarafından İngiltere'de yapılmış fakat *IPL* ekonomik açıdan uygulanabilir olmadığı için başarısızlıkla sonuçlanmıştır [1]. *IPL* teknik, ekonomik ve düzenleme problemleri nedeniyle yaygınlaşmamıştır. Bununla beraber dünyanın farklı yerlerinde kullanıcılarına *IPL* hizmeti veren şirketler mevcuttur. Ancak günümüz şartları ve teknolojisi ile *IPL*'in yaygınlaşması pek mümkün görünmemektedir. Belki gelecekte bu gerçekleştirilebilir veya bunun gereksiz olduğu anlaşılabilir.

### 1.6.2. Gürültü

Şebekedeki esas gürültü kaynakları, aynı dağıtım transformatörüne bağlı olan cihazlardır. Şebekede başlıca iki gürültü kaynağı vardır. Bunlar ışık reostalarında kullanılan triaklar ve universal motorlardır. Triaklar tarafından üretilen gürültü şebeke frekansı ile eş zamanlıdır. Bu gürültü şebeke frekansının harmonikleri şeklinde gözlenir. Universal motorlar mikserlerde, dikiş makinelerinde ve zımpara aletlerinde bulunurlar. Universal motorlardan kaynaklanan gürültü, ışık reostalarının ürettikleri gürültü kadar



güçlü olmamakla beraber şebeke frekansı ile de eş zamanlı değildir. Ayrıca ışık reostaları uzun zaman müddetince kullanılırken, üniversal motorlar araklı olarak kullanılırlar [57].



Şekil 15. 60 Hz güç devresiyle çalışan ışık reostası ile üç üniversal motorun gerilim tayflarının karşılaştırılması [58].

Şebekenin gürültü karakteristiği çok karmaşıktır [59]. Bu gürültü dört grup altında incelenebilir [60, 61].

#### 1.6.2.1. Şebeke Frekansı ile Eşzamanlı Gürültüler

Bu tip gürültülerin ana kaynağı, güç kaynakları ve silikon kontrollü doğrultucular (*SCR, Silicon-Controlled Rectifier*) gibi anahtarlamalı cihazlardır [62]. Bu cihazların anahtarlama frekansları, şebeke frekansının tam katlarında seçilmektedir [60]. Bu nedenle bu tip cihazların oluşturmuş oldukları gürültüler, şebeke frekansının üst harmonikleri şeklindedir. Bu tip gürültülerin frekans tayfı, 100 Hz ve harmoniklerinden oluşur. Ayrıca fotokopi cihazları da 100 Hz'de güçlü gürültü darbeleri oluştururlar [63].

### 1.6.2.2. Düzgün Tayflı Gürültüler

Bu tip gürültülerin ana kaynağı, şebeke frekansı ile eşzamanlı çalışmayan cihazlardır [62]. Üniversal motorlar bu tip cihazlara örnek olarak verilebilir. Üniversal motorlarda gürültünün asıl kaynağı, motorun hızına bağlı olarak akım yönünü değiştiren fırçalardır [62]. CELENEC A bandı için bu tip gürültüler beyaz gürültü olarak modellenenbilir [60].

### 1.6.2.3. Tek Darbeli Gürültüler

Her türlü anahtarlama işlemi bu tip gürültülerin oluşmasına yol açar. Bu tip gürültüler, özellikle içinde güç faktörü düzeltme amaçlı kapasiteler bulunan cihazların şebeke bağlanması veya ayrılması esnasında oluşur [62].

### 1.6.2.4. Şebeke Frekansı ile Eşzamanlı Olmayan Periyodik Gürültüler

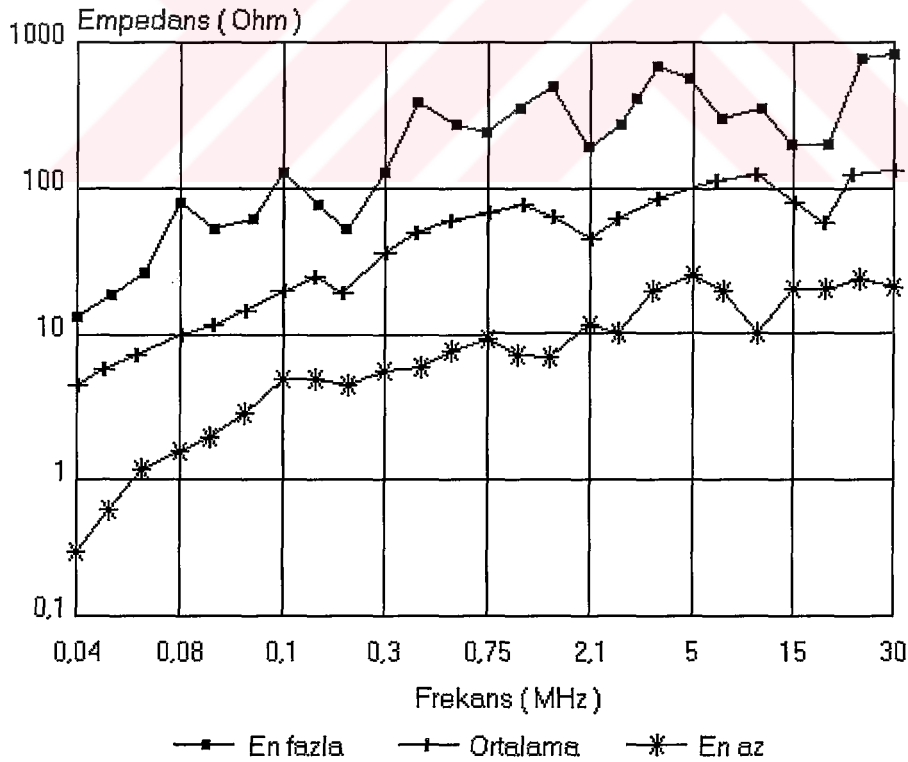
Bu tip gürültüler şebeke frekansından bağımsız periyodik gürültülerdir. Bu tip gürültülerin ana kaynağı, flüoresan lambalar ve televizyon alıcılarıdır [60]. Televizyon tarafından üretilen gürültülerin frekans dağılımı, yatay tarama frekansı ve bunun katları şeklindedir. Aynı şekilde bilgisayar monitörlerinin ürettiği gürültüler de bu gruba dahil edilebilir [62].

Şebekedeki gürültünün bozucu etkilerini azaltmak için şu önlemler alınabilir [63].

- Alıcı girişinde şebeke frekansı ve harmonikleri filtrelerle süzülebilir.
- Şebeke üzerinden veri kodlanarak yollanabilir. Bu şekilde yollanan verideki bozulma algılanabilir veya düzeltilebilir.
- Sinyal şebekeye modüle edilirken, televizyon yatay tarama frekansı ve harmoniklerine karşı önlemler alınabilir.
- Şebekedeki bilinmeyen frekans bileşenleri için kodlama yöntemleri ile beraber frekans çeşitlemesi de yapılabilir.

### 1.6.3. Şebeke Empedansı

Bu konuyla ilgili en kapsamlı yayın IBM Elektromanyetik Uyumluluk Laboratuvarı'nda çalışan Malack ve Engstrom tarafından yayımlanmıştır. Bu çalışmada altı Avrupa ülkesindeki 86 ticari AC enerji dağıtım sisteminin RF (*Radyo Frekansı, Radio Frequency*) empedansları ölçülmüştür. Bu ölçümler, şebeke empedansının frekans ile arttığını ve 100 kHz frekans değerinde şebeke empedansının 1,5  $\Omega$  ile 80  $\Omega$  aralığında değiştiğini ortaya koymuştur. Şebeke empedansını belirleyen iki parametre vardır. Bunlar; şebekeye bağlı olan yükler ve dağıtım transformatörünün empedansıdır. Komşu dağıtım transformatörüne bağlı yükler de bu empedansı etkileyebilir. Enerji nakil hatlarının şebeke empedansı üzerinde büyük bir etkisi yoktur. Empedans genelde endüktiftir. Tipik rezistif yükler için 150 kHz'de sinyal zayıflaması 2 dB ile 40 dB arasında değişir. Sinyal zayıflamasının değeri kullanılan dağıtım trafosuna ve rezistif yükün büyüklüğüne bağlıdır. Ayrıca hatta bağlanan kapasitif yüklerin, dağıtım trafosunun endüktansı ile rezonansa gelmesi, olağan dışı sinyal zayıflamalarına yol açabilir [57].



Şekil 16. Toplam Avrupa şebeke empedansı [64].

Şebeke empedansı ile ilgili benzer çalışmalarda. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Amerika'da 60 Hz elektrik şebekesinde yapılan bir çalışmada, CELENEC A bandı için hat empedansları ölçülmüş ve 20 kHz için empedans değeri en küçük 1  $\Omega$ , ortalama 1,5  $\Omega$  ve en büyük 3  $\Omega$  olarak tespit edilmiştir [65]. 100 kHz'de ise empedans değeri en küçük 3  $\Omega$ , ortalama 13  $\Omega$  ve en büyük 35  $\Omega$  olarak ölçülmüştür [65].
- Yine CELENEC A bandı için Almanya'da yapılan benzer bir çalışmada, ortalama empedans değeri 20 kHz'de 5  $\Omega$  (*en büyük 20  $\Omega$* ), 100 kHz'de ise 17  $\Omega$  (*en büyük 80  $\Omega$* ) olarak ölçülmüştür [66].
- Bir başka çalışmada şebeke empedansını oluşturan üç önemli parametre (*dağıtım transformatörünün çıkış empedansı, iletim hattı ve yükler*) 5 kHz - 20 kHz frekans aralığında ayrı ayrı incelenmiştir [67].
- Japonya'da yapılan diğer bir çalışmada ise şebeke empedansının frekansa bağlı ifadesi çıkarılmıştır. (12) numaralı eşitlik, ölçüm sonuçları üzerinde en son kareler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir [68].

$$|Z| = 0,005 * f^{0,63} \quad [\Omega] \quad (12)$$

Klasik haberleşmede empedans uyumu 50  $\Omega$ 'luk kablo için 50 $\Omega$ 'luk veri-alıcı kullanılarak sağlanmaktadır [69]. Ancak bu kural güç hattı haberleşmesinde geçerli değildir. Şebekede giriş empedansı zamana, yüklere ve konuma bağlı olarak değişmektedir. Duruma göre giriş empedansı bazen birkaç *m $\Omega$*  bazen birkaç *k $\Omega$*  olabilmektedir. Şebekede, giriş empedansı uyumsuzluğu dışında farklı empedans uyumsuzlukları da olabilir. Şebekedeki bu empedans uyumsuzlukları sinyal zayıflamasına yol açar. Şebeke empedansını dengelemek için filtreler kullanılabilir. Ancak bu çok pahalı bir yöntemdir. Her eve hatta her dağıtım kutusuna bir filtre takmak gerekebilir [62].

Alçak gerilim hatları için ortalama empedans değeri aşağıdaki etkenlerin sonucudur [63].

- **Dağıtım transformatörünün empedansı** : Frekansla beraber artar.
- **Kullanılan kablonun karakteristik empedansı** : Şebekede çok farklı kablolar kullanılmaktadır. Bu kablolar ard arda bağlı endüktanslar ve dirençler şeklinde modellenebilir.

- **Şebekeye bağlı cihazların empedansları** : Genelde 10  $\Omega$  ile 1000  $\Omega$  arasında değişir.

Transfer fonksiyonunun sanal bileşeni yani alınan sinyaldeki *faz kayması* hakkında literatürde yapılmış çok az sayıda çalışma vardır. Yapılan çalışmalar faz kaymasının hemen hemen zamandan bağımsız olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalarda farklı zamanlarda yapılan ölçümler arasında en fazla %10'luk bir değişim gözlenmiştir [62].

#### 1.6.4. Sinyal Zayıflaması

Sinyal zayıflaması alçak gerilim hatları için km başına 100 dB ve orta gerilim hatları için km başına 10 dB'dir [63]. Özellikle alçak gerilim hatlarında görülen yüksek sinyal zayıflaması, iletim hattına en fazla 1 km aralıklarla yükselteçlerin koyulmasını zorunlu hale getirmektedir. Sinyal zayıflaması aşağıdaki etkenlere bağlıdır [62].

- **Zaman bağımlılığı** : Güçlü bir gece gündüz hassasiyeti vardır.
- **Frekans bağımlılığı** : 100 kHz'in üstündeki frekanslarda zayıflama km başına 0,25 dB artmaktadır [63]. İletim hattının etkisiyle 400 m'den uzun kablolarda zayıflama bazı frekans değerlerinde çok büyük değerlere ulaşmaktadır. Zayıflama frekansa bağlı olarak artmaktadır [69]. 10 MHz'in üstündeki frekanslarda alınan sinyali gürültüden ayırmak çok zordur. Bu durum haberleşme mesafesini sınırlamaktadır. Kanalın frekans cevabının genliği, artan frekansla beraber azalması dışında düzgün değildir. Bu nedenle kanal *frekans seçicidir*.
- **Mesafe bağımlılığı** : Genelde sinyalin km başına 100 dB zayıfladığı kabul edilir [63].
- **Fazlar üzerinden sinyal zayıflaması** : Fazdan faza sinyal zayıflaması 40 dB gibi yüksek değerlere ulaşabilir [63]. Almanya'da yapılan bir çalışmaya göre kabul edilebilir 40 dB sinyal zayıflaması için erişim mesafesi 20 MHz'de 100 m, 10 MHz'de 140 m, 5 MHz'de 200 m ve 2 MHz'de 300 m'dir [70].

#### 1.6.5. İşaret Gürültü Oranı

İşaret gürültü oranı (*SNR, signal-to-noise ratio*) haberleşme sisteminin performansını hesaplarken önemli bir parametredir [69]. SNR aşağıdaki formül kullanılarak

hesaplanabilir [62].

$$SNR = \frac{\text{Alınan Güç}}{\text{Gürültü Gücü}} \quad (13)$$

Bu parametre haberleşme sisteminin performansı ile ilişkilidir. SNR ne kadar büyük ise haberleşmede o kadar iyidir [62].

Filtre kullanılması SNR'yi artırır. Her evde, ev içi elektrik hatlarında oluşan gürültünün şebekeye karışmasını engelleyecek filtrelerin olması, şebekedeki gürültü seviyesini azalmasını sağlar. Ancak bu kurulum maliyetlerini artırır [62].

### 1.6.6. Kanala Sinyal Kuplajı

Güç hattı haberleşme ünitesini şebekeye bağlamanın iki yolu vardır [63].

- **Kapasitif kuplaj** : Bu yöntemde sinyalin hatta kuplajı ve sinyalin şebeke gerilimi üzerine modüle edilmesi bir kapasite ile gerçekleştirilir. Bu yöntem verimli fakat haberleşme ünitesinin doğrudan şebeke ile temas halinde olması nedeniyle pek güvenli değildir.
- **Endüktif kuplaj** : İşaretin hatta verilmesi bir endüktans üzerinden gerçekleştirilir. Bu yöntemde kayıpların fazla olmasına karşın şebeke gerilimi ile doğrudan temas olmadığı için kapasitif kuplajdan daha güvenlidir. Güç hattı haberleşme cihazlarında güvenli olduğu için daha ziyade endüktif kuplaj kullanılır. Güç hattı haberleşme sistemlerinde güvenlik önemliyse endüktif kuplaj, verim önemliyse kapasitif kuplaj kullanılır.

### 1.6.7. Güç Hattı Haberleşmesinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri

Güç hattı kanalı sorunlu bir ortamdır. Kanal karakteristikleri zamana, konuma ve yüklerle bağlı olarak değişmektedir. Şebekeyi haberleşme amaçlı kullanmak karmaşık modülasyon teknikleri gerektirir [62].

Güç hattı haberleşmesinde esas amaç sınırlı bant genişliğinde, mümkün olan en hızlı ve en güvenilir haberleşmeyi gerçekleştirmektir. Bu amaç doğrultusunda birçok

modülasyon tekniği denenmiş ve halen yeni modülasyon teknikler üzerinde çalışılmaktadır. Bu modülasyon teknikleri arasında FSK (*Frekans Kaydırmalı Anahtarlama, Frequency Shift-Keying*), OFDM (*Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama, Otonagonal Frequency Division Multiplexing*) ve DS-SS diğerlerine göre öne çıkmıştır. 4 MHz – 20 MHz frekans bandında bu üç modülasyon tekniğini birbirleri ile karşılaştıralım.

- **FSK** : Yüksek hızlı güç hattı haberleşmesi için uygun değildir. Bu modülasyon tekniği kullanılarak 500 kbps'lik veri hızlarının üzerine çıkmak nerede ise imkansızdır [71].
- **OFDM** : Haberleşme kanalının bir kısmında yüksek sinyal zayıflaması veya sıkışıklık meydana gelmesi durumunda verimi oldukça düşer. Vericinin kanalı öğrenmesi sağlanırsa yüksek verimlilikte haberleşme yapılabilir. Bu durumda veri hızı 10 Mbps'nin üzerine çıkabilir [71].
- **DS-SS** : DS-SS tavsiye edilen bir modülasyon tekniğidir. Bu yöntem ile 1 Mbps'lik veri hızına kolaylıkla ulaşılabilir. 10 Mbps ve bu değere yakın veri hızlarında verimi düşüktür. 5 Mbps veri hızı bu teknik için ideal veri hızıdır. Bu veri hızında verimli ve sağlıklı haberleşme yapmak mümkündür [71].

Güç hattı haberleşmesindeki bir diğer problem sinyal zayıflamasının frekansla beraber artmasıdır [62]. 20 MHz'in üstündeki frekanslarda, orta mesafeli haberleşme uygulamalarında bile sinyal zayıflaması nedeniyle yollanan işaret, gürültü seviyesinin altına düşmektedir [62]. Yüksek frekans bandında gürültü seviyesinin en düşük olduğu 2 MHz – 20 MHz frekans bandı haberleşme için en uygun frekans aralığıdır [71].

Her ne kadar 2 MHz – 20 MHz frekans aralığı haberleşme için en uygun frekans bandı olsa da bu bant genişliği yüksek hızlı haberleşme uygulamaları için yeterli değildir. Başlangıçta yüksek hızlı haberleşme uygulamaları 1 MHz – 30 MHz aralığında yapılmaktaydı. Sonra bu frekans bandı 1 MHz – 100 MHz aralığına genişlemiş, günümüzde ise 100 MHz'in üstündeki frekans değerlerinde dünyanın farklı yerlerinde çalışmalar yapılmaktadır.

### 1.6.8. Güç Hattı Haberleşmesi Teknolojileri

Güç hattı haberleşmesi teknolojileri ve standartları başlangıçta araştırma amaçlı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalar LonWorks, X-10, OFDM, Passport, CEBus ve



HomePlug standartlarını kapsamaktadır. Sonra standartlar üzerine kurulmuş teknolojiler üzerine odaklanılmıştır. Aynı zamanda ev içi haberleşme uygulamalarında, şebekenin veri iletim ortamı olarak kullanılmasının avantajları ve faydaları göz önüne alınmıştır. Servis kalitesi, veri iletim hızı, sınırlamalar, dezavantajlar ve diğer önemli faktörler göz önüne alınmıştır [62].

Şimdi bu teknolojileri tanıyalım.

