



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GÜÇ HATLARI ÜZERİNDEN ALÇAK GERİLİM ELEKTRİK
DAĞITIM ŞEBEKESİNDE AKILLI SAYAÇ OKUMA
UYGULAMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Murat ŞEN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN

SAMSUN
2021

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**GÜÇ HATLARI ÜZERİNDEN ALÇAK GERİLİM ELEKTRİK
DAĞITIM ŞEBEKESİNDE AKILLI SAYAÇ OKUMA
UYGULAMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Murat ŞEN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Murat ŞEN tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN danışmanlığında hazırlanan “Güç Hatları Üzerinden Alçak Gerilim Elektrik Dağıtım Şebekesinde Akıllı Sayaç Okuma Uygulaması” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 20.05.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye (Danışman)	Dr. Öğr. Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Prof. Dr. Ümit Kemalettin TERZİ		<input checked="" type="checkbox"/>
	Marmara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım yüksek lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

20 /05/2021
Murat ŞEN

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Güç Hatları Üzerinden Alçak Gerilim Elektrik Dağıtım Şebekesinde Akıllı Sayaç Okuma Uygulaması

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 21.04.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 4

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

20/05/2021
Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN

ÖZET

GÜÇ HATLARI ÜZERİNDEN ALÇAK GERİLİM ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİNDE AKILLI SAYAÇ OKUMA UYGULAMASI

Murat ŞEN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Mayıs/2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN

Akıllı şebeke kavramı elektriğin üç temel bölümü olan üretim, iletim ve dağıtım işlemlerinde, haberleşme yöntemlerinin kullanılarak süreçlerin uzaktan, hızlı, güvenilir, sürdürülebilir ve belirli bir denetim çerçevesinde yürütülmesi temeline dayanmaktadır. Ölçmeden yönetmenin mümkün olmadığı ilkesi dikkate alındığında akıllı şebeke uygulamaları arasında özellikle dağıtım şebekesi seviyesinde akıllı sayaç uygulamaları büyük önem taşımaktadır. Bu sebepten farklı haberleşme yöntemleri ile uzaktan sayaç verisinin elde edilmesi katma değer sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, alçak gerilim elektrik dağıtım şebekesinin mevcut güç hatları kullanılarak güç hattı haberleşmesi ile akıllı sayaç okuma uygulaması iki yöntemle ele alınmıştır. Bu yöntemlerden birinde laboratuvar ortamında Texas Instruments TMDSPCKITV4 değerlendirme kartları, dar bant G3-PLC standardı şartlarında verici ve alıcı şeklinde çalıştırılarak, aralarındaki mesafe ve bağlı oldukları şebeke yük değerleri göz önüne alınarak, veri iletişimi esnasında sinyal gürültü oranı, bit hata oranı, paket hata oranı, alınan sinyal gücü göstergesi, veri iletim hızı, değerleri farklı modülasyon türleri için ayrı ayrı elde edilmiş ve uygunlukları ortaya çıkartılmıştır. Diğer yöntemde ise mesken tüketici grubu ağırlıklı sahada, 250 kVA dağıtım trafosu alçak gerilim çıkışlarından biri kullanılarak dar bant G3-PLC özellikli modemler yardımı ile elektrik sayaçlarından sayaç okuma sonuçları otomatik sayaç okuma yazılımı ile uzaktan elde edilmiş ve elde edilen değerler sayaç bazlı değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra güç hattı haberleşmesi ile akıllı sayaç okuma uygulaması için fiziki saha modeli ve elektriksel bağlantılar ortaya konmuştur. Her iki yöntemde de güç hattı haberleşmesi ile veri iletişiminin mümkün olduğu görülmüştür. Laboratuvar ortamında mesafe, şebeke yük durumu ve modülasyon türü farklılaştığında, sinyal gürültü oranı, bit hata oranı, paket hata oranı, alınan sinyal gücü göstergesi değerlerinin farklılaştığı fakat çoğu durumda veri iletişiminin sağlandığı görülmüştür. Saha ortamında ise sayaç okuma sonuçlarının yüksek oranda elde edildiği fakat şebekenin değişken yük durumu dolayısıyla sayaç bazında alınan okuma adetlerinin farklılaştığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: akıllı şebeke, akıllı sayaç, güç hattı haberleşmesi, modülasyon, TMDSPCKITV4, G3-PLC standardı

ABSTRACT

SMART METERING IMPLEMENTATION IN LOW VOLTAGE DISTRIBUTION GRID WITH POWER LINE COMMUNICATION

Murat ŞEN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical Electronics Engineering

Master, May/2021

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Seda ÜSTÜN ERCAN

Smart grid is based on the principle of using communication methods in generation, transmission, distribution processes in a remote, fast, reliable and sustainable way. Smart metering implementations are of great importance among smart grid applications, especially at the distribution grid thus, obtaining meter data remotely with alternative communication methods will provide added value.