### 1.6.8.1. LonWorks Teknolojisi

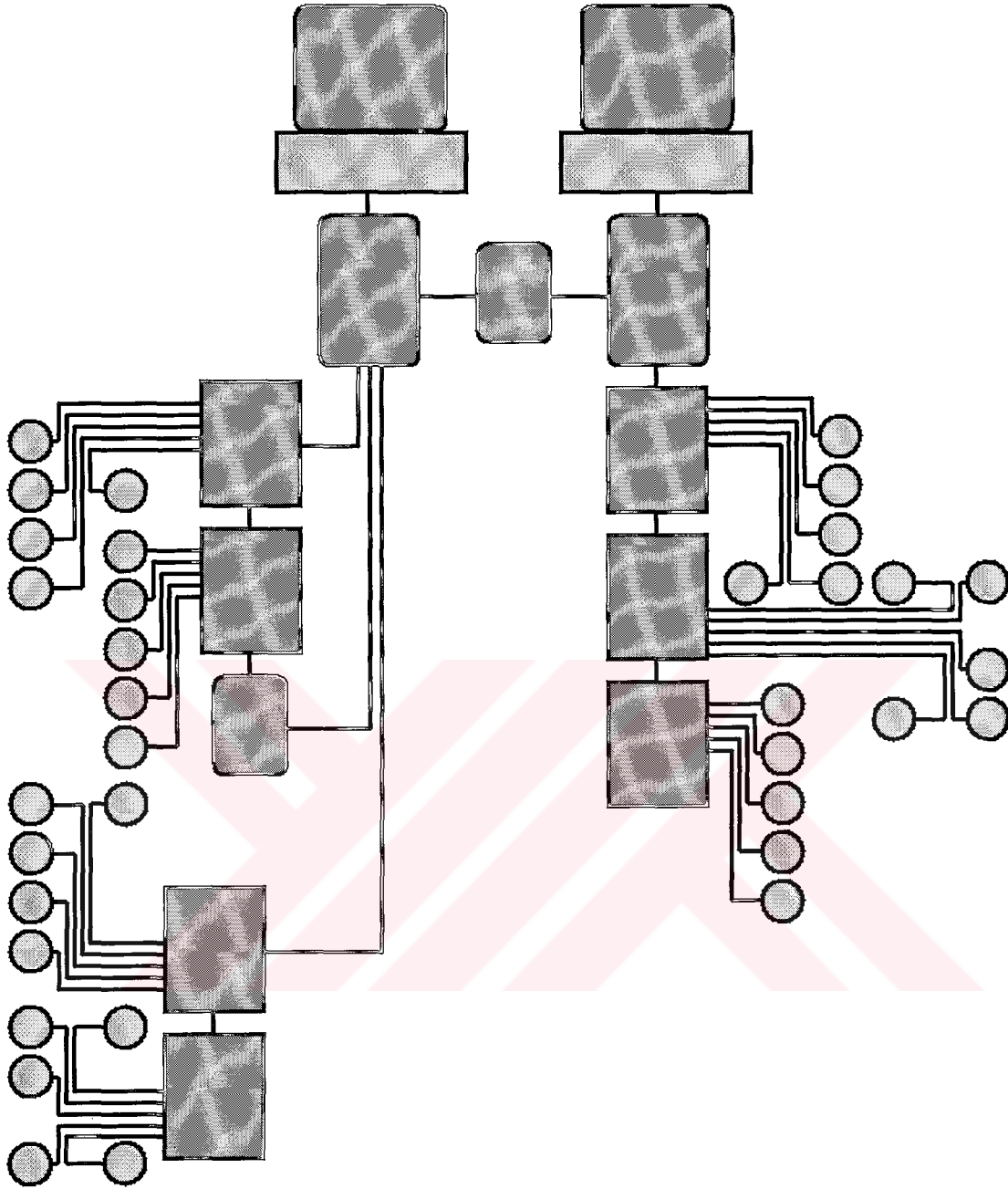
LonWorks (*LON, Yerel Çalışma Ağı, Local Operation Networks*) teknolojisi Echelon tarafından geliştirilmiştir ve standartları tüm imalatçılara açıktır [72]. Tüm otomatik kontrol sistemleri aynı temel elemanlardan oluşur. Otomatik kontrol sistemleri

- sensörler,
- giriş-çıkış noktaları,
- uygulama programları,
- haberleşme ağı,
- insan-makine arayüzleri,
- ve ağ yönetim araçlarında oluşmaktadır.

Hızlı teknolojik gelişmeler, içinde kontrol sistemlerinin de olduğu her türlü sistem mimarisinin değişmesini gerektirir. LonWorks teknolojisi eski tip komut tabanlı kontrol sistemlerinden ziyade bilgi tabanlı kontrol sistemlerini mümkün kılar [62].

Şekil 17.'de son zamanlarda bir çok ticari ve endüstriyel uygulamada kullanılan tipik bir merkezileştirilmiş mimari modeli görülmektedir. Bu modelde alt panellere bağlı on binlerce sensör ve giriş-çıkış noktası temsili olarak gösterilmektedir. Alt paneller de kontrol paneline uygun efendi/köle haberleşme yolları üzerinden bağlıdır. Kontrol paneli, tüm giriş-çıkış portlarının bağlı olduğu kontrol lojiğini denetleyen bir programı çalıştıran, yüksek performanslı bir mikroişlemciden ( $\mu P$ , *Microprocessor*) oluşur. Sistem, HMI (*İnsan-Makine Arayüzü, Human Machine Interface*) araçlarının sisteme bağlanmasına izin verecek özel HMI'lere sahip olabilir [73]. Sistem tipik olarak, tarihi merkezi işlem birimlerini ve eski bilgisayar sistemlerini anımsatmaktadır [62].

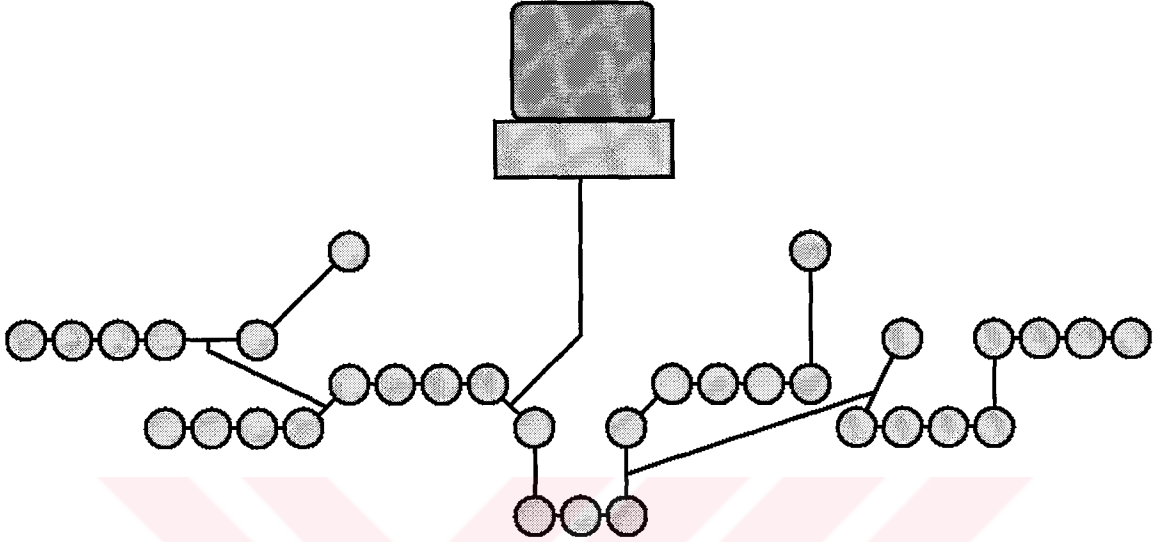




Şekil 17. Merkezileştirilmiş kontrol mimarisi modeli [62].

LonWorks teknolojisiyle son derece dağıtılmış mimariler gerçekleştirmek mümkündür. Bu sistemde merkezileştirilmiş kontrol ediciler yoktur. LonWorks cihazları (*düğüm olarak da adlandırılırlar*), standart haberleşme protokollerini kullanarak, herhangi bir fiziksel ortam (*sarmal çift, AC güç hattı, radyo frekansı, fiber optik kablo, kızılötesi*) üzerinden birbirleri ile haberleşebilirler. Her düğüm kendi uygulama programına sahiptir. Kontrol lojisi sistemin her yerine dağıtılmıştır. Her düğüm uygulaması, ortak bir ayar

yerine kendi ayarlarını kullanır. Sistemdeki tüm sensörler ve giriş-çıkış noktaları bir düğüm olabilir. HMI ve ağ yönetim araçları mevcuttur ve ortak haberleşme protokollerini kullanarak sistemdeki tüm noktalara erişebilirler [62].



Şekil 18. LonWorks dağıtılmış kontrol mimarisi [62].

LonWorks teknolojisi *ağ değişkenleri (NVs, Network Variables)* kavramını sağlar. Bu üreticilerin ürün tasarımlarını kolaylaştırır. Bunun LonWorks kullanıcılarına faydası ise uyumluluk, HMI ve ağ yönetim cihazlarının kullanım kolaylığı, azaltılmış kablolama maliyetleri, kısa sistem tasarım zamanı, güvenilirlik, çok yönlü bakım seçenekleri ve yeni özelliklerin eklenebilmesi gibi düz kontrol mimarisi özelliklerine sahip olmasıdır [62].

### 1.6.8.2. CEBus Teknolojisi

CEBus (*Elektronik Tüketici Yolu, Consumer Electronic Bus*), elektronik ürünlerin ev içinde beş farklı fiziksel ortamı (*güç hattı, sarmal çift, koaksiyel kablo, RF yayını ve kızıl ötesi*) kullanarak birbirleri ile haberleşmelerini sağlayan ve standartları Elektronik Endüstrisi Birliği (*EIA, Electronic Industrial Association*) tarafından tanımlanmış bir yöntemdir [74]. CEBus aslında ev otomasyonu amaçlı bir yerel ağdır (*LAN, Local-Area Network*). CEBus bir haberleşme yöntemi ve öncelikle tüketici ürünleri için tasarlanmış bir standarttır [75]. CEBus'ın ilk versiyonu endüstriyel bir düzenleme olarak IS-60 (*Geçici*

*Standart 60, Interim Standard 60*) adı altında 1992’de ortaya çıkarıldı. 1993 ve 1994’te yeniden düzenlenip, EIA’nın açık standardı *EIA-600* ile son halini aldı [62].

CEBus ürünler bir verici-alıcı (*transceiver*) ve bir mikrobilgisayar ( $\mu C$ , *mikrodenetleyici, microcontroller*) olmak üzere iki temel birimden oluşmaktadır. Veri paketleri verici-alıcı tarafından yaklaşık 10 kbps hızla iletilir [76]. CEBus protokolünde her düğüm birbirine istediği zaman erişebilir. CEBus standardı sesi aç, ileri sar, geri sar, durdur, atla ve sıcaklığı arttır veya azalt gibi komutları içerir. Bu komutlar CEBus CAL (*CEBus Ortak Uygulama Dili, CEBus Common Application Language*) adı verilen bir haberleşme diline göre düzenlenmiştir [62].

CEBus Endüstri Komisyonunun (*CIC, CEBus Industry Concil*) görevi CEBus ve CEBus Home Plug & Play hakkında toplumsal bilgi geliştirilmesi ve tasarımı için gerekli bilgileri sağlamaktır [77]. CEBus ürünleri birbirleri haberleşen ve bir sistem gibi çalışan ürünlerdir. Bu ürünler birbirlerine soru sorabilir, sorulara cevap verebilir ve ev ortamı hakkında ne bildikleri ve anladıkları hakkında raporlar hazırlayabilirler. Bu mesajlar ev içi güç hatlarından, telefon kablolarından, televizyon kablosundan, kızılötesi ve radyo sinyalleri ile ileri veya geri iletebilir [62].

CEBus, ürünlerin birbirleri ile zaman, sıcaklık ve cihaz durumu gibi bilgileri paylaşmasına imkan verir. Bu bilgiler, ilave ürün özelliklerinin merkezileştirilmesini, birçok üründeki kullanışsız kullanıcı arayüzlerinin kaldırılmasını ve servis bilgilerinin doğrudan ve kolaylıkla ürünlere ulaştırılmasını sağlar [62].

Ağda, haberleşme başarımı sağlayan iki temel madde vardır. Bunlar; bilginin düğümler veya sistemler arasında açık olarak iletilmesi ve hedef düğüme veya sisteme ulaşan verinin derhal alıcı tarafından tanınıp, işlemde geçirilebilecek şekilde olmasıdır. CEBus standardı yalnızca haberleşme kolaylığını sağlayacak fonksiyonları tanımlar. Kullanılan sabit işlemleri, tasarımı ve teknolojileri tanımlamaz. Bunların tanımlanması sistem üreticilerine bırakılır. Ancak cihaz konnektörleri ve sinyal formatları gibi özellikler CEBus tarafından belirlenir [62].

### 1.6.8.3. Passport ve Plug-in PLX Teknolojisi

Passport, bazılarına göre ilk, bazılarına göre ise ilk geliştirilen güç hattı teknolojilerinden biridir. Bu teknoloji Utah eyaletinde faaliyetlerini gösteren *Intelogis Inc.* firması tarafından geliştirilmiştir. Intelogis firması 2000 yılında ismini *Inari Inc.* olarak

değiştirmiştir. Bu firma günümüzde PLC amaçlı çalışmalarını durdurmuş durumdadır. Bu kısmın hazırlanmasında [78] numaralı kaynaktan yararlanılmıştır [62].

Passport teknolojisi, verinin ev içi elektrik hatlarında iletiminde FSK modülasyon tekniğini kullanmaktadır. FSK, ağdaki bilgisayarlar arası sayısal veri transferinde, bir tanesi lojik-1'i diğeri lojik-0'ı temsil etmek üzere iki farklı frekans kullanır. Bu kırılğan yöntemin önemli bir kusuru, herhangi bir bozucu etkinin taşıyıcı frekanslarını etkilemesi durumunda, verici bilgisayarın yolladığı bilgiyi tekrar yollamasını gerektirecek veri bozulmalarına yol açmasıdır. Bu durum ağ performansını düşmesine yol açabilir [62].

Passport kitinde elektrik hattındaki gürültüyü azaltan özel güç kabloları bulunur. Bu kablolar kullanıcıların bilgisayarlarına ve prizlere takılırlar. 110 voltluk elektrik sistemlerinde, Passport teknolojisi fiziksel bağlantı noktası olarak bilgisayarların paralel portunu kullanır. Ayrıca modüllerinin çalışması için yükleme programına ihtiyaç duyar. Passport teknolojisi *istemci/sunucu (client/server)* ağ mimarisini kullanır. Yazılımın ilk yüklendiği bilgisayar *uygulama sunucusu (application server)* olur. Passport teknolojisinin bazı eksileri aşağıda verilmiştir [62].

- Yavaş bağlantı hızı (*50 kbps – 350 kbps*)
- Ev içi enerji kullanımının performansı etkilemesi
- Yazıcı özelliklerini sınırlaması
- Yalnızca Microsoft Windows işletim sisteminde çalışması
- Güç hattı modüllerinin nispeten büyük olması
- Sadece 110 voltluk elektrik hatlarında çalışması
- Güvenli bir ağ için tüm bilgilerin şifrelenmiş olması zorunluluğu
- Eski elektrik hatlarının performansı azaltması

Plug-in PLX teknolojisi *datagram duyarlı çoklu erişim (DSMA, Datagram Sensing Multiple Access)* ve *merkezleştirilmiş simge geçişi (CTP, Centralized Token Passing)* teknolojilerinin bir birleşimidir [79]. DSMA'da bir düğüm ağa ilk kez girdiğinde diğeri paketlerin taşıyıcılarını denetleyip, ağ trafiğinin durmasını bekler. Ağ trafiği durduğunda kendi paketlerini yollar. Plug-in PLX teknolojisinde, küçük kontrol paketleri aynı anda birbirlerine karışmadan yollanabilir. Ayrıca Plug-in PLX, CEBus CAL ile uyumludur [79].

#### 1.6.8.4. X-10 Teknolojisi

X-10 veya X10, ev içi ağ ürünlerinin mevcut elektrik tesisatı üzerinden birbirleriyle haberleşmelerine imkan veren bir haberleşme protokolüdür. X-10 kod formatı 1978 yılında *Sears Home Control System* ve *Radio Shack Plug 'n' Power System* için *X-10 Inc.* firması tarafından geliştirilmiştir [80]. 25 yıllık X-10 teknolojisi başlangıçta ucuz maliyetli aydınlatma sistemleri ve cihaz kontrol sistemleri için geliştirilmiştir.

X-10 teknolojisi, X-10 uyumlu cihazların birbirleriyle haberleşmelerini sağlar. Fakat bu cihazlar ani gerilim sıçramalarında kolaylıkla hasar görmektedirler. Sinyal zayıflaması ve gerek ev içi gerek ev dışı gürültü kaynakları tarafından üretilen gürültüler X-10 haberleşmesini etkilemektedir. Ayrıca aynı hat üzerinden beslenen komşu evler arasında, bir evdeki X-10 komutu diğer evlerdeki cihazları da etkilemektedir. Güvenilirlik, X-10 ağının en büyük sorunudur [81]. X-10 ağında karmaşık ve beklenmedik hatalar kaçınılmazdır. Bu hatalar kendini tanımsız X-10 komutları şeklinde göstermektedir [62].

X-10 haberleşmesi başlangıçta tek yönlü olarak başladı. Ancak daha sonra çift yönlü haberleşme yeteneği de ilave edildi. X-10 haberleşmesinde çoğunlukla tek yönlü haberleşme kullanılır [76]. X-10 denetleyicileri alıcı modüllere sinyallerini AC elektrik hattı üzerinden yollar. X-10 modülleri basit cihazları kontrol eden prize bağlı adaptörlerdir. X-10 haberleşmesinde veri hızı sadece 60 bps (*bps, saniye başına bit, bit per second*) ile sınırlıdır [76]. X-10 kullanılarak ışık kontrolü ve ev içindeki herhangi bir elektrikli cihaz ilave bir hat gerekmeden kontrol edilebilir [62].

X-10 teknolojisi ve kaynak formu, ürünlerini bu standarda uygun olarak tasarlar, geliştirir, üretir ve satar. X10 Ltd. şirketi, kendi cihazları için çipler (*yongalar*) tasarlar ve içinde IBM, Thomson, Philips, Radio Shack, Leviton, Honeywell, Stanley, Ademco ve ADT'nin de bulunduğu diğer firmalar için ürünler üretir. IBM şirketi kendi ev yönetim cihazları için X-10 teknolojisine güvenmektedir [79]. X-10 grubuna göre şu ana kadar 100 milyondan fazla ürün şirketler aracılığıyla pazarlanmıştır [76]. PLC (*Güç Hattı Taşıyıcısı, Power Line Carrier*) cihazları olarak da bilinen bu ev otomasyon cihazları, daha ziyade müteahhitler tarafından ev satışlarını attırmak amacıyla satın alınmıştır. Ev otomasyon sistemleri lambaları, ev aletlerini, ısıtıcıları, klimaları ve benzeri cihazları kontrol eden alıcı modüllere sinyal yollayan, denetleyicilerden oluşmaktadır [62].



### 1.6.8.5. PowerPacket Teknolojisi

HomePlug Güç Hattı Birliği endüstrisinin ana ilkesi olan Intellon A.Ş.'nin PowerPacket™ teknolojisi, OFDM'in özel bir versiyonudur. PowerPacket, Intellon firmasının mevcut ev içi güç hattı üzerinden 14 Mbps veri hızı ile haberleşme yapılabilmesine olanak veren, yüksek hızlı güç hattı haberleşmesi teknolojisinin özel bir adıdır. PowerPacket ağ modelinin fiziksel ve ortama erişim katmanlarının tamamını kapsayan tam çözümdür. Bu teknoloji internet protokolü üzerinden ses transferi (*VoIP*, *Voice Over Internet Protocol*), Servis Kalitesi (*QoS*, *Quality of Service*) ve medya akışı gibi gelişmiş servisleri destekler [82]. OFDM, frekans seçmeli kanallarda yüksek veri hızlarında haberleşmeyi mümkün kılan, tayf verimliliğine sahip bir modülasyon tekniğidir. Bu teknik ile 100 Mbps'lık veri hızlarını aşmak mümkündür [83]. OFDM modülasyonunda, *alt taşıyıcılar* (*subcarriers*) olarak adlandırılan çok sayıdaki dar bantlı taşıyıcı ile eş zamanlı veri iletim yapmak esastır. Her taşıyıcı düşük veri hızlarında modüle edilmiştir. Ancak tüm taşıyıcılar toplandığında ortaya çok yüksek veri hızları çıkmaktadır [62]. Zaten yüksek veri hızı gerektiren güç hattı haberleşmesi uygulamaları için OFDM tavsiye edilmektedir.

### 1.6.8.6. Cogency's HomePlug Teknolojisi

1997 yılında Kanada'nın Toronto kentinde Cogency Semiconductor Inc. tarafından geliştirilmiştir. Cogency's HomePlug teknolojisi OFDM, sinyal kodlama ve hata düzeltme tekniklerinin bir karışımıdır [62]. Bu teknoloji hakkında daha geniş ve güncel bilgilere [84] numaralı kaynakta verilen internet adresinden ulaşabilirsiniz.

Bu kısım [85] numaralı kaynaktan yararlanılarak hazırlanmıştır. Cogency's teknolojisi güç hattı ağları için bir tanesi *fiziksel* (*PHY*, *Physical*) diğeri *Ortam Erişim Kontrolü* (*MAC*, *Medium Access Control*) olmak üzere iki katmandan oluşur. Fiziksel katmanda iletim tekniği olarak paket tabanlı OFDM kullanılır. MAC ise birden fazla istemci arasında dolaylı erişimi gerçekleştirmek için CDMA/CA kullanır [62].

Cogency's MAC/PHY katmanları paket başına eşitleme ve paylaşılan güç hattı ortamına verimli erişimi sağlar. İlave olarak özel çözünürlüklü işaretleme planı ile VoIP ve birden fazla oyunculu oyunlar gibi *gecikme duyarlı* (*latency-sensitive*) uygulamaları mümkün kılar [62].

Cogency's HomePlug teknolojisi, ev içi ağ haberleşmesi için güvenilir veri iletimi sağlayarak, güç hattı ağ haberleşmesi için sağlam bir çözüm sunar. Cogency's MAC/PHY katmanları, en gürültülü ortamlarda bile güvenli bir kanal bularak, güç hattındaki değişimlere otomatik olarak uyum sağlar. Çoklu yol bozulmaları OFDM teknolojisinde dikkate alınmalıdır. Gizlilik yönetimi 56 bitlik şifreleme yöntemleri ile sağlanır. Cogency's HomePlug teknolojisi, ethernet sınıfı ağ haberleşmesini mümkün kılar. Ayrıca VoIP, QoS ve medya akışı uygulamalarını da destekler [62].



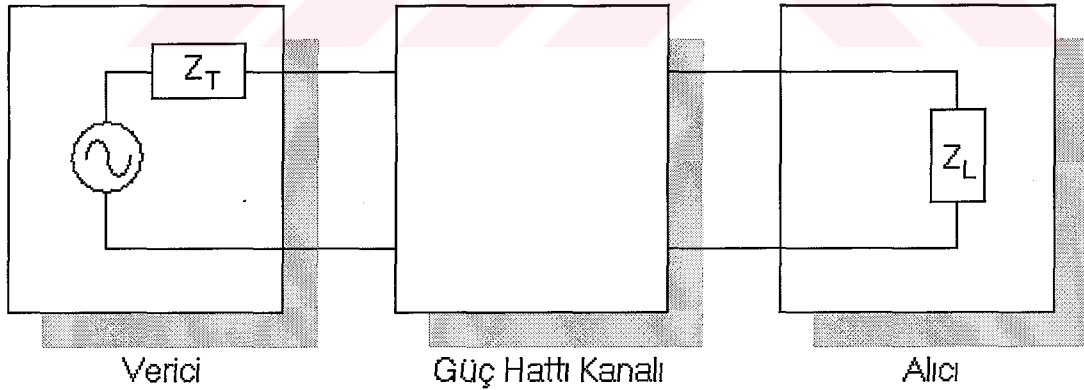
## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA

### 2.1. Giriş

Bu çalışmada, güç hattı haberleşme sistemi modellenmiş ve bu model doğrultusunda haberleşme sisteminin simülasyonu yapılmıştır. Haberleşme sisteminin simülasyonu için bir simülator programı (*PLSIM, Güç Hattı Simülatorü, Powerline Simulator*) geliştirilmiş ve endüktif kuplaj yöntemi kullanılarak güç hattındaki arka plan gürültüsü zaman bölgesinde incelenmiştir.

### 2.2. Güç Hattı Haberleşme Sisteminin Modellenmesi

Güç hattı haberleşmesi sistem modeli verici, güç hattı kanalı ve alıcı olmak üzere üç birimden oluşmaktadır. Bu sistem modeli Şekil 19.'da görülmektedir.



Şekil 19. Güç hattı haberleşmesi sistem modeli

Şimdi bu birimleri kısaca tanıyalım.

- **Verici** : Çalışma frekansı ( $f_s$ ), en büyük sinyal genliği ( $s_p$ ) ve verici çıkış empedansı ( $Z_T$ ) olmak üzere üç temel parametreye sahiptir. En büyük verici sinyal genliği aşağıdaki gibi tanımlanabilir.



$$s_p = \max\{|s(t)|\} \quad (14)$$

Burada  $s(t)$  verici çıkış sinyalidir.

- **Güç hattı kanalı** : Haberleşme kanalı verici ile alıcı arasındaki fiziksel ortamdır. Transfer fonksiyonu ( $H(f)$ ), darbe cevabı ( $h(t)$ ) ve toplamsal gürültü ( $n(t)$ ) olmak üzere üç temel parametreye sahiptir.
- **Alıcı** : Giriş empedansı ( $Z_L$ ) alıcının en önemli parametresidir.

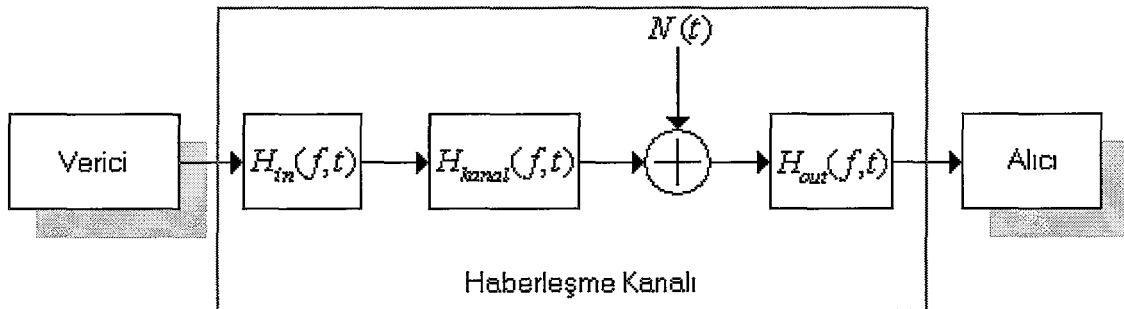
### 2.2.1. Güç Hattı Haberleşmesi Kanal Modeli

Güç hattı haberleşme sisteminde performansı düşüren bazı bozucu etkiler vardır [86].

Bunlar:

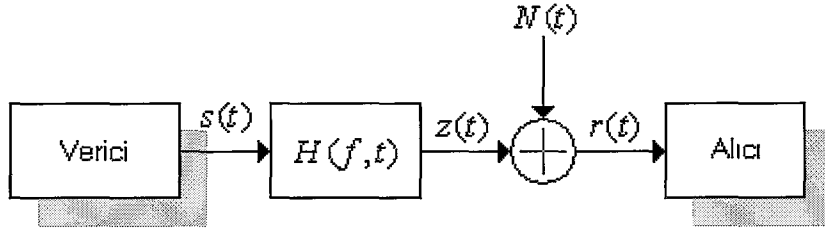
- Verici tarafındaki empedans uyumsuzlukları
- Kanalın sinyal zayıflatması
- Bozulmalar (*gürültü*)
- Alıcı tarafındaki empedans uyumsuzlukları
- Bozucu etkilerin zamanla değişimi

Şekil 20.'de yukarıdaki tüm parametreleri kapsayan bir kanal modeli görülmektedir [86]. Gürültü dışındaki tüm bozucu etkiler kendi frekans cevapları tarafından karakterize edilen *zamanla değişen doğrusal filtre (time-variant linear filters)* davranışı göstermektedir [87, 88].



Şekil 20. Güç hattı kanalında görülen bozucu etkiler [86].

Tüm bu bozucu etkiler Şekil 21.'de gösterildiği gibi toplamsal gürültü ve bir tane zamanla değişen doğrusal filtreden oluşan tek filtre modeli haline getirilebilir [86].



Şekil 21. Güç hattı kanalının basitleştirilmiş modeli [86].

Bu model basit olmasına rağmen haberleşme sisteminin tasarımı ve performans analizi için gerekli olan tüm özellikleri kapsar [87]. Transfer fonksiyonu ve gürültü, ölçüm yoluyla veya teorik analiz yapılarak tahmin edilebilir. [89, 91, 94, 96, 97, 98, 99, 100] numaralı kaynaklardan bazı ölçüm sonuçlarına ve [90, 92, 93, 95, 96, 101, 102] numaralı kaynaklardan da geliştirilmiş bazı teorik modellere ulaşılabilir. Güç hattı karakteristiklerinin değişken olması nedeniyle hâlâ bir çok ölçüme ve modellemeye gereksinim duyulmaktadır [86].

Transfer fonksiyonu  $H(f)$  ve darbe cevabı  $h(t)$  olan bir kanal üzerinden iletim esnasında  $s(t)$  sinyali zayıflar ve toplamsal gürültü nedeniyle bozulmaya uğrar. Biz alıcı tarafında, zayıflatılmış verici sinyali  $z(t)$  ile toplamsal gürültünün bir karışımı olan  $r(t)$  sinyalini alırız [48].

$$r(t) = h(t) * s(t) + n(t) \quad (15)$$

Alınan sinyal  $r(t)$  üzerinden mesaj bulma işleminde işaret gürültü gücü oranı (SNR, *S/R, Signal-to-Noise Power Ratio*) önemli rol oynar. Bit hata olasılığı (BEP, *Bit Error Probability*) SNR tarafından belirlenir. Alıcı tarafındaki SNR kullanılan frekans bölgesindeki sinyal zayıflaması ve girişimden yararlanılarak hesaplanabilir. Kanal modelindeki tek bağımsız parametre verici sinyal genliğidir ( $|s(t)|$ ) [48].

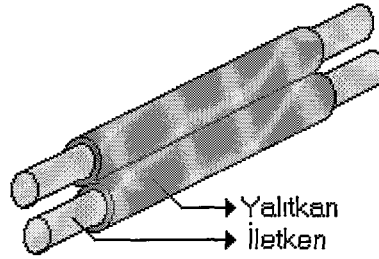
### 2.2.2. Giriş Empedansı

Geleneksel haberleşmede empedans uyumunun sağlanmasında, 50  $\Omega$ 'luk verici-alıcı için 50  $\Omega$ 'luk kablo kullanmak yeterlidir. Ancak güç hattı şebekesi için bu durum söz konusu değildir. Güç hattında giriş veya çıkış empedansı zamana, yüklere ve konuma bağlı

olarak değişir. Duruma göre giriş veya çıkış empedansı birkaç miliohm ( $m\Omega$ ) kadar küçük ve birkaç kiloohm ( $k\Omega$ ) kadar büyük olabilir [2, 24, 31, 34, 38, 53, 86].

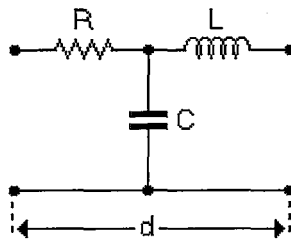
Giriş empedansı ( $Z$ ) verici tarafından görülen empedanstır. Güç hattı haberleşmesi kanalını tek fazlı alçak gerilim kablosu kabul ederek hat modelini oluşturalım.

Alçak gerilim kabloları biri faz diğeri nötr olmak üzere yalıtılmış iki iletkenen oluşmaktadır.



Şekil 22. Tek fazlı alçak gerilim kablosu

İletim hattı kullanılan iletkenin cinsine, boyuna ve kesitine bağlı olarak bir tel direncine ( $R$ ), hattan akım aktığı durumda oluşan manyetik alandan dolayı bir hat endüktansına ( $L$ ) ve elektrik alandan dolayı bir hat kapasitesine ( $C$ ) sahiptir. Bu hat parametreleri göz önüne alınarak, yapılacak tüm hesaplamalarda Şekil 23'deki hat modeli kullanılacaktır.



Şekil 23. Hat modeli

Hat boyunu  $d$ , iletken boyunu  $l$  olarak tanımlayalım. Bu durumda iletken boyu

$$l = 2d$$

(16)

şeklinde ifade edilebilir. Hattın tel direnci  $R$ , endüktansı  $L$  ve kapasitesi  $C$  simgeleri ile temsil edilsin. Hattın  $R$ ,  $L$  ve  $C$  parametreleri ölçülerek bulunabileceği gibi üretici firmalar tarafından verilen katalog bilgileri kullanılarak da hesaplanabilir.

Kilometre başına hat direnci  $R_{km}$ , kilometre başına hat endüktansı  $L_{km}$ , kilometre başına hat kapasitesi  $C_{km}$ , endüktif reaktans  $X_L$ , kapasitif reaktans  $X_C$ , açısal hız  $\omega$  ve frekans  $f$  olmak üzere aşağıdaki ifadeler elde edilebilir.

$$R = R_{km}l \quad [\Omega] \quad (17)$$

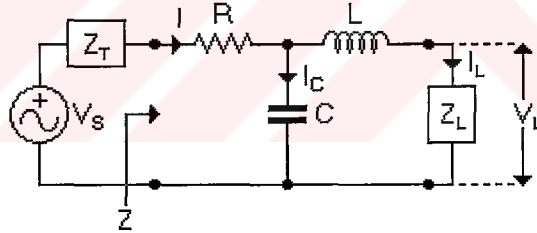
$$L = L_{km}l \quad [H] \quad (18)$$

$$C = C_{km}d \quad [F] \quad (19)$$

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad [\Omega] \quad (20)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad [\Omega] \quad (21)$$

Şimdi bu hat modelini kullanarak giriş empedansının ifadesini çıkartalım.



Şekil 24. Sistem modeli

$Z$  giriş empedansı,  $Z_T$  verici çıkış empedansı,  $Z_L$  alıcı giriş empedansı,  $V_s$  kaynak gerilimi,  $V_L$  alıcı giriş gerilimi,  $I$  ana kol akımı,  $I_C$  kapasite üzerinden akan akım ve  $I_L$  alıcı giriş akımıdır. Alıcı giriş empedansı  $Z_{Lx}$  ve  $Z_{Ly}$  olmak üzere reel ve imajiner bileşenlerden oluşmaktadır. Aynı şekilde giriş empedansı da reel  $Z_x$  ve imajiner  $Z_y$  bileşenlerinden oluşur.

$$Z = Z_x + jZ_y \quad (22)$$

$$Z = Z_{Lx} + jZ_{Ly} \quad (23)$$

Giriş empedansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
 Z &= R + (X_C // (Z_L + X_L)) \\
 &= R + \left( \frac{1}{j\omega C} // (Z_L + X_L) \right) \\
 &= R + \left( \frac{Z_L + j\omega L}{j\omega C} \right) \left( \frac{1 + j\omega C Z_L - \omega^2 LC}{j\omega C} \right)
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$Z = R + \frac{Z_L + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega C Z_L} \tag{25}$$

(23) numaralı eşitlik (25) numaralı eşitlikte yerine yazılırsa

$$Z = R + \frac{Z_{Lx} + j(Z_{Ly} + \omega L)}{(1 - \omega^2 LC - \omega C Z_{Ly}) + j\omega C Z_{Lx}} \tag{26}$$

(26) numaralı eşitlik elde edilir. İfadeyi basitleştirmek için denklem parçaları ( $dp$ ) tanımlayalım.

$$dp_1 = Z_{Lx} + j(Z_{Ly} + \omega L) \tag{27}$$

$$dp_2 = (1 - \omega^2 LC - \omega C Z_{Ly}) + j\omega C Z_{Lx} \tag{28}$$

$$Z = R + \frac{dp_1}{dp_2} \tag{29}$$

(29) numaralı eşitlikte paydayı reel yapmak için payı ve paydayı  $dp_2$ 'nin eşleniği ( $dp_2^*$ ) ile çarpalım.

$$dp_3 = dp_1 dp_2^* = Z_{Lx} + j(\omega L + \omega^3 L^2 C + \omega C(Z_{Lx}^2 + Z_{Ly}^2)) + Z_{Ly}(1 - 2\omega^2 LC) \tag{30}$$

$$dp_4 = dp_2 dp_2^* = (1 - \omega^2 LC - \omega C Z_{Ly})^2 + (\omega C Z_{Lx})^2 \tag{31}$$

$$Z = R + \frac{dp_3}{dp_4} \tag{32}$$

(32) numaralı eşitliği basitleştirmek için  $a_z$  ve  $b_z$  olmak üzere iki yeni değişken tanımlatalım.

$$a_z = \omega L + \omega^3 L^2 C + \omega C (Z_{Lx}^2 + Z_{Ly}^2) + Z_{Ly} (1 - 2\omega^2 LC) \quad (32)$$

$$b_z = dp_4 = (1 - \omega^2 LC - \omega C Z_{Ly})^2 + (\omega C Z_{Lx})^2 \quad (33)$$

$$Z = R + \frac{Z_{Lx}}{b_z} + j \frac{a_z}{b_z} \quad (34)$$

Sonuç olarak

$$Z_x = R + \frac{Z_{Lx}}{b_z} \quad (35)$$

$$Z_y = \frac{a_z}{b_z} \quad (36)$$

$$Z = Z_x + jZ_y \quad (22)$$

$$|Z| = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2} \quad (37)$$

$$\alpha_z = \tan^{-1} \left( \frac{Z_y}{Z_x} \right) \quad (38)$$

$$Z = |Z| e^{j\alpha_z} \quad (39)$$

giriş empedansı (32), (33), (35), (36) ve (22) numaralı eşitlikler kullanılarak, giriş empedansının genliği (37) numaralı eşitlik ve giriş empedansının fazı (38) numaralı eşitlik kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir.

### 2.2.3. Sinyal Zayıflaması

Sinyal zayıflaması ( $D(f)$ , *Attenuation*) zamana, frekansa ve mesafeye olarak değişmektedir. Sinyal zayıflamasının gece-gündüz hassasiyeti olmakla beraber frekans ve mesafenin artması ile de artar. Genelde iletilen sinyalin km başına 100 dB zayıfladığı kabul edilir [63].

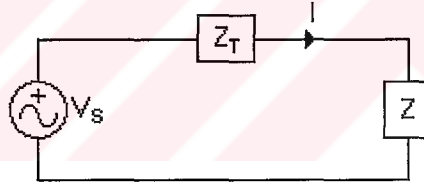
$H(f)$  transfer fonksiyonu olmak üzere  $D(f)$  sinyal zayıflaması aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$D(f) = -20 \log_{10} |H(f)| \quad [dB] \quad (40)$$

(40) numaralı eşitlikten de anlaşılacağı gibi sinyal zayıflamasını bulmamız için öncelikle transfer fonksiyonunu bulmalıyız. Şekil 24.'deki sistem modeli için transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$H(f) = \frac{V_L(f)}{V_s(f)} \quad (41)$$

Transfer fonksiyonunu elde etmek için kaynak gerilimi ( $V_s$ ) ve alıcı giriş gerilimini ( $V_L$ ) bulmalıyız. Giriş empedansından yararlanarak sistem modelini aşağıdaki gibi basitleştirelim.



Şekil 25. Basitleştirilmiş yapı

Ana kol akımı  $I$  ve alıcı giriş akımı  $I_L$  olmak üzere kaynak gerilimi  $V_s$  ve alıcı giriş gerilimi  $V_L$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_s = I(Z_T + Z) \quad (42)$$

$$V_L = I Z_L \quad (43)$$

Şimdi ana kol akımını alıcı giriş akımı cinsinden ifade edelim.

$$I_C X_C = I_L (X_L + Z_L) \quad (44)$$

$$I_C = I_L \frac{X_L + Z_L}{X_C} \quad (45)$$

$$I = I_L + I_C = I_L \frac{X_C + X_L + Z_L}{X_C} \quad (46)$$

(46) numaralı eşitliği  $X_L = \omega L$ ,  $X_C = 1/\omega C$  ve  $Z_L = Z_{Lx} + Z_{Ly}$  olacak şekilde yeniden düzenleyelim.

$$I = I_L \frac{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L + Z_{Lx} + jZ_{Ly}}{\frac{1}{j\omega C}} \quad (47)$$

$$I = I_L \left( (1 - \omega^2 LC - \omega CZ_{Ly}) + j\omega CLZ_{Lx} \right) \quad (48)$$

(48) numaralı eşitliği basitleştirmek için  $a_h$  ve  $b_h$  olmak üzere iki yeni değişken tanımlayalım.

$$a_h = 1 - \omega^2 LC - \omega CZ_{Ly} \quad (49)$$

$$b_h = \omega CLZ_{Lx} \quad (50)$$

$a_h$  ve  $b_h$  değişkenlerini (48) numaralı eşitlikte yerine koyalım.

$$I = I_L (a_h + jb_h) \quad (51)$$

Böylece ana kol akımı alıcı giriş akımı cinsinden ifade edilmiş oldu. Şimdi (41) numaralı eşitliği kullanarak transfer fonksiyonunu bulalım.

$$H = \frac{V_L}{V_s} = \frac{I_L Z_L}{I(Z_T + Z)} = \frac{I_L Z_L}{I_L (a_h + jb_h)(Z_T + Z)} \quad (52)$$

$$H = \frac{Z_L}{(a_h + jb_h)(Z_T + Z)} \quad (53)$$

$$H = \frac{Z_L}{(a_h(Z_x + Z_{Tx}) - b_h(Z_y + Z_{Ty})) + j(a_h(Z_y + Z_{Ty}) + b_h(Z_x + Z_{Tx}))} \quad (54)$$



(54) numaralı eşitliği basitleştirmek için  $c_h$  ve  $d_h$  olmak üzere iki yeni değişken tanımlayalım.

$$c_h = a_h(Z_x + Z_{Tx}) - b_h(Z_y + Z_{Ty}) \quad (55)$$

$$d_h = a_h(Z_y + Z_{Ty}) + b_h(Z_x + Z_{Tx}) \quad (56)$$

$$H = \frac{Z_L}{c_h + jd_h} \quad (57)$$

(57) numaralı eşitliğin paydasını reel yapmak için pay ve paydayı  $c_h - jd_h$  ile çarpalım.

$$H = \frac{Z_L(c_h - jd_h)}{(c_h + jd_h)(c_h - jd_h)} \quad (58)$$

$$H = \frac{c_h Z_{Lx} + d_h Z_{Ly}}{c_h^2 + d_h^2} + j \frac{c_h Z_{Ly} - d_h Z_{Lx}}{c_h^2 + d_h^2} \quad (59)$$

(59) numaralı eşitliği basitleştirmek için  $e_h$  ve  $f_h$  olmak üzere iki yeni değişken tanımlayalım.

$$e_h = \frac{c_h Z_{Lx} + d_h Z_{Ly}}{c_h^2 + d_h^2} \quad (60)$$

$$f_h = \frac{c_h Z_{Ly} - d_h Z_{Lx}}{c_h^2 + d_h^2} \quad (61)$$

Sonuç olarak

$$H = e_h + jf_h \quad (62)$$

$$|H| = \sqrt{e_h^2 + f_h^2} \quad (63)$$

$$\alpha_H = \tan^{-1} \left( \frac{f_h}{e_h} \right) \quad (64)$$

$$H = |H| e^{j\alpha_H} \quad (65)$$

Transfer fonksiyonu (49), (50), (55), (56), (60), (61) ve (62) numaralı eşitlikler kullanılarak, transfer fonksiyonunun genliği (63) numaralı eşitlik ve transfer fonksiyonunun fazı (64) numaralı eşitlik kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir.