In this thesis, smart meter reading application with power line communication by using the existing power lines of low voltage electricity distribution grid has been handled with two methods. In one of these methods, Texas Instruments TMDSPLCKITV4 evaluation cards are operated as a transmitter and receiver under narrow band G3-PLC standard conditions, and by considering the distance between them and the grid load values they are connected to signal noise ratio, bit error rate, packet error rate, received signal strength indicator, data transmission rate were obtained separately for different modulation types and their suitability was revealed. In the other method, the meter reading results from the electricity meters were obtained remotely through the automatic meter reading software with the help of narrow band G3-PLC featured modems using one of the 250 kVA distribution transformer low voltage feeder in the residential consumers. The values obtained were evaluated on meter basis. In addition, electrical connections have been introduced for power line communication and smart meter reading implementation. It has been observed that data communication with power line communication is possible in both methods. It has been observed that when the distance, grid load and modulation type differ in the laboratory, measured values differ, but data communication is provided in most cases. In the field, it was determined that the meter reading results were obtained, but the number of readings taken on the basis of the meter differed due to the variable behaviour of the grid.

Keywords: smart grid, smart metering, power line communication, modulation, TMDSPLCKITV4, G3-PLC standard

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresi boyunca her detayla özveriyle ilgilenen, yol gösteren, desteğini, zamanını ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN'a teşekkür ediyorum.

Ayrıca hayatta bugünlere gelmemi sağlayan ilk öğretmenim babam Erol ŞEN'e ve annem Fatma ŞEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak tezimi bitirmem konusunda beni teşvik eden, sabırla bana destek olan, hayat arkadaşım biricik eşime sonsuz teşekkürlerini sunuyorum.

Murat ŞEN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1. Güç Hatları Üzerinden Haberleşme	19
3.2. Güç Hattı Haberleşmesinin Temel Parametreleri	21
3.2.1. Empedans Değerleri.....	21
3.2.2. Gürültü	22
3.2.3. Sinyal Zayıflaması	24
3.3. Güç Hatları Üzerinden Haberleşme Çeşitleri ve Standartları	24
3.4. Akıllı Şebekelerde Güç Hattı Haberleşmesi	27
3.5. Güç Hattı Haberleşmesinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri	29
3.5.1. OFDM.....	30
3.5.2. BPSK	33
3.5.3. QPSK	34
3.5.4. 8PSK	34
3.6. G3-PLC Standardı ve Özellikleri.....	35
3.7. TMDSPCKITV4 Değerlendirme Bordu.....	41
3.7.1. Donanımsal Özellikler	41
3.7.2. Yazılımsal Özellikler	45
3.8. Akıllı Sayaç Okuma Sistem Yapısı.....	51
3.8.1. Güç Hattı Haberleşmesinde Sayaç Okuma Modeli.....	54
3.8.2. Ülkemizde Akıllı Sayaç Okuma Durumu ve OSOS	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	58
4.1. Omik Karakteristikli Laboratuvar DeneYleri	58
4.2. Endüktif Karakteristikli Laboratuvar DeneYleri	68
4.3. Sahada Uzaktan Sayaç Okuma Uygulaması	76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	84
ÖZ GEÇMİŞ	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

Tx	Verici
Rx	Alıcı
W	Etkin Güç
s	Saniye
µs	Mikro Saniye
V	Volt
A	Amper

KISALTMALAR

AG	Alçak Gerilim
DA	Doğru Akım
NB	Dar Bant
PLC	Güç Hattı Haberleşmesi
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
BER	Bit hata Oranı
PER	Paket Hata Oranı
RSSI	Alınan Sinyal Gücü Göstergesi
AMR	Otomatik Sayaç Okuma
TI	Texas Instruments
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
OSOS	Otomatik Sayaç Okuma Sistemi
AMI	Gelişmiş Sayaç Altyapısı
OFDM	Dikgen Frekans Bölmeli Çoklama
OG	Orta Gerilim
CENELEC	Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi
Hz	Hertz
bps	Saniye Başına Bit
BB	Geniş Bant
HPGP	Homeplug Green Physical Layer
TWh	Terawatsaat
GSM	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
GPRS	Genel Paket Radyo Servis

BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
PRIME	Güç Hattı İlişkili Akıllı Ölçüm Evrimi
ROBO	Sağlamlık Modu
QPSK	Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama
8PSK	Sekizli Faz Kaydırmalı Anahtarlama
UNB	Ultra Dar Bant
FCC	Federal İletişim Kurulu
PV	Fotovoltaik
DC	Veri Toplayıcı
kVA	Kilovoltamper
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
ETSI	Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi
dB	Desibel
ARIB	Radyo Endüstrisi ve İşletmeleri Birliği
QB	Yarı (Quasi) Bant
TDM	Zaman Bölmeli Çoklama
CDM	Kod Bölmeli Çoklama
FDM	Frekans Bölmeli Çoklama
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
IFFT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
ERDF	Fransa Elektrik Dağıtım Şebekesi Yönetimi
FEC	İleri Hata Düzeltme
PHY	Fiziksel Katman
MAC	Medya Erişim Kontrolü
FCH	Çerçeve Kontrol Başlığı
PN	Sözde Gürültü
GF	Galois Alanı
PPDU	PHY Protokolü Veri Birimi
ZCG	Zero Configuration Gui
IM	Intermediate Mode
C2	CodeSkin
CCS	Code Composer Studio

UART	Evrensel Asenkron Alıcı Verici
RF	Radyo Frekansı
DDY	Darbeli Değişken Yük
Var	Volt-Amper-Reaktif
YG	Yüksek Gerilim



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Akıllı Şebeke Bileşenleri	3
Şekil 3.1. Elektrik Şebekesi Katmanlarında PLC kullanımı	20
Şekil 3.2. Maximum Güç Aktarım Kuramı.....	22
Şekil 3.3. NB-PLC Gürültü Sınıfları.....	23
Şekil 3.4. PLC Haberleşme Çeşitleri ve Standartları	25
Şekil 3.5. Elektrik Şebekesinde CENELEC Alt Bantları Kullanımı	26
Şekil 3.6. NB-PLC ile Akıllı Şebeke Uygulamaları	29
Şekil 3.7. PLC Modülasyon Yapıları	30
Şekil 3.8. OFDM ve FDM Frekans Aralığı Kullanım Şekli	31
Şekil 3.9. OFDM Blok Şeması.....	32
Şekil 3.10. BPSK Modülasyon Diyagramı	33
Şekil 3.11. QPSK Modülasyon Diyagramı	34
Şekil 3.12. 8PSK Modülasyon Diyagramı	34
Şekil 3.13. G3-PLC Standardı Katmanları.....	35
Şekil 3.14. G3-PLC Standardı Verici-Alıcı Blok Diyagramı	37
Şekil 3.15. Veri Karıştırıcı	38
Şekil 3.16. Evrişimli Kodlayıcı.....	39
Şekil 3.17. Serpiştirici	39
Şekil 3.18. TMDSPCKITV4 Genel Görünüş	41
Şekil 3.19. PLC Modül Yapısı	42
Şekil 3.20. Ana Yerleştirme İstasyonu.....	43
Şekil 3.21. Faz-Nötr Klemens Bağlantıları	43
Şekil 3.22. Anahtar Konumları	44
Şekil 3.23. USB Seri Portlar	44
Şekil 3.24. TMDSPCKITV4 Donanım Kurulumu	45
Şekil 3.25. ZCG Ana Ekran	46
Şekil 3.26. ZCG PHY Parametreleri	47
Şekil 3.27. ZCG İstatistik Paneli.....	48
Şekil 3.28. IM Kullanıcı Ara Yüzü Ana Ekranı.....	49
Şekil 3.29. IM Ara Yüzü PHY Parametreleri	50
Şekil 3.30. C2 Ara Programı	51
Şekil 3.31. Elektrik Sayaçları Genel Dağılım	53
Şekil 3.32. PLC ile Sayaç Okuma Modeli	55
Şekil 4.1. Omik Deney Düzeneği Genel Görünüm.....	59
Şekil 4.2. Omik Deney Tx ve Rx	59
Şekil 4.3. ZCG ile Veri Dosyası İletimi.....	60
Şekil 4.4. Yüksüz, BPSK, 5m	61
Şekil 4.5. Yüksüz, BPSK, 25m	62
Şekil 4.6. 3300W Sabit Yük, ROBO, 25m	63
Şekil 4.7. 3300W Sabit Yük, BPSK, 25m	63
Şekil 4.8. 3300W Sabit Yük, QPSK, 25m	64
Şekil 4.9. 3300W Sabit Yük, 8PSK, 25m	64
Şekil 4.10. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, ROBO, 5m	65
Şekil 4.11. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, BPSK, 5m.....	66
Şekil 4.12. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, QPSK, 5m	66
Şekil 4.13. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, 8PSK, 5m	67
Şekil 4.14. Endüktif Deney Düzeneği Genel Görünüş	68
Şekil 4.15. 1000W Sabit Yük, ROBO, 55m	70