Transfer fonksiyonu bulunduğuna göre (40) numaralı eşitlik kullanılarak zayıflatma kolaylıkla hesaplanabilir.

$$D(f) = -20 \log_{10} |H(f)| \quad [dB] \quad (40)$$

#### 2.2.4. Gürültü

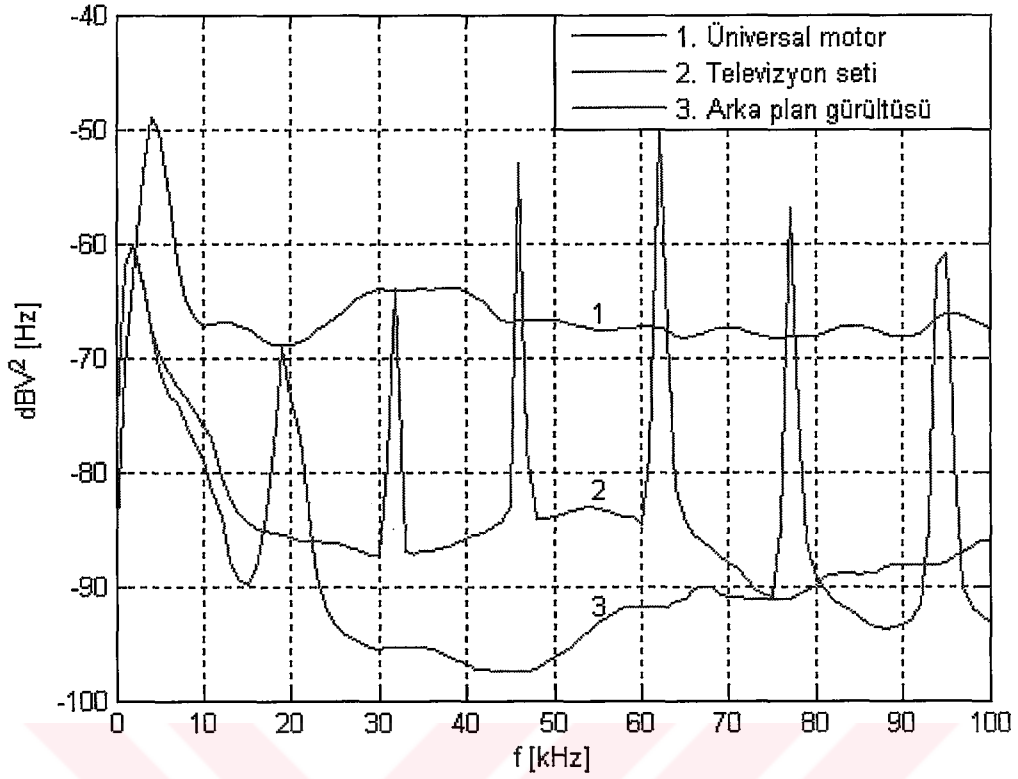
Güç hattı ağındaki gürültü çok karmaşıktır [59]. Bu gürültü beş grup halinde sınıflandırılabilir [103].

1. Renkli arka plan gürültüsü
2. Dar bantlı gürültü
3. Periyodik darbesel gürültü
4. Periyodik gürültü
5. Asenkron darbesel gürültü

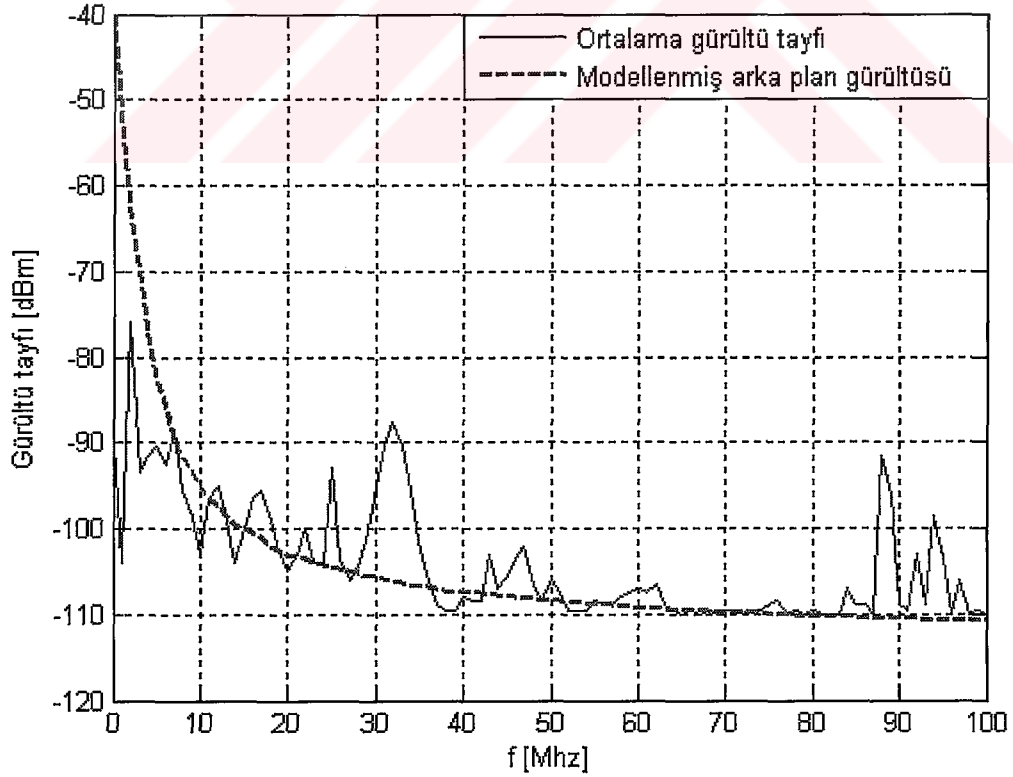
Bunlar içerisinde en önemlileri renkli arka plan gürültüsü ve asenkron darbesel gürültüdür [103].

Güç hattındaki gürültünün modellenmesi ve simülasyonu başlı başına bir yüksek lisans veya doktora konusudur. Bu nedenle bu çalışmada bazı araştırmacılar tarafından ölçülmüş referans gürültüler kullanılmıştır. Bu gürültüler düzenlenip, *MATLAB 7.0* programı kullanılarak yeniden çizdirilmiştir. *MATLAB teknik hesaplama dili* hakkında daha geniş bilgi için [107, 108, 109] numaralı kaynaklardan yararlanabilirsiniz.

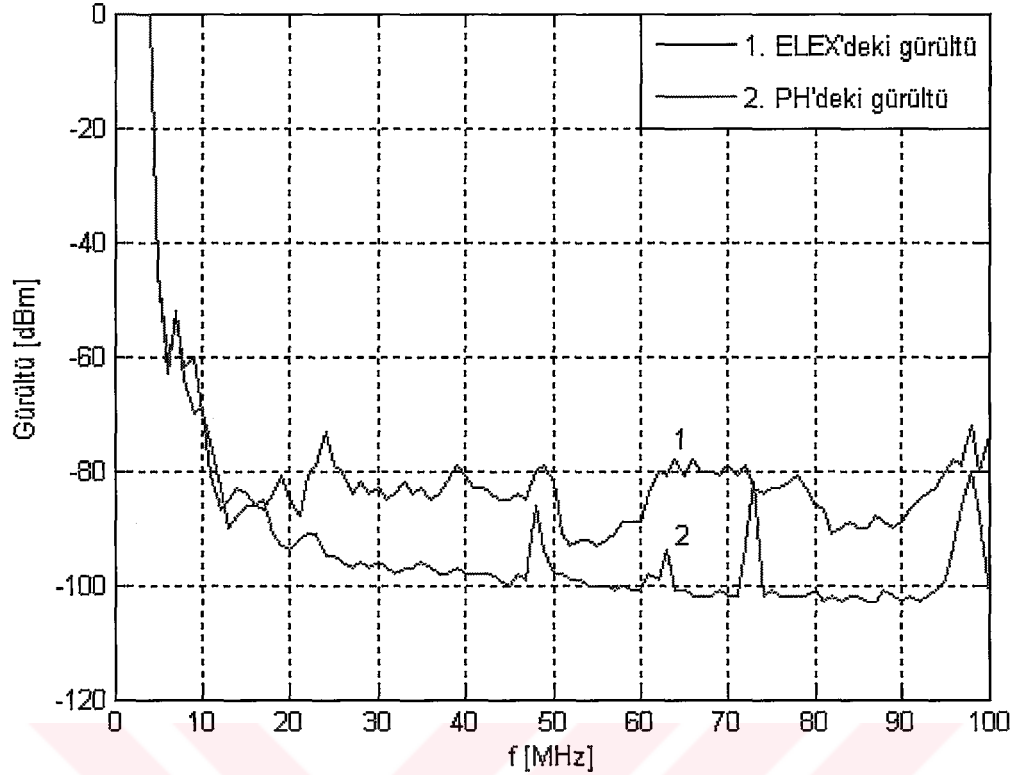
Referans gürültüler aşağıda verilmiştir.



Şekil 26. Ünersal motor, televizyon seti ve arka plan gürültüsü [104,105].



Şekil 27. Ortalama gürültü tayfı ve modellenmiş arka plan gürültüsü [103].



Şekil 28. ELEX'deki ve PH'deki gürültü [106].

### 2.3. Güç Hattı Haberleşme Sisteminin Simülasyonu

Güç hattı haberleşme sisteminin simülasyonu *PLSIM (Güç Hattı Simülatörü, Power Line SIMulator)* programı tarafından gerçekleştirilmektedir. Şimdi *PLSIM* programını tanıyalım.

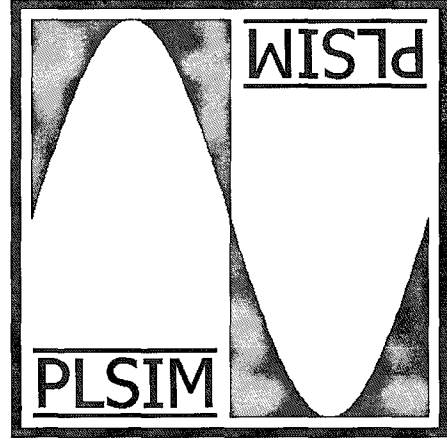
#### 2.3.1. Güç Hattı Simülatör Programı

*PLSIM* programı *C++* programlama dilinde yazılmıştır. Program *Borland C++ Builder Enterprise Suite Version 6.0* yazılım editörü kullanılarak *Microsoft Windows XP* uyumlu olarak hazırlanmıştır. *PLSIM* tarafından kullanılan resim dosyaları, program logoları ve ikonlar *Borland Image Editor Version 3.0* ve *Microsoft Paint Sürüm 5.1* programları kullanılarak hazırlanmıştır. Programın hazırlanmasında, temel *C++* komutlarının kullanımı hakkında [110, 111, 112, 113] numaralı kaynaklardan, *Windows* görselliğinin sağlanmasında [114, 115, 116, 117, 118] numaralı kaynaklardan yararlanılmıştır.

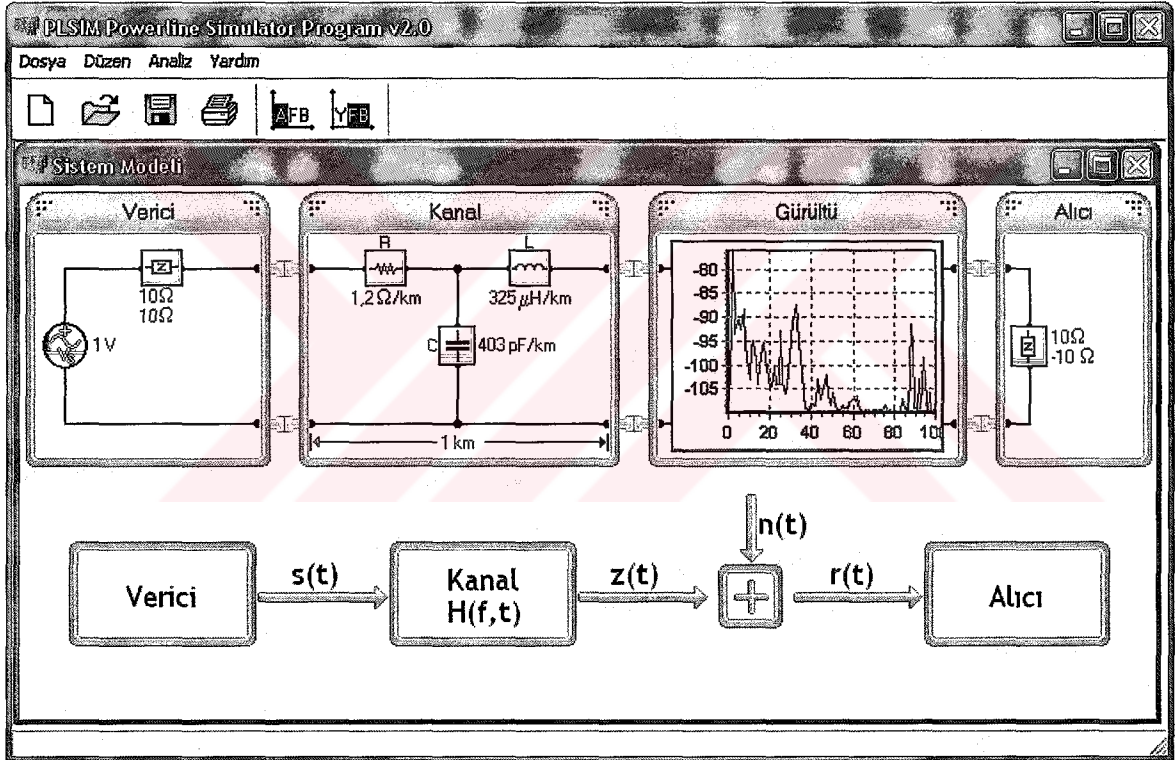
POWERLINE SIMULATOR PROGRAM

PLSIM

POWERLINE SIMULATOR PROGRAM



Şekil 29. PLSIM programı logoları



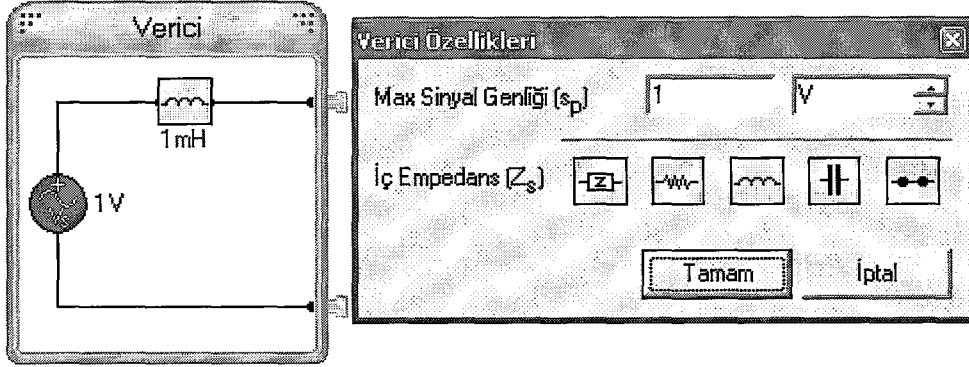
Şekil 30. PLSIM programından genel bir görünüm

### 2.3.2. Güç Hattı Simülör Programı Sistem Birimleri

PLSIM programı *verici*, *kanal*, *gürültü* ve *alıcı* olmak üzere dört temel birimden oluşmaktadır.

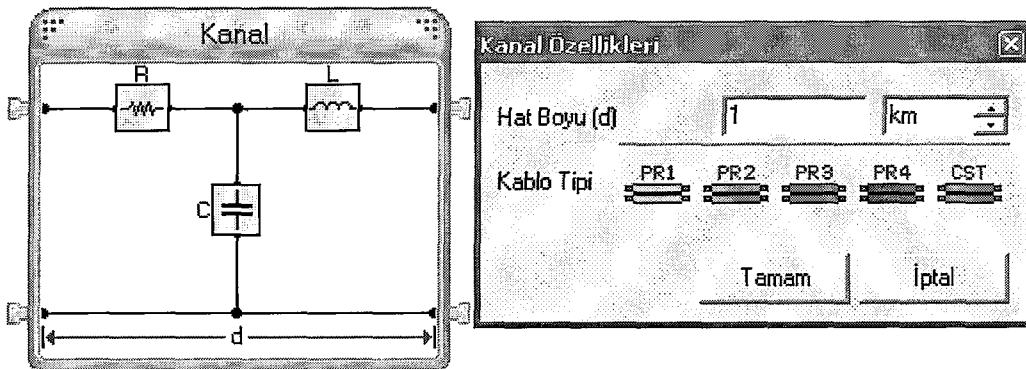
1. **Verici** : En büyük sinyal genliği ve iç empedans olmak üzere iki temel parametreye sahiptir. En büyük sinyal genliği  $dB\mu V$ ,  $dBmV$ ,  $mV$  ve  $V$  cinsinden

herhangi bir değere ayarlanabilir. İç empedans ise *direnç*, *endüktans*, *kapasite*, *empedans* ve *kısa-devre* olarak seçilebilir.



Şekil 31. Verici ve verici özellikleri

2. **Kanal** : *Hat boyu* ve *kablo tipi* olmak üzere iki temel parametreye sahiptir. Hat boyu için *mm*, *m* ve *km* cinsinden herhangi bir değer girilebilir. Kablo tipi olarak Piirelli firmasına ait dört farklı kablo (*Pirelli 252CLOBAC*, *Pirelli 352CLOBAC*, *Pirelli 502CLOBAC*, *Pirelli 952CLOBAC*) ve parametreleri ( $R_{km}$ ,  $L_{km}$ ,  $C_{km}$ ) kullanıcı tarafından belirlenen *kullanıcıya özel kablo* seçilebilir. Piirelli firmasına ait bu dört tip kablo hakkında daha geniş bilgi için [119] numaralı kaynaktan yararlanabilirsiniz.

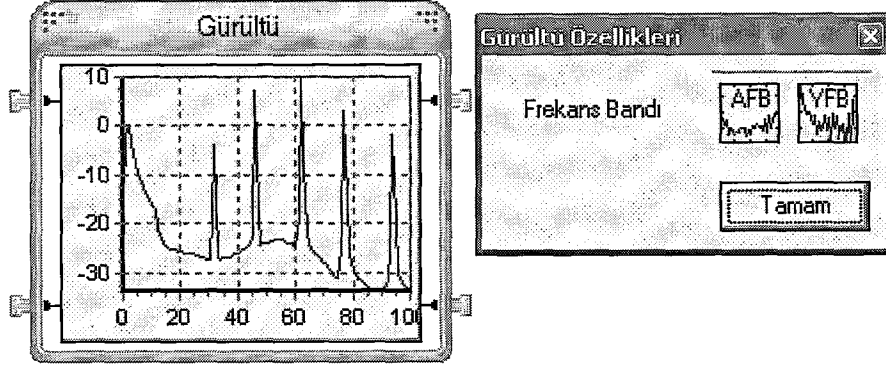


Şekil 32. Kanal ve kanal özellikleri

3. **Gürültü** : Gürültü, kullanıcı tarafından üç tanesi alçak frekans bandında (*AFB*), dört tanesi yüksek frekans bandında (*YFB*), toplam yedi referans gürültüden herhangi biri olarak seçilebilir. Aynı zamanda bu referans gürültülerin genlikleri

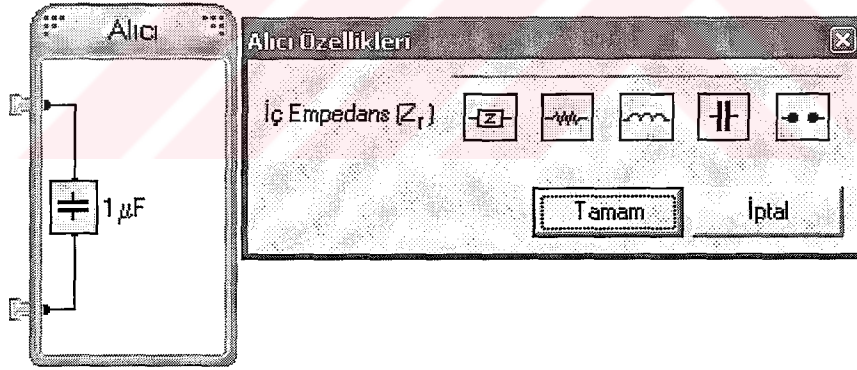


*Gürültü Çarpanı* parametresi ile artırılıp azaltılabilir. Gürültü çarpan kullanıcı tarafından  $0 < \text{Gürültü Çarpanı} < 10^7$  aralığında  $10^{-6}$  çözünürlükte herhangi bir değer olarak girilebilir.