Şekil 4.16. 1000W Sabit Yük, BPSK, 55m	70
Şekil 4.17. 1000W Sabit Yük, QPSK, 55m	71
Şekil 4.18. 1000W Sabit Yük, 8PSK, 55m	71
Şekil 4.19. Yüksüz, ROBO, 5m	73
Şekil 4.20. Yüksüz, BPSK, 5m	73
Şekil 4.21. Yüksüz, QPSK, 5m	74
Şekil 4.22. Yüksüz, 8PSK, 5m	74
Şekil 4.23. Uzaktan Sayaç Okuma Uygulama Sahası Genel Görünüm	76
Şekil 4.24. AG Dağıtım Şebekesinde Akıllı Sayaçların Konumu	77
Şekil 4.25. PLC Modem ve Sayaç Bağlantısı	77
Şekil 4.26. DC Yapısı ve Bağlantısı	78
Şekil 4.27. AMR Sonuçları Görüntüsü	79
Şekil 4.28. PLC Akıllı Sayaç Okuma Sonuçları Toplam Sayısı	80



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Akıllı Şebeke ve Geleneksel Şebeke Kıyas	2
Tablo 3.1. NB-PLC Frekans Aralıkları	26
Tablo 3.2. Reed Solomon Blok Yapısı	38
Tablo 3.3. G3-PLC Modülasyon Türleri Veri Hızları.....	40
Tablo 3.4. PLC ve GPRS Haberleşme Kıyaslaması	54
Tablo 3.5. OSOS Kurulumu için Tüketim Limitleri	56
Tablo 4.1. G3-PLC Standardı PHY Katmanı Veri Hızları	75



1. GİRİŞ

Dünya genelinde elektrik enerjisi tüketiminin 2030 yılında %60 artış ile yaklaşık olarak 37000 TWh değerine yükseleceği tahmin edilmektedir. Bu talep artışının temel olarak dünya başkentlerinde görülmesi beklenmektedir. Birleşmiş Milletler verilerine göre önümüzdeki 40 yılda dünya nüfusu iki katına çıkacak, 2009 yılında 3.4 milyar olan nüfus, 2050 yılına kadar 6.9 milyar seviyesine gelecektir. Uluslararası Enerji Ajansına göre bu nüfus artışı ile dünyadaki başkentlerin bahsedilen enerji talebi artışının üçte ikisinde pay sahibi olmasını beklemektedir. Enerji talebinin karşılanması, küresel ısınma, karbon salınımı ve fosil yakıt kullanımı kavramları dikkate alındığında çevreye duyarlı bir şekilde yönetilmelidir. Bu da yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlılığı önemli ölçüde artıracaktır. Fakat sorun şu ki, günümüz elektrik şebekeleri, artan enerji talebini karşılayacak şekilde ya da yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretimini destekleyecek şekilde tasarlanmamıştır. Bu sebepten mevcut elektrik şebekesinin güncellenmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Mevcut şebekenin güncellenmesi ise “Akıllı Şebeke” kavramını ortaya çıkarmaktır (Shlebig, et al., 2017).

Akıllı Şebeke kavramının ortaya çıkışının başlangıç noktası artan elektrik enerjisi talebi olmakla beraber akıllı şebeke kavramının oluşmasını destekleyen başka parametreler de bulunmaktadır. Günümüz teknolojik gelişmeleri ile tüketici ve hizmet sağlayıcı talepleri doğrultusunda, ihtiyaç duyulan hizmet kalitesi artışı gereksinimi bu parametrelerden öne çıkanlardır. Akıllı şebekeler kullandıkları haberleşme teknolojileriyle beraber elektrik üretim, iletim ve dağıtım işlemlerinde, uzaktan anlık takip, denetim ve müdahale, esneklik, güvenilirlik, insan etkisi sebebi ile oluşabilecek hatanın ortadan kaldırılması, anlık veri iletimi şeklinde sıralanabilecek yenilikler sunmaktadır. Dağıtık üretim tesisleri, elektrikli araçlar, akıllı ev ve akıllı şehir sistemleri, enerji depolama sistemleri üretim, iletim, dağıtım denetim sistemleri, uzaktan sayaç okuma sistemleri teknik anlamda kullandıkları haberleşme yöntemleriyle beraber akıllı şebekelerin bütünü oluşturmuşlardır.