Şekil 33. Gürültü ve gürültü özellikleri

4. **Alıcı** : *İç empedans* olmak üzere tek temel parametreye sahiptir. *İç empedans direnç, endüktans, kapasite, empedans* ve *açık-devre* olarak seçilebilir.



Şekil 34. Alıcı ve alıcı özellikleri

### 2.3.3. Güç Hattı Simülasyon Programı ile Analiz

PLSIM programı, haberleşme sistemini AFB (*Alçak Frekans Bandı, 0 – 500 kHz*) ve YFB (*Yüksek Frekans Bandı, 1 MHz – 100 MHz*) olmak üzere iki farklı frekans bandında analiz etmektedir. AFB ve YFB analizlerinde aynı formüller ve algoritmalar kullanılmaktadır. İki analiz arasındaki en önemli fark her analiz için kendi frekans bandını ve kendi referans gürültülerini kullanıyor olmasıdır.

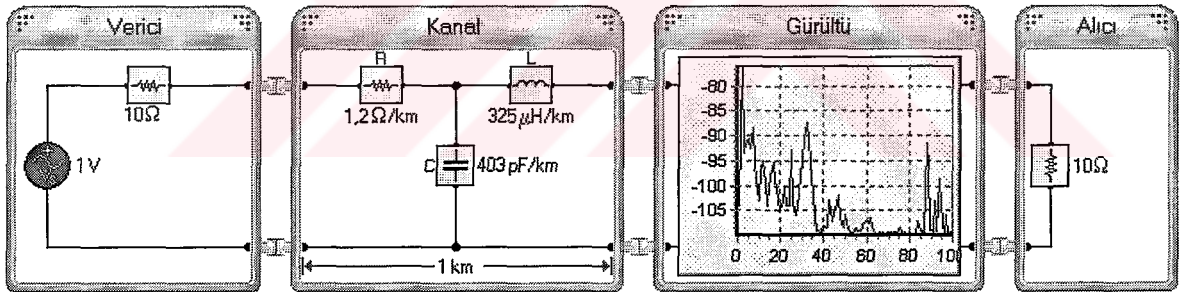




Şekil 35. AFB ve YFB analiz menusu

AFB ve YFB analizlerinde aşağıdaki grafikler oluşturulur.

1. İşaret gürültü oranı
2. Zayıflamış işaret
3. Transfer fonksiyonu
4. Sinyal zayıflaması
5. Giriş empedansı

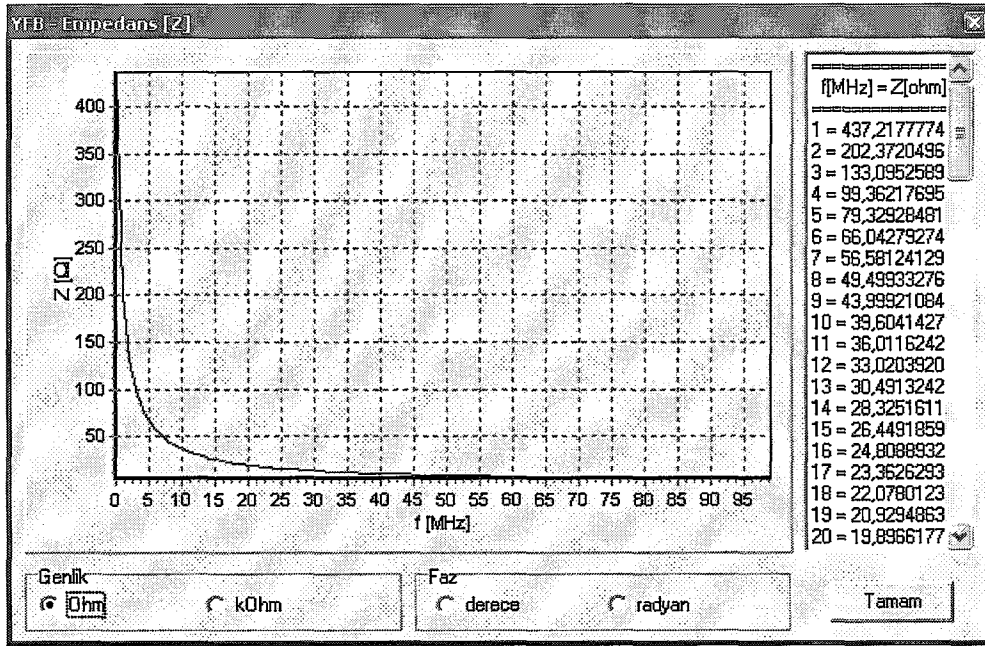


Şekil 36. Güç hattı haberleşmesi sistem modeli

Şekil 36.'da görülen sistem ve sistem parametreleri için bu grafikleri oluşturalım ve inceleyelim.

### 2.3.3.1. Giriş Empedansı

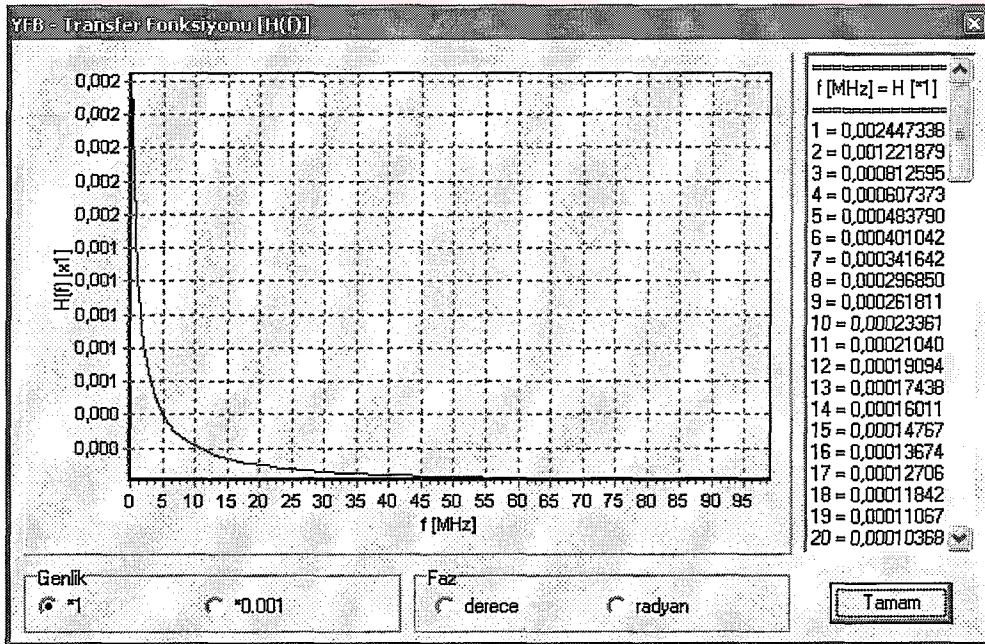
Giriş empedansı iletim hattı parametrelerine ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $d$ ), alıcı giriş empedansına ( $Z_L$ ) ve frekansa ( $f$ ) bağlı olarak değişir.



Şekil 37. Giriş empedansı

### 2.3.3.2. Transfer Fonksiyonu

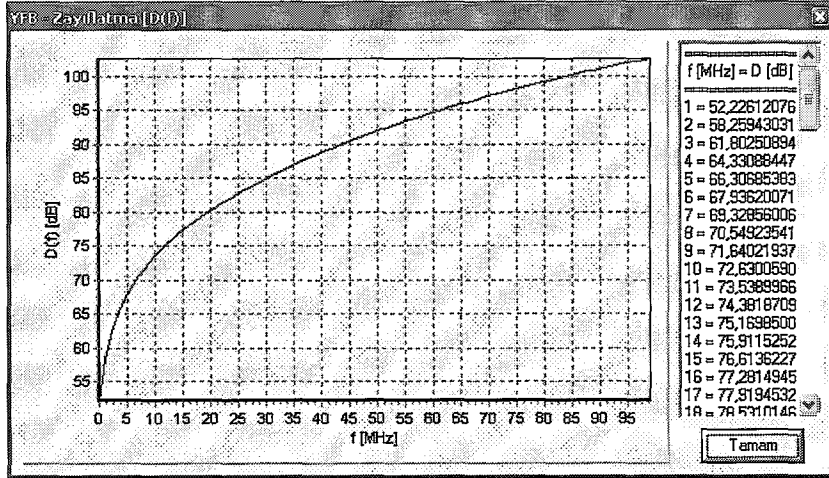
Transfer fonksiyonu verici çıkış empedansına ( $Z_T$ ), iletim hattı parametrelerine ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $d$ ), alıcı giriş empedansına ( $Z_L$ ) ve frekansa ( $f$ ) bağlı olarak değişir.



Şekil 38. Transfer fonksiyonu

### 2.3.3.3. Sinyal Zayıflaması

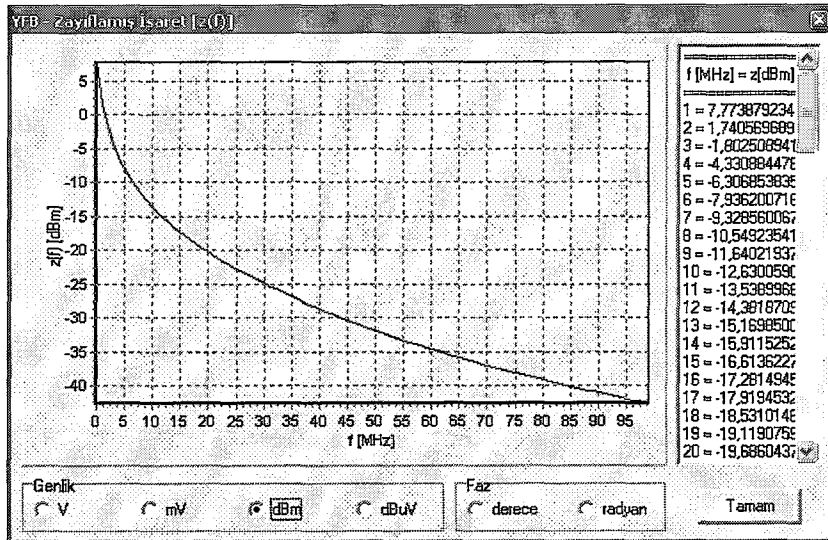
Sinyal zayıflaması transfer fonksiyonunun genliğine bağlı olarak değişir.



Şekil 39. Sinyal zayıflaması

### 2.3.3.4. Zayıflamış İşaret

Zayıflamış işaret en büyük verici sinyal genliğine ( $s_p$ ), verici çıkış empedansına ( $Z_T$ ), iletim hattı parametrelerine ( $R, L, C, d$ ), alıcı giriş empedansına ( $Z_L$ ) ve frekansa ( $f$ ) bağlı olarak değişir.

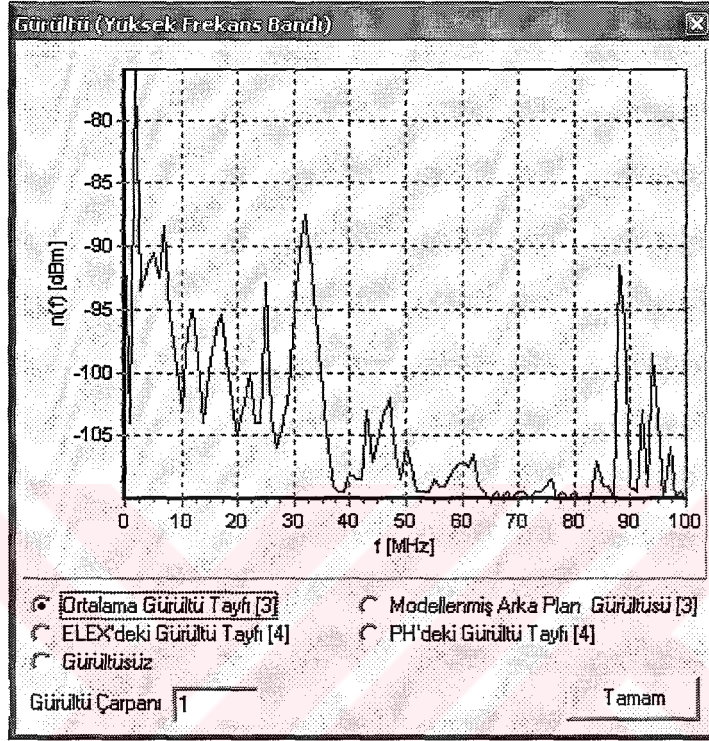


Şekil 40. Zayıflamış işaret

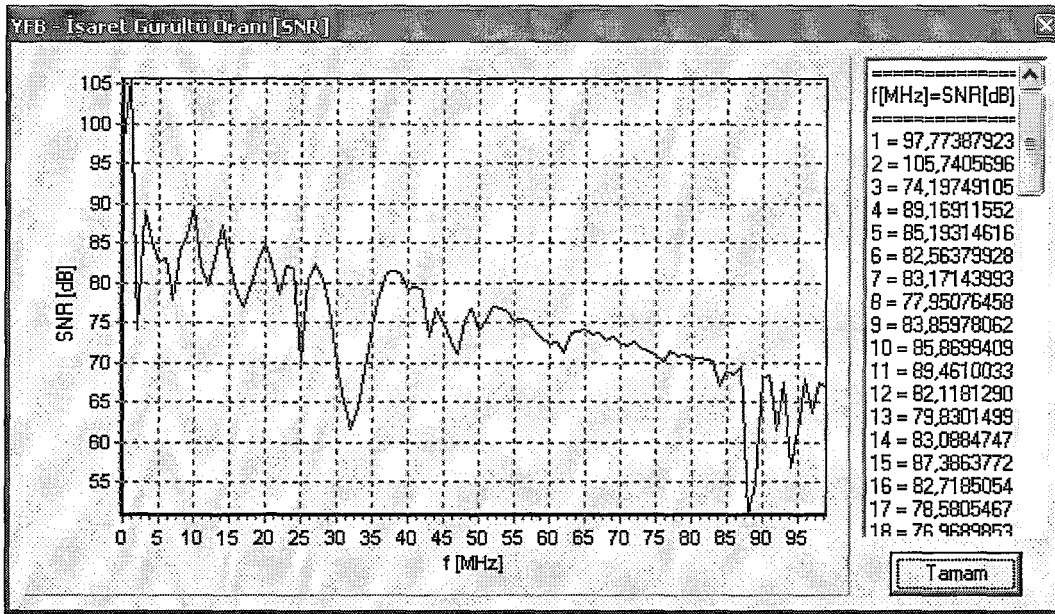


### 2.3.2.5. İşaret Gürültü Oranı

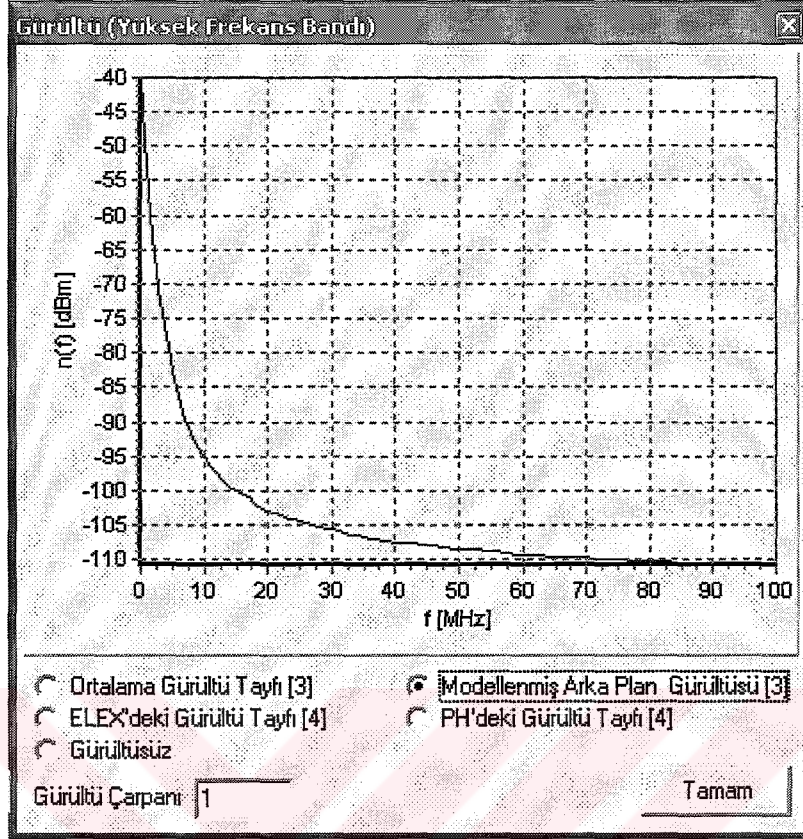
Zayıflamış işarete ve gürültüye bağlı olarak değişir.



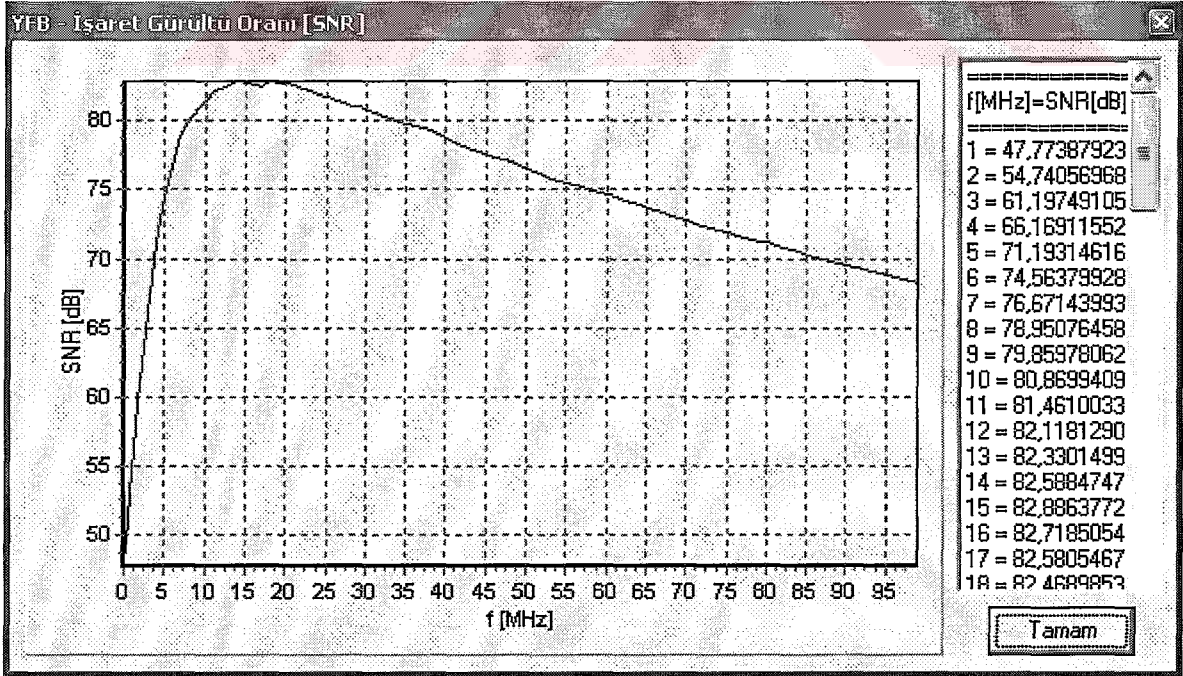
Şekil 41. Ortalama gürültü tayfı



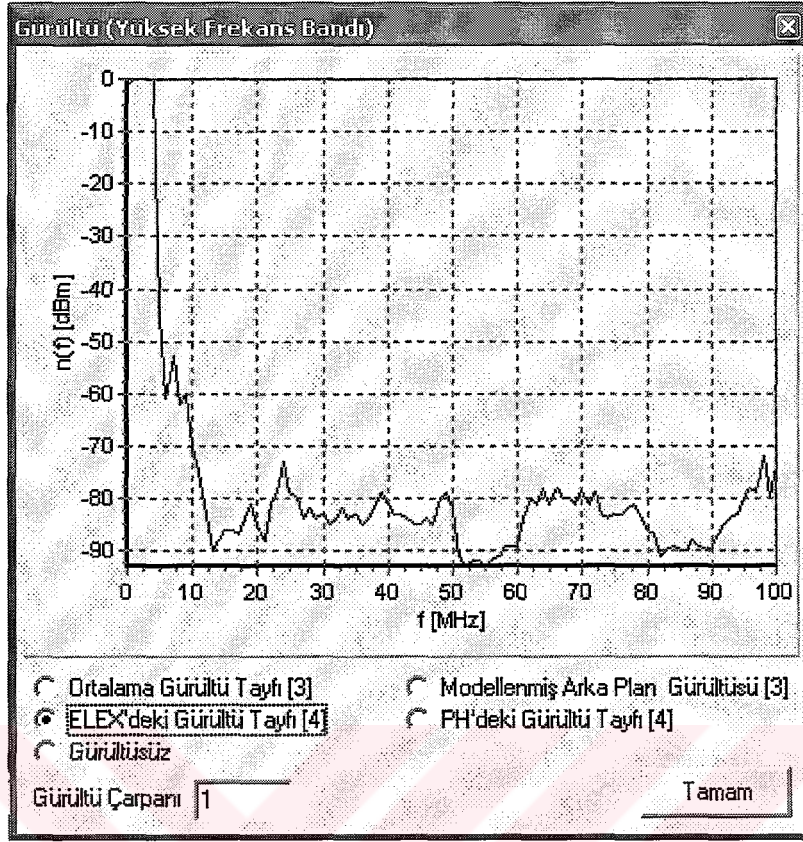
Şekil 42. Ortalama gürültü tayfı için SNR grafiği



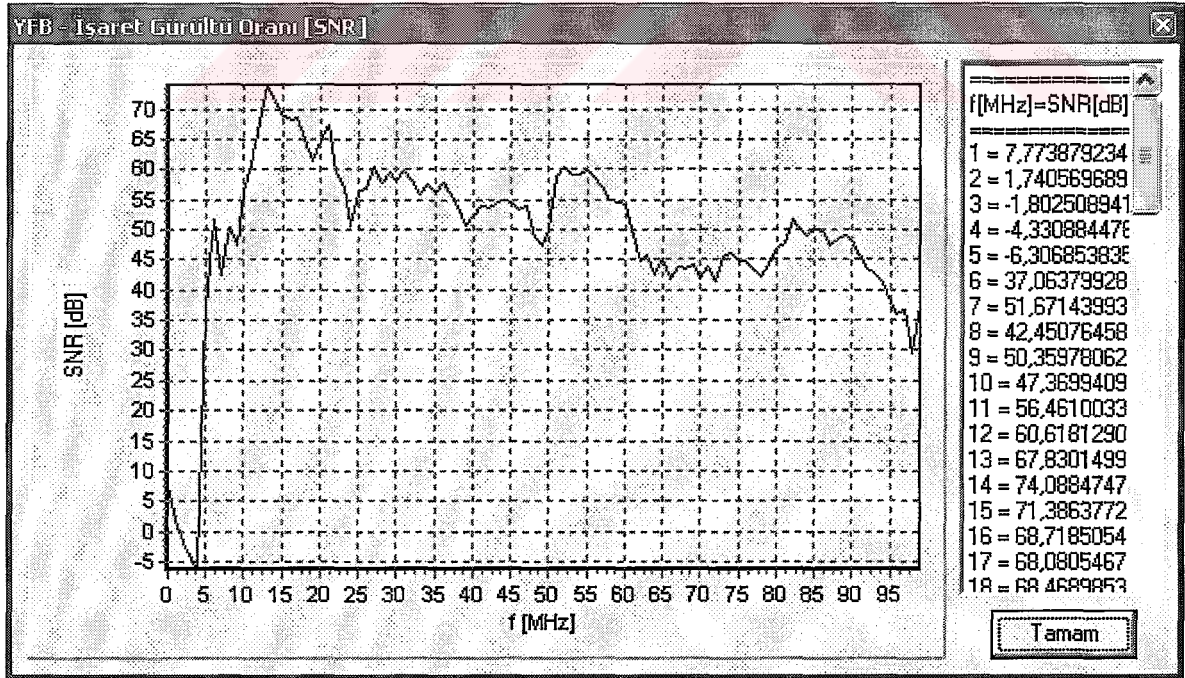
Şekil 43. Modellenmiş arka plan gürültüsü



Şekil 44. Modellenmiş arka plan gürültüsü için SNR grafiği

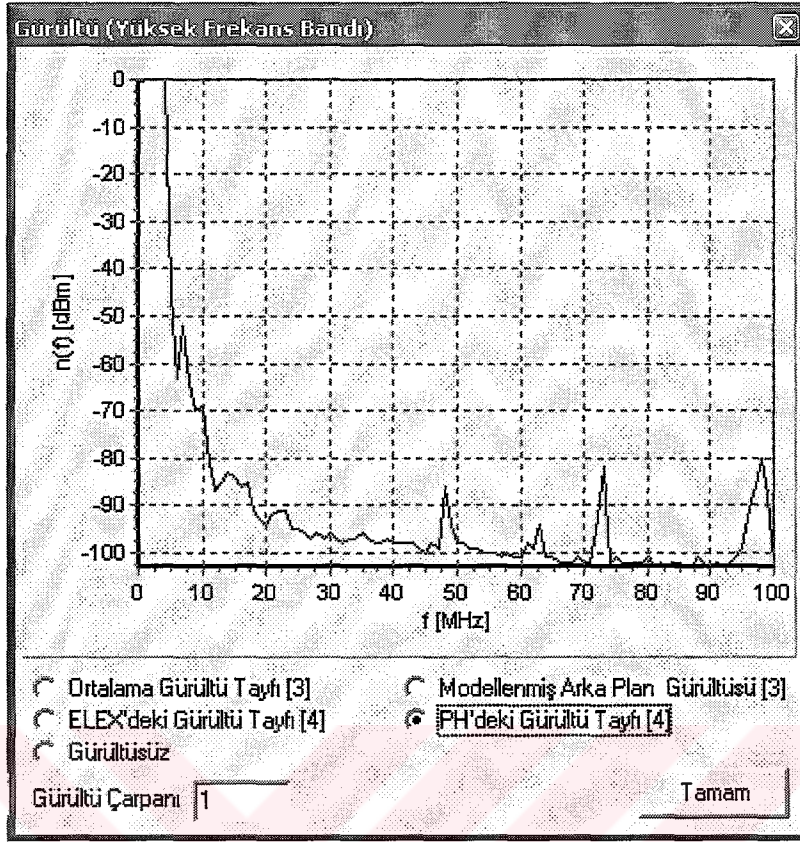


Şekil 45. ELEX'deki gürültü tayfı

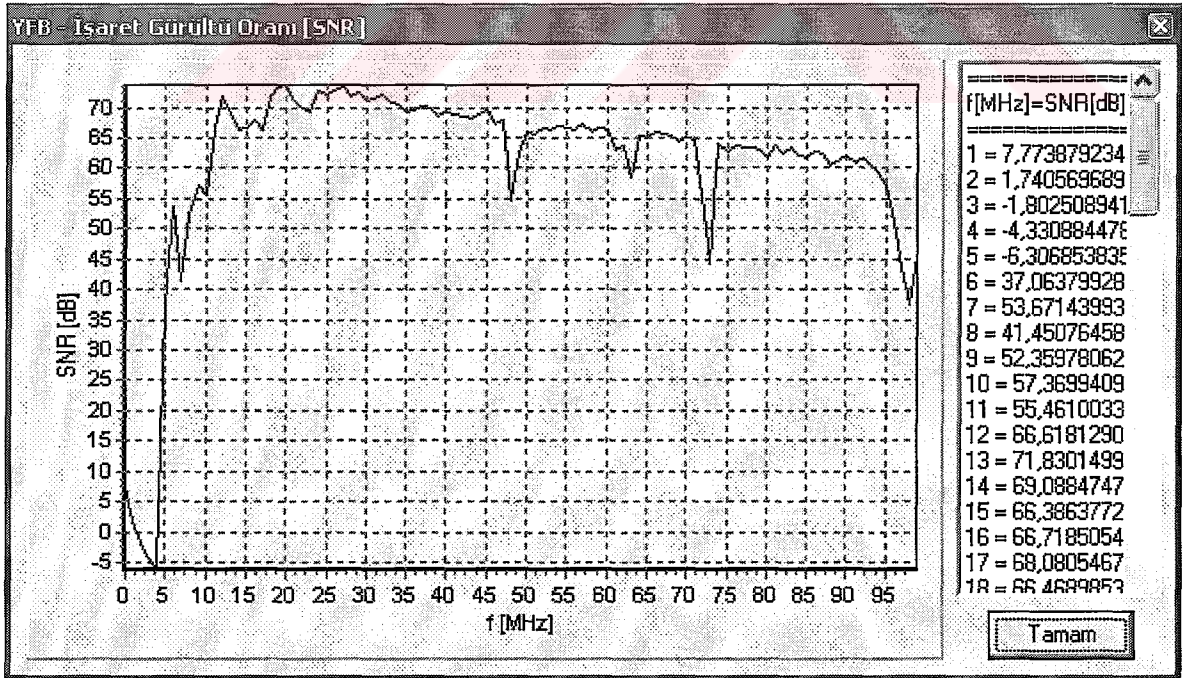


Şekil 46. ELEX'deki gürültü tayfı için SNR grafiği





Şekil 47. PH'deki gürültü tayfı



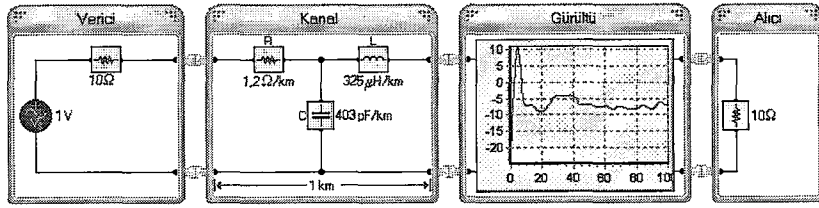
Şekil 48. PH'deki gürültü tayfı için SNR grafiği



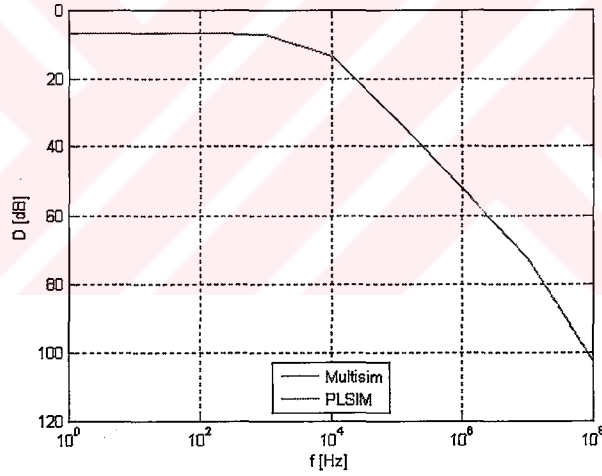
### 2.3.4. PLSIM Programının Multisim Programı ile Karşılaştırılması

Bu kısımda PLSIM programının *Multisim* programı ile karşılaştırılmasında *Multisim* 7.0 sürümü kullanılmış ve aşağıdaki sistem modelleri için sinyal zayıflamaları ( $D(f)$ ) hesaplanmıştır.

1. **Direç-direç durumu** : Veri çıkış empedansının direnç, alıcı giriş empedansının direnç olması durumudur.



Şekil 49. Direnç-direnç durumu için sistem modeli

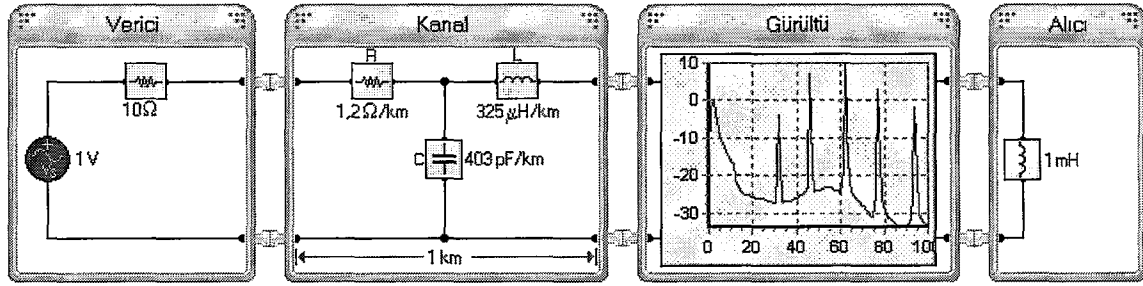


Şekil 50. Direnç-direnç durumu

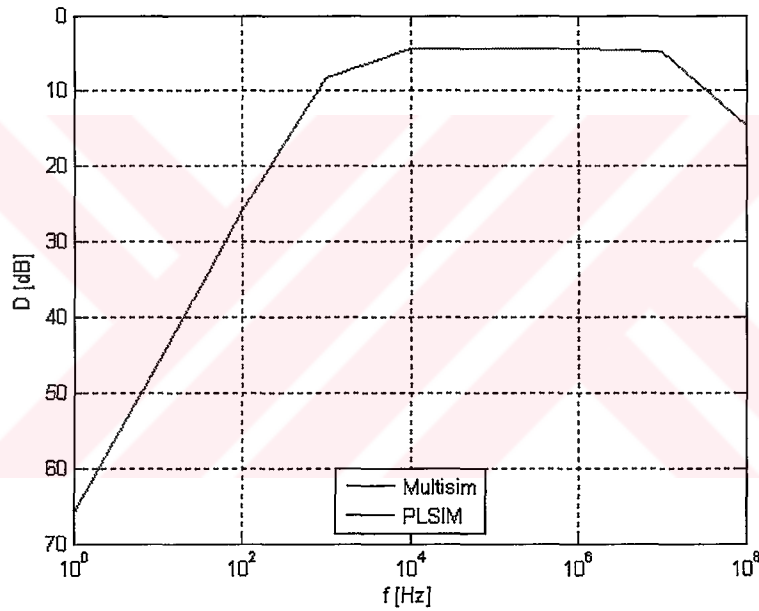
Tablo 1. Direnç-direnç durumu

Frekans [Hz]	Multisim $ D(f) $ [dB]	PLSIM $ D(f) $ [dB]
1	7,0050	7,0050
10	7,0050	7,0050
100	7,0064	7,0064
1 k	7,1470	7,1470
10 k	13,3634	13,3643
100 k	32,2341	32,2355
1 M	52,2254	52,2261
10 M	72,6259	72,6301
100 M	102,5795	102,5796

2. **Direnç-endüktans durumu** : Veri çıkış empedansının direnç, alıcı giriş empedansının endüktans olması durumudur.



Şekil 51. Direnç-endüktans durumu için sistem modeli

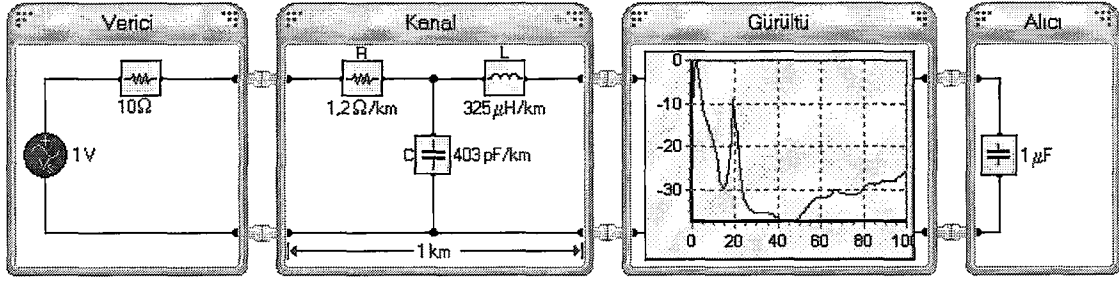


Şekil 52. Direnç-endüktans durumu

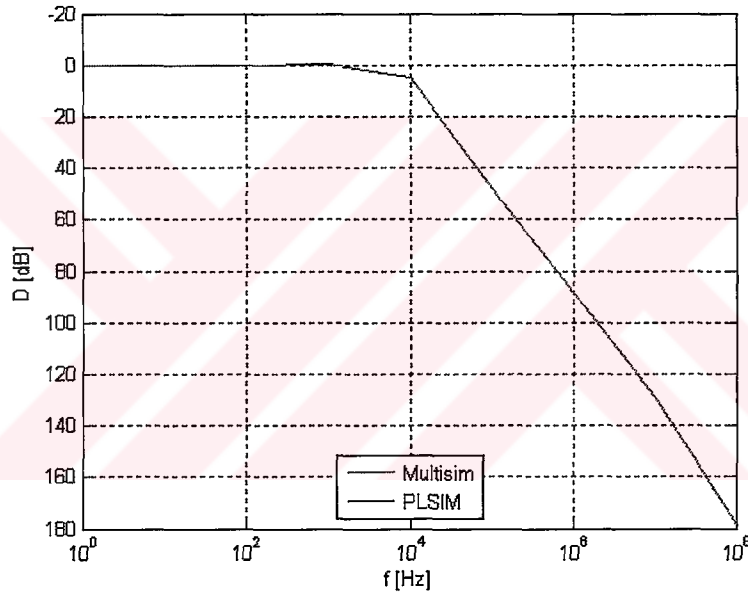
Tablo 2. Direnç-endüktans durumu

Frekans [Hz]	Multisim [D(f)] [dB]	PLSIM [D(f)] [dB]
1	65,9048	65,9048
10	45,9051	45,9051
100	25,9351	25,9351
1 k	8,2067	8,2067
10 k	4,4110	4,4110
100 k	4,3500	4,3500
1 M	4,3536	4,3536
10 M	4,7577	4,7577
100 M	14,7074	14,7074

3. **Direç-kapasite durumu** : Veri çıkış empedansının direnç, alıcı giriş empedansının kapasite olması durumudur.



Şekil 53. Direnç-kapasite durumu için sistem modeli

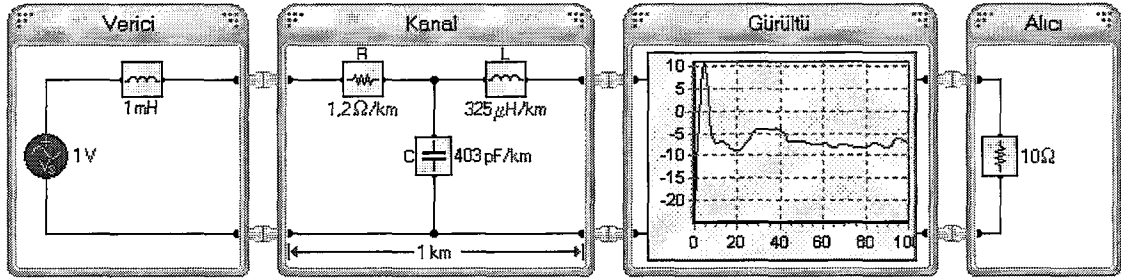


Şekil 54. Direnç-kapasite durumu

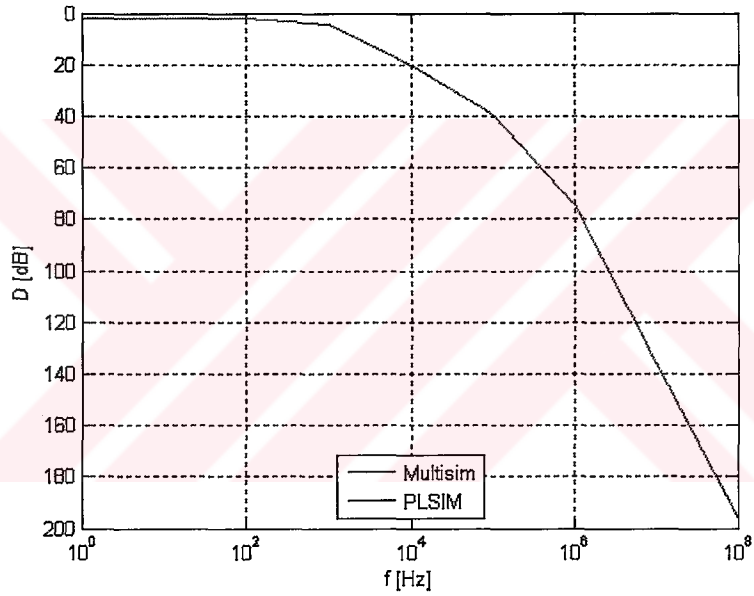
Tablo 3. Direnç-kapasite durumu

Frekans [Hz]	Multisim  D(f)  [dB]	PLSIM  D(f)  [dB]
1	0	0
10	0	0
100	-0,0020	-0,0020
1 k	-0,1981	-0,1981
10 k	4,8557	4,8557
100 k	48,1548	48,1548
1 M	88,1886	88,1886
10 M	128,5930	128,5930
100 M	178,5431	178,5431

4. **Endüktans-direnç durumu** : Veri çıkış empedansının endüktans, alıcı giriş empedansının direnç olması durumudur.



Şekil 55. Endüktans-direnç durumu için sistem modeli

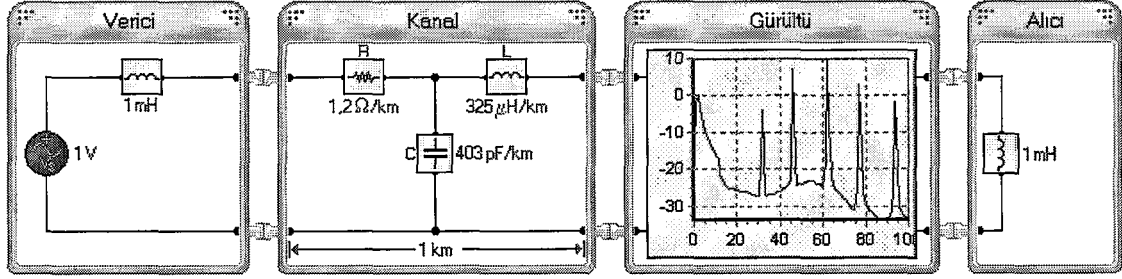


Şekil 56. Endüktans-direnç durumu

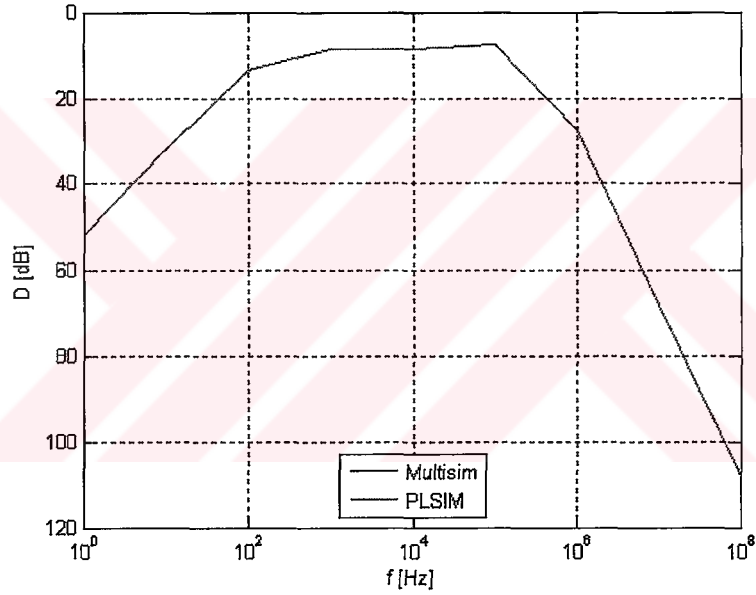
Tablo 4. Endüktans-direnç durumu

Frekans [Hz]	Multisim  D(f)  [dB]	PLSIM  D(f)  [dB]
1	1,8684	1,8684
10	1,8687	1,8687
100	1,8987	1,8987
1 k	4,1703	4,1704
10 k	20,3695	20,3696
100 k	39,7516	39,7518
1 M	74,7454	74,7454
10 M	136,2413	136,2413
100 M	196,2550	196,2550

5. **Endüktans-endüktans durumu** : Veri çıkış empedansının endüktans, alıcı giriş empedansının endüktans olması durumudur.



Şekil 57. Endüktans-endüktans durumu için sistem modeli

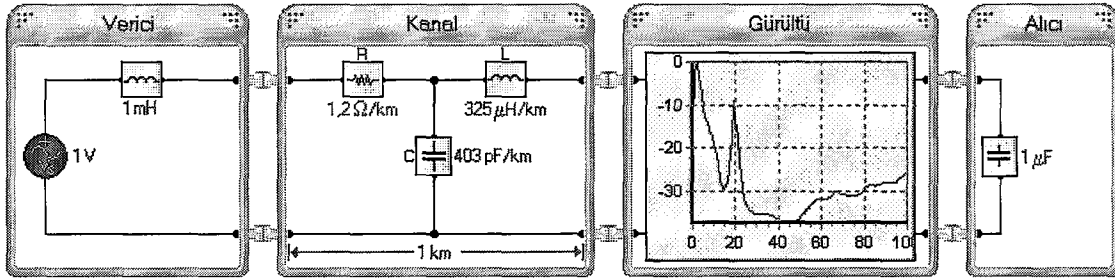


Şekil 58. Endüktans-endüktans durumu

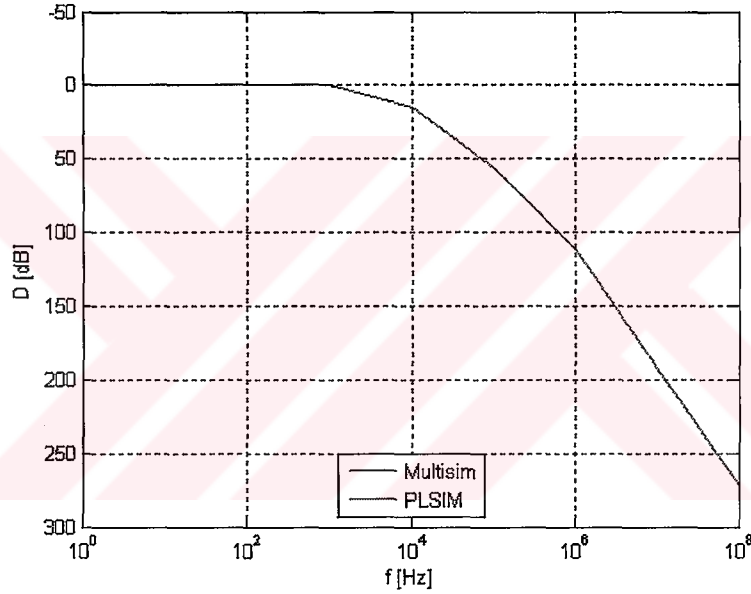
Tablo 5. Endüktans-endüktans durumu

Frekans [Hz]	Multisim  D(f)  [dB]	PLSIM  D(f)  [dB]
1	51,6408	51,6408
10	31,6615	31,6615
100	13,3471	13,3471
1 k	8,5541	8,5541
10 k	8,4572	8,4572
100 k	7,5588	7,5588
1 M	27,4587	27,4587
10 M	68,3742	68,3742
100 M	108,3829	108,3829

6. **Endüktans-kapasite durumu** : Veri çıkış empedansının endüktans, alıcı giriş empedansının kapasite olması durumudur.



Şekil 59. Endüktans-kapasite durumu için sistem modeli

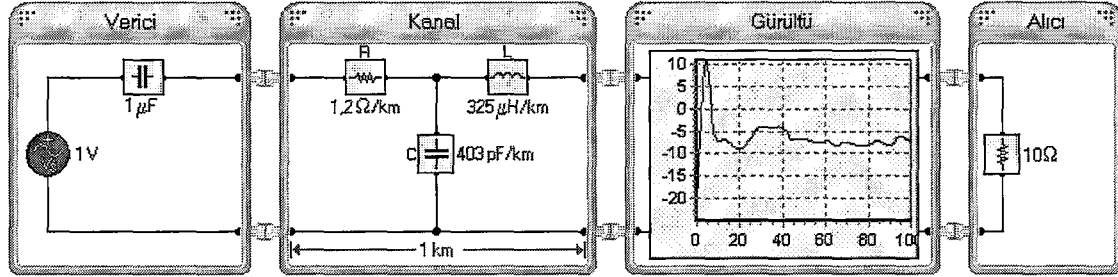


Şekil 60. Endüktans-kapasite durumu

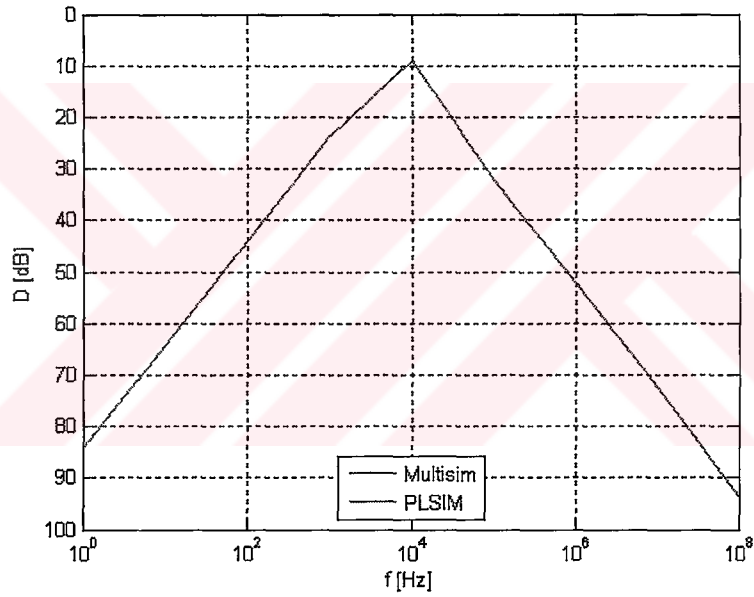
Tablo 6. Endüktans-kapasite durumu

Frekans [Hz]	Multisim [D(f)] [dB]	PLSIM [D(f)] [dB]
1	0	0
10	0	0
100	-0,0057	-0,0057
1 k	-0,5841	-0,5841
10 k	14,8586	14,8586
100 k	55,7027	55,7027
1 M	110,7086	110,7086
10 M	192,2049	192,2049
100 M	272,2186	272,2186

7. **Kapasite-direnç durumu** : Veri çıkış empedansının kapasite, alıcı giriş empedansının direnç olması durumudur.



Şekil 61. Kapasite-direnç durumu için sistem modeli



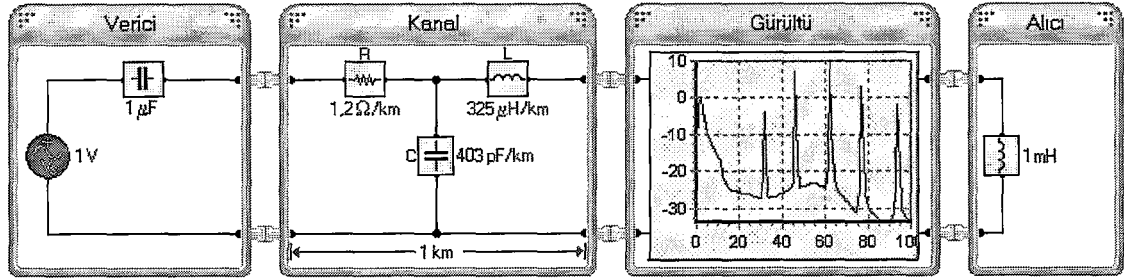
Şekil 62. Kapasite-direnç durumu

Tablo 7. Kapasite-direnç durumu

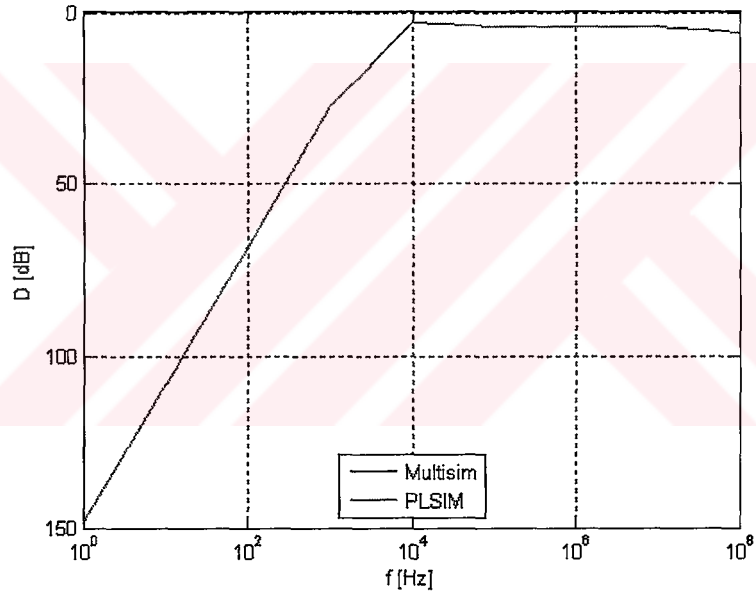
Frekans [Hz]	Multisim  D(f)  [dB]	PLSIM  D(f)  [dB]
1	84,0364	84,0364
10	64,0364	64,0364
100	44,0344	44,0344
1 k	23,8382	23,8382
10 k	8,8981	8,8996
100 k	32,1955	32,1963
1 M	52,2252	52,2253
10 M	72,2413	72,2415
100 M	93,5894	93,5895



8. **Kapasite-endüktans durumu** : Veri çıkış empedansının kapasite, alıcı giriş empedansının endüktans olması durumudur.



Şekil 63. Kapasite-endüktans durumu için sistem modeli

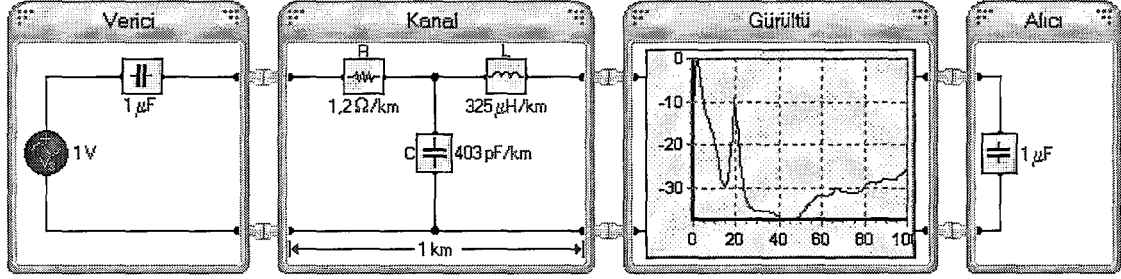


Şekil 64. Kapasite-endüktans durumu

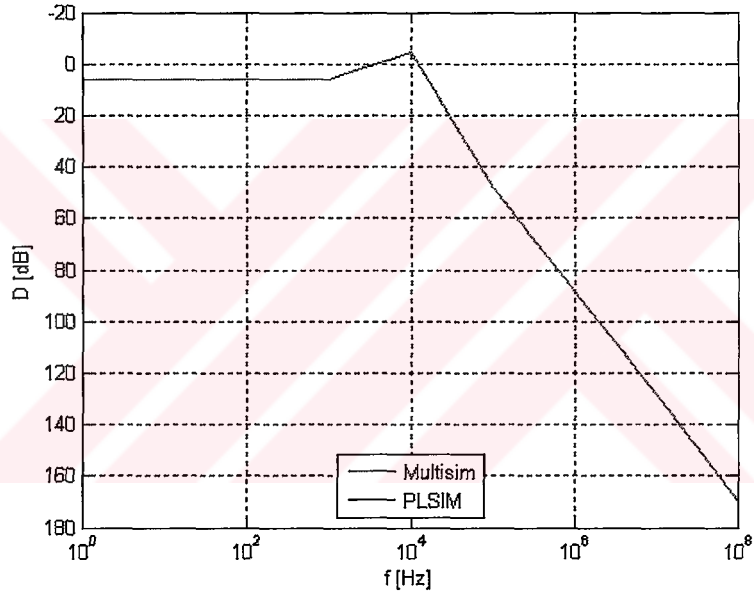
Tablo 8. Kapasite-endüktans durumu

Frekans [Hz]	Multisim  D(f)  [dB]	PLSIM  D(f)  [dB]
1	148,0728	148,0728
10	108,0727	108,0727
100	68,0672	68,0672
1 k	27,4886	27,4886
10 k	2,9094	2,9094
100 k	4,3399	4,3399
1 M	4,3532	4,3532
10 M	4,3692	4,3692
100 M	5,7172	5,7172

9. **Kapasite-kapasite durumu** : Veri çıkış empedansının kapasite, alıcı giriş empedansının kapasite olması durumudur.



Şekil 65. Kapasite-kapasite durumu için sistem modeli



Şekil 66. Kapasite-kapasite durumu

Tablo 9. Kapasite-kapasite durumu

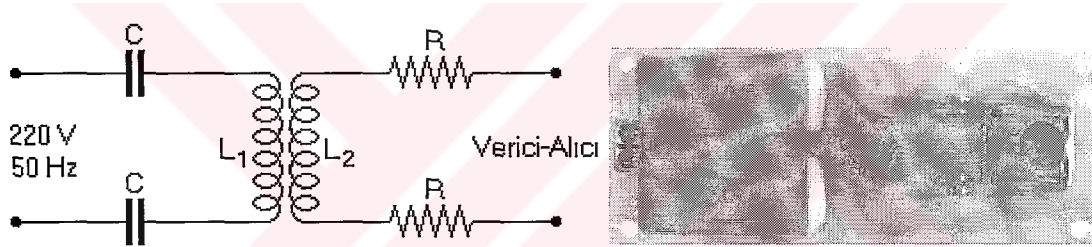
Frekans [Hz]	Multisim  D(f)  [dB]	PLSIM  D(f)  [dB]
1	6,0223	6,0223
10	6,0223	6,0223
100	6,0212	6,0212
1 k	5,9104	5,9104
10 k	-4,6358	-4,6358
100 k	48,1211	48,1211
1 M	88,1884	88,1884
10 M	128,2049	128,2049
100 M	169,5530	169,5530

## 2.4. Gürültü Ölçümleri

Güç hattı haberleşmesinde verinin hatta verilmesi ve verinin hattan alınması kuplaj devreleri ile gerçekleştirilir. Kuplaj işlemi *endüktif kuplaj* ve *kapasitif kuplaj* olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilir

- **Endüktif kuplaj** : Bu yönteminde kayıplar fazladır. Ancak verici-alıcı devreler doğrudan şebeke ile temas halinde olmadığı için güvenlidir. Bu yalıtım işlemi *kuplaj transformatörü* ile gerçekleştirilir.
- **Kapasitif kuplaj** : Daha verimli bir yöntemdir. Ancak verici-alıcı devreler doğrudan şebeke ile temas halinde olduğu için bu yöntem pek güvenli değildir.

Bu çalışmada yapılan ölçümlerde, güvenli olması nedeniyle endüktif kuplaj yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 67. Kuplaj devresinin şeması ve kuplaj devresi

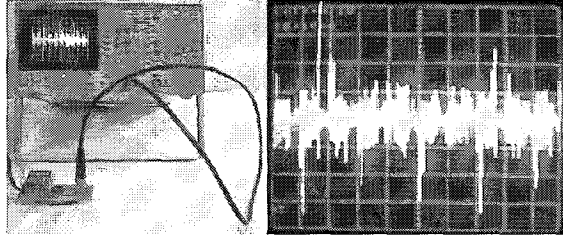
Kuplaj devresinde kullanılan eleman değerleri ve diğer parametre değerleri Tablo 10.'da verilmiştir.

Tablo 10. Kuplaj devresi parametre değerleri

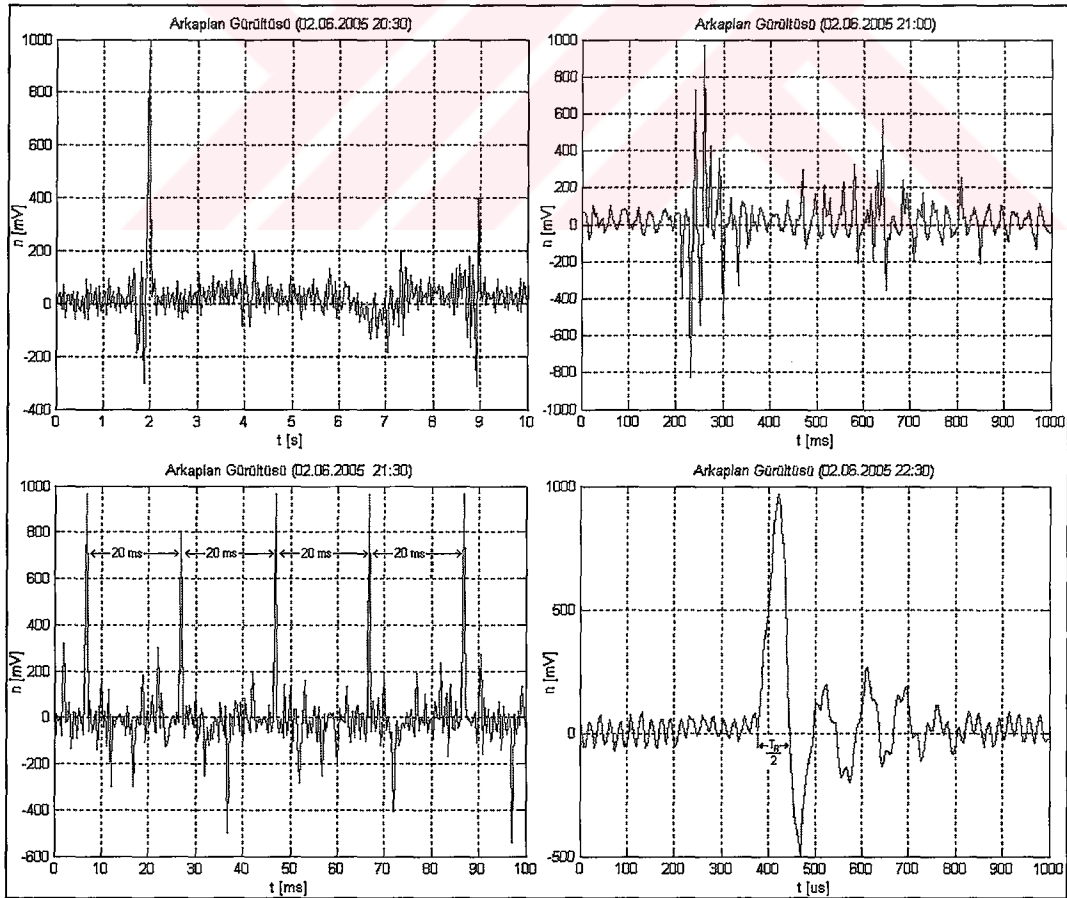
Simge	Açıklama	Değer	Birim
R	Direnç	25	$\Omega$
C	Kapasite	1	$\mu\text{F}$
$L_1$	Endüktans	735	$\mu\text{H}$
$L_2$	Endüktans	120	$\mu\text{H}$
$N_1$	Sarım sayısı	20	sarım
$N_2$	Sarım sayısı	10	sarım
n	Dönüştürme oranı	2	-
$Q_1$	Kalite faktörü	3,5	-
$Q_2$	Kalite faktörü	6	-

### 2.4.1. Zaman Ekseninde Gürültü Ölçümü

Zaman ekseninde yapılan gürültü ölçümlerinde tek renk dijital ekranlı, iki kanallı ve saniyede 100 milyon örnekleme kapasitesine sahip *GOULD DSO 400* markalı dijital osiloskop kullanılmıştır. 02.06.2005 tarihinde yapılan ölçümlerde ekran görüntülerinde 250 örnek alınmış ve bu örnekler düzenlenip, *MATLAB 7.0* programı kullanılarak yeniden çizdirilmiştir. Bu ölçümlerde gürültü seviyesinin rezonans frekansında en büyük değerine ulaştığı görülmüştür.



Şekil 68. Ölçüm cihazları



Şekil 69. Ölçülen gürültüler

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, güç hattı haberleşme sisteminin modellenmesi ve simülasyonu amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda

1. Haberleşme sistemi modellenmiştir.
2. Bu model kullanılarak haberleşme sisteminin simülasyonu yapılmıştır.
3. Haberleşme sisteminin simülasyonu için bir simülatör programı (*PLSIM, Güç Hattı Simülatör Programı*) geliştirilmiştir.
4. PLSIM programının Windows görselliğine sahip olabilmesi için program *Borland C++ Builder Enterprise Suite Version 6.0* yazılım editörü, program logosu ve ikonları *MS Paint* ve *Borland Image Editor Version 3.0* programları kullanılarak hazırlanmıştır.
5. PLSIM programı Multisim programı ile karşılaştırılmış ve iki programın da aynı değerleri hesapladıkları görülmüştür.
6. Bir endüktif kuplaj devresi yapılmış ve bu devre kullanılarak güç hattındaki arkaplan gürültüsü zaman bölgesinde incelenmiştir.

#### 4. ÖNERİLER

1. PLSIM programı tek fazlı alçak gerilim kablolarının simülasyonunu yapmaktadır. Program üzerinde yapılacak değişiklikler ile farklı tipteki kablolar için de simülasyon yapılabilir.
2. PLSIM programı Pirelli marka dört alçak gerilim kablosu ve kullanıcı tarafından parametreleri belirlenen, kullanıcıya özel bir kablo için simülasyon yapmaktadır. Kablo çeşitliliği artırılarak farklı markalara ait, farklı tipteki kablolar için de simülasyon yapılabilir.
3. PLSIM programında farklı hat yapıları kullanılabilir.
4. PLSIM programında farklı hat modelleri kullanılabilir.
5. Güç hattındaki gürültü modellenip, simülatör programına eklenebilir.
6. Gürültü ölçümlerinde endüktif ve kapasitif kuplaj yöntemleri kullanılıp, elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Jero, A., Applicability of Powerline Communications to Data Transfer of On-line Condition Monitoring of Electrical Drivers, Doktora Tezi, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2003.
2. Proakis, J. G., Digital Communication, 4. Baskı, McGraw-Hill, Singapur, 2001.
3. Carlson, A. B., Communication Systems, 2. Baskı, McGraw-Hill, New York, 1975.
4. Nyquist, H., Certain Factors Affecting Telegraph Speed, Bell Syst. Tech. J., 3 (1924) 324.
5. Shannon C. E., A Mathematical Theory of Communication, Bell Syst. Tech. J., 27 (1948) 623-656.
6. Hartley, R. V., Transmission of Information, Bell Syst. Tech. J., 7 (1928) 535.
7. Kolmogorov, A. N., Sur l'interpolation et extrapolation des suites stationnaires, Comptes Rendus de l'Académie des sciences, 208 (1939) 2043.
8. Wiener, N., The Exploration Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications, Wiley, New York, 1949.
9. Shannon C. E., A Mathematical Theory of Communication, Bell Syst. Tech. J., 27 (1948) 379-423.
10. Kotelkinow V. A., The Theory of Optimum Noise Immunity, Doktora Tezi, Molotov Energy Institute, Moskow, 1947.
11. Wozencraft, J. M. ve Jacobs, I. M., Principles of Communication Engineering, Wiley, New York, 1965.
12. Hamming, R. W., Error Detecting and Error Correcting Codes, Bell Syst. Tech. J., 29 (1950) 147-160.
13. Muller D. E., Application of Boolean Algebra to Switching Circuit Design and to Error Detection, IRE Trans. Comput., EC-3 (1954) 6-12.
14. Reed, I. S., A Class of Multiple-Error Correcting Codes and the Decoding Scheme, IRE Trans. Inform., IT-14 (1954) 38-49.
15. Reed, I. S. ve Solomon G., Polynomial Codes Over Certain Finite Fields, SIAM J., 8 (1960) 300-304.



16. Bose, R. C. ve Ray-Chaudhuri, D. K., On a Class of Error Correcting Binary Group Codes, Inform. Control., 3 (1960) 68-79.
17. Bose, R. C. ve Ray-Chaudhuri, D. K., Further Results in Error Correction Binary Group Codes, Inform. Control., 3 (1960) 279-290.
18. Goppa, V. D., New Class of Linear Correcting Codes, Probl. Peredach. Inform., 6 (1970) 24-30.
19. Goppa, V. D., Rational Presentation of Codes and (L. g)-codes, Probl. Peredach. Inform., 7 (1971) 41-49.
20. Forney, G. D., Concatenated Codes, MIT Press, Cambridge, 1966.
21. Chien, R. T., Cyclic Decoding Procedures for BHC codes, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-10 (1964) 357-363.
22. Berlekamp. E. R., Algebraic Coding Theory, McGraw-Hill, New York, 1968.
23. Wozencraft, J. M. ve Reiffen, B., Sequential Decoding, MIT Press, Cabridhe, 1961.
24. Fano, R. M., A Heuristic Discussion of Probabilistic Decoding, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-9 (1963) 64-74.
25. Zigangirov, K. S., Some Sequential Decoding Provedures, Probl. Peredach. Inform., 2 (1966) 13-25.
26. Jelinek, F., Fast Sequential Decoding Algorithm Using a Stack, IBM J. Res. Dev., 13 (1969) 675-685.
27. Forney, G. D., Convolutional Codes I: Algebraic Structure, IEE Trans. Inform. Theory, IT-16 (1970) 720-738.
28. Forney, G. D., Maximum-Likelihood Sequence Estimation of Digital Sequences in the Presence of Intresymbol Interference, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-18 (1972) 363-378.
29. Forney, G. D., Convolutional Codes III: Sequential Decoding, Inform. Control, 25 (1974) 267-297.
30. Viterbi, A. J., Error Bounds for Convolutional Codes and a Asymptotically Optimum Decoding Algorithm, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-13 (1967) 260-269.
31. Viterbi, A. J., Convolutional codes and Their Performance in Communication Systems, IEEE Trans. Commun. Tech., COM-19 (1971) 751-772.
32. Ungerboeck, G., Adaptive Maximum-Likelihood Receiver for Carrier-Modulated Data-Transmission Systems, IEEE Trans. Commun., COM-22 (1974) 624-636.

33. Forney, G. D., Gallager, R. G., Lang, G. R., Longstaff, F. M. ve Qureshi, S. U., Efficient Modulation for Band-Limited Channels, IEEE j. Selected Areas Commun., SAC-2 (1984) 632-647.
34. Wei, L. F., Trellis-Coded Modulation with Multi-Dimensional Constellations, IEEE Trans Inform Theory, IT-33 (1987) 483-501.
35. Ziv, J. ve Lempel, A., A Universal Algorithm for Sequential Data Compression, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-23 (1977) 337-343.
36. Ziv, J. ve Lempel, A., Compression of Individual Sequences via Variable-Rate Coding, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-24 (1978) 530-536.
37. Linde, Y., Buzo, A. ve Gray, R. M., An Algorithm for Vector Quantizer Design, IEEE Trans. Commun., COM-28 (1980) 84-95.
38. Berroru, C. ve Glavieux, A., Near Shannon Limit Error Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes, Proc. IEEE Int. Conf. Commun., May 1993, Geneva Switzerland, 1064-1070.
39. McMahon, M. A., The Making of a Profession-A Century of Electrical Engineering in America, IEEE Press, New York, 1984.
40. Millman, S., A History of Engineering and Science in the Bell System-Communication Sciences (1925-1980), AT&T Bell Laboratories, 1984.
41. Ryder, J. D. ve Fink, D. G., Engineers and Electronics. IEEE Press, New York, 1984.
42. Sloane N. J. A. ve Wyner A. D., The Collected Papers of Shannon, IEEE Press, New York, 1993.
43. Dobrushin R. L. ve Lupanova, O. B., Paper in Information Theory and Cybernetics (in Russia), Edited by Dobrushin and Lupanova, Izd. Inorstr. Lit., Moskow, 1963.
44. Berlekamp, E. R., Key Papers in the Development of Coding Theory, IEEE Press, New York, 1974.
45. Slepian, D., Key Papers in thr Development of Information Theory, IEEE Press, New York, 1947.
46. Üstünel, M., Altın, M. ve Kızılgedik, M., Endüstriyel Elektrik, 1. Baskı, M.E.B., Ankara, 2001.
47. Üstünel, M., Altın, M. ve Kızılgedik, M., Elektrifikasyon, 1. Baskı, M.E.B., Ankara, 2001.
48. Dostert, K., Powerline Communications, Prentice-Hall, USA, 2001.

49. Hrasnica, H., Haidine, A. ve Lehnert, R., *Broadband Powerline Communications : Network Design*, John Wiley & Sons, 2004.
50. <http://www.amazon.com>, Amazon, 21 Temmuz 2005.
51. Brown, P. A., *Power Line Communications – Past Present and Future*, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Lancaster, 1999, UK, 30.5-1.4.199, 1-7.
52. Fahie, J. J., Edward Davy, *The Electrician*, (1883) 181-227.
53. Routin, J. ve Brown, C. E. L., *Power Line Signalling Electricity Meters*, UK Patent Office, British Patent No. 24833, 1897.
54. Thoradson, C., *Meters*, US Patent Office, US Patent Nos. 784712 and 784713, USA, 1905.
55. Pitkänen, I., *Keskijänniteverkko MELKO – Järjestelmän Tiedonsiirtotienä*, Yüksek Lisans Tezi, Finland, 1991.
56. Kingery, P., *Digital X-10*, <http://gardentoy.com/htinews/feb99/articles/kingery/kingery13.htm>, 17 Aralık 2002.
57. O'Neal, J.B., *The Residential Power Circuit as a Communication Medium*, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, CE-36 (1986) 567-577.
58. Vines, R. M., Tryssel, J. ve Gale, L. J., *Noise on Residential Power Distribution Circuits*, *IEEE Transactionson ElectromagneticCompatibility*, EMC-26 (1984) 161-168.
59. Jung, S., *A Channel Model for Power Line Communication in Home Network*, Proceedings on the 15th CISL Winter Workshop, Japan, 2002.
60. Hooijen, O., *Aspects of Residential Power Line Communications*, Doktora Tezi, Shaker Verlag GmbH, 1998.
61. Vines R. M. ve diğerleri, *Noise on the Residential Power Distribution Circuits*, *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 26 (1984) 161-168.
62. Zuberi, K. H., *Powerline Carrier Communication Systems*, Yüksek Lisans Tezi, KTH, Stockholm Sweden, 2003.
63. Ross, F., *Powerline Communication in Train Control Systems*, Yüksek Lisans Tezi, KTH, Stockholm Sweden, 2000.
64. Malack ve Engstrom, *Aggregate European Power Line Impedance*, IBM Electromagnetic Compatibility Laboratuary.

65. Nicholson J. R. ve diğerleri, RF Impedance of Power Lines and Line Stabilization Networks in Conducted Interference Measurements, IEEE Transaction on electromagnetic Compatibility, 15 (1973) 84-86.
66. Malack J. A. ve diğerleri, RF Impedance of United States and European Power Lines, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 18 (1976) 36-38.
67. Vines, R. M., Impedance of the Residential Power-Distribution Circuit, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 27 (1985) 6-12.
68. Tanaka M., High Frequency Noise Power Spectrum Impedance and Transmission Loss of Power Line in Japan on Intra-building Power Line Communications, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 34 (1988) 321-326.
69. Salender, L., Power-Line Communications – Channel Properties and Communication Strategies, Doktora Tezi, Lund University, 1999.
70. Liu, W. ve diğerleri, Nature of Power Line Medium and Design Aspect for Broadband PLC System, IEEE, 2000.
71. Raphaeli, D. ve Bassin E., A Comparison Between OFDM Single Carrier and Spread Spectrum for High Data Rate PLC, [http://itrancomm.com/White\\_OFDM\\_4\\_99.html](http://itrancomm.com/White_OFDM_4_99.html), Nisan 1999.
72. <http://www.echelon.com>, Echelon Corporation, Haziran 2003.
73. Echelon Corporation, LonWorks Technology Overview.
74. House, P., CEBus for the Masses, Technical Article #0593, Intellon Corporation.
75. Evans, G., The CEBus Communication Standart, Part 1 & 2, Intellon Corporation.
76. Dhir, A. ve diğerleri, Home Networking Using No Wires Phoneline and Powerline Interconnection Technologies, White Paper, WP133 v1.0, Xilinx Inc., Mart 2001.
77. <http://www.cebus.org>, Framest for CEBus Users Group, Haziran 2003.
78. Tyson, J., How Power-line Networking Works, <http://howstuffworks.com>, Haziran 2003.
79. Riezenman, M. J., Networks for Homes, IEEE Spectrum, 36 (1999).
80. Rye, D., The X-10 POWERHOUSE Power Line Interface Model # PL513 and Two-Way Power Line Interface Model # TW523, Technical Note, Revision 2.4, X-10 USA Inc.
81. Arora, A., Jagannathan, R. ve Wang, Y., Model-based Fault Detection in Powerline Networking, Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2002.

82. <http://www.intellon.com/support/powerpackfaqs.html>, Intellon: PowerPacket FAQs, Haziran 2003.
83. <http://www.intellon.com>, PowerPacket™ Primer, Mart 1999.
84. <http://www.cogency.com>, Cogency Semiconductor Inc., Temmuz 2003.
85. Cogency Semiconductor Inc., Data Communications over Power Lines.
86. Selander, L., Powerline Communication, Doktora Tezi, Department of Information Technology at Lund University, Lund, 1999.
87. Proakis, J.G., Digital Communications, McGraw-Hill, 1995.
88. Proakis, J.G. ve Manolakis, D.G., Digital Signal Processing Principles Algorithms and Applications, Macmillan Publishing Company, 1992.
89. Arzberger, M., Dostert, K., Waldeck, T. ve Zimmermann, M., Fundamental Properties of the Low Voltage Power Distribution Grid, Proc. 1997 International Symposium on Power-line Communications and its Applications", 1997, Germany Essen.
90. Barnes, J.S., A Physical Multi-path Model for Power Distribution Network Propagation, Proc. 1998 International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1998, Japan Tokyo.
91. Burr, A.G., Reed, D.M.W. ve Brown, P.A., HF Broadcast Interference on LV Mains Distribution Networks, Proc. 1998 International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1998, Japan Tokyo.
92. Dalby, A.B., Signal Transmission on Power Lines; (Analysis of power line circuits), Proc. 1997 International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1997, Germany Essen.
93. Dickinson, J. ve Nicholson, P., Calculating the High Frequency Transmission Line Parameters of Power Cables, Proc. 1997 International Symposium on Powerline Communications and its Applications, 1997, Germany Essen.
94. Dostert, K., RF-Models of the Electrical Power Distribution Grid, Proc. 1998 International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1998, Japan Tokyo.
95. Duval, G., Low Voltage Network Models to the Analysis of Unexpected Phenomena in PLC Communications, Proc. 1998 International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1998, Japan Tokyo.
96. Fröroth, I., More than Power Down the Line, Licentiate of Technology Thesis, Department of Teleinformatics, Royal Institute of Technology, Sweden Stockholm, 1999.

97. Hooijen, O., A Channel Model for the Low-Voltage Power-Line Channel, Proc. 1997 International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1997, Essen Germany.
98. Malack, J. A. ve Engström, J. R., RF Impedance of United States and European Power Lines, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1976.
99. Marubayashi, G., Noise Measurements of the Residential Powerline, Proc. 1997 International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1997, Essen Germany.
100. Nicholson, J. R. ve Malack, J. A., RF Impedance of Power Lines and Line Impedance Stabilization Networks in Conducted Interference Measurements, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1973.
101. Philipps, H., Modelling of Powerline Communication Channels, Proc. 3rd International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1999, Lancaster UK.
102. Zimmermann, M. ve Dostert, K., A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range, Proc. 3rd International Symposium on Power-line Communications and its Applications, 1999, Lancaster UK.
103. Liu, E., Gao, Y., Bilal, O. ve Korhonen, T., Broadband Characterization of Indoor Powerline Channel, Communication Laboratory, Helsinki University of Technology Oteekari 5, Espoo, Finland.
104. Vines, R. M., Trussell, H. J., Gale, L. J. ve O'Neal, J. B., Noise on Residential Power Distribution Circuits, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, EMC-26, 4 (1984) 161-168.
105. Dostert, K., EMC Problems in Data Transmission Over Indoor Power Lines Using Spread Spectrum Techniques, Proc. of the 6th EMC-Symposium, 1985, Zurich, 453-456.
106. Prasad, T. V., Srikanth, S., Krishnan, C. N. ve Ramakrishna P. V., Wideband Characterization Channels in India, India.
107. The MathWorks Inc., MATLAB Help, 2004.
108. Doğan, İ., A'dan Z'ye Matlab ile Çalışmak, 1. Baskı, Bileşim Matbaacılık A.Ş., İstanbul, 2004.
109. Güneş, A. ve Yıldız, K., Matlab For Windows, 1. Baskı, Türkmen Kitabevi, İstanbul, 1997.
110. Borland Software Corporation, Turbo C User's Manual, 1988.

111. Erdun, H. ve Demiralp, F., Turbo C Programlama Dili, 3. Baskı, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 1997.
112. Erdun, H., Turbo ve Borland C & Pascal ile Grafik, 2. Baskı, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 1999.
113. Erdun, H., Uzman C/C++ Programlama, 1. Baskı, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 1999.
114. Karagülle, İ. ve Pala, Z., Borland C++ Builder 6.0, 1. Baskı, Türkmen Kitabevi, İstanbul, 2004.
115. Borland Software Corporation, Borland C++ Builder Help, 2002.
116. Interactive Image Technologies Ltd., Electronics Workbench Help, 1996.
117. Interactive Image Technologies Ltd., Multisim 7 Help, 2003.
118. <http://www.electronicworkbench.com>, Interactive Image Technologies Ltd., 01.Şubat 2005.
119. Pirelli Cables Australlia Limited, Pirelli – Technical Manuals, Australlia, 2000.



## ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan ÇAKIR 1980'de Trabzon'da doğdu. İlk öğrenimini Trabzon Fatih İlkokulu'nda, orta öğrenimini Trabzon Cumhuriyet Ortaokulu'nda ve lise öğrenimini Trabzon Lisesi'nde yaptı. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Lisans Programı'na başladı ve 2002 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Programı'na başladı. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