Akıllı şebeke kavramı elektrik şebekesinin etkisini, güvenliğini ve verimliliğini artırmak için sayısal bilgi ve denetim teknolojilerini kullanarak, dağıtım denetimini ve şebeke işlemleri ile ilgili iletişim, ölçümleme için akıllı teknolojilerle fırsat sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları dâhil olmak üzere üretim ve dağıtım kaynaklarının entegrasyonunu sağlayarak enerji verimliliği ve talep yönlü kaynakların

birleştirilmesi ve geliştirilmesine zemin sunmaktadır. Elektrik şebekesine bağlı cihaz ve donanımların birlikte çalışabilirliği ve iletişimi için haberleşme standartlarının gelişimi ile şebeke işlemlerinin dinamik en iyilemesini sağlamaktadır. Tüm bunlarla beraber akıllı şebekeler, tüketicilere ve hizmet sağlayıcılara istenilen zaman diliminde veya anlık olarak denetim ve takip olanağı sunmaktadır.

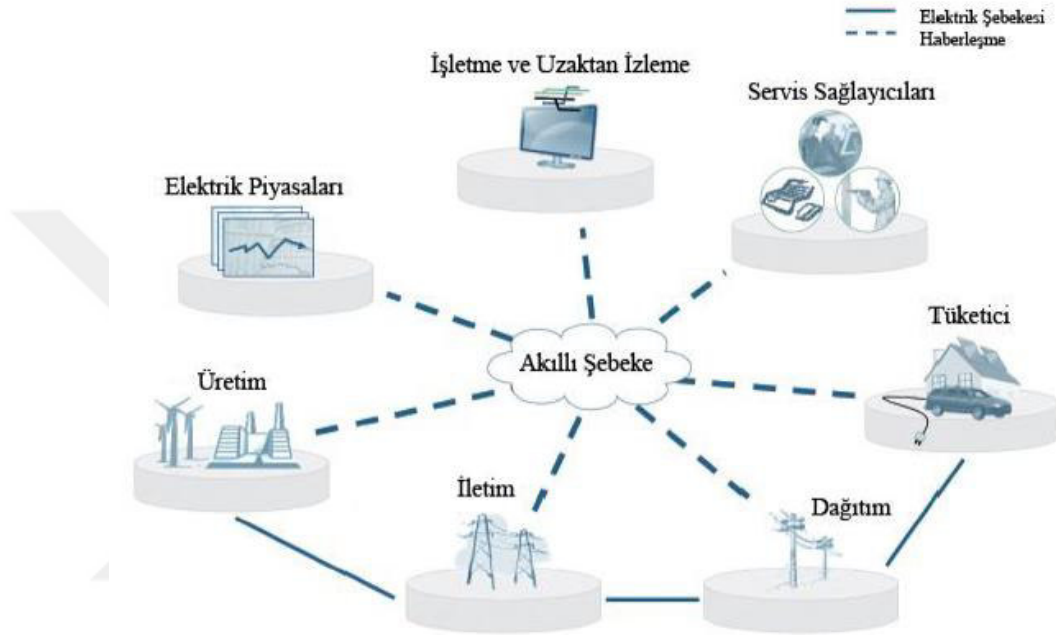
Geleneksel elektrik şebekesi; elektrik üretim, iletim ve dağıtım hizmetlerinin kesintisiz ve güvenli bir şekilde sürdürülmesi amacı ile tasarlanmıştır. Zamanla geleneksel elektrik şebekesinin işletilmesinde sadece güvenlik ve süreklilik sağlama amacı güdüldüğü yeni ihtiyaçları ve en iyileme gerekliliklerini karşılayamamıştır. 20.yy elektrik şebekeleri yerel ölçekli, küçük çaplı şebekeler olarak tasarlanmıştır. Gelişen ekonomik ihtiyaçlar ve artan talep çerçevesinde zamana yayılan eklemeler mevcut şebekelerin denetimi zor, karmaşık şebekelere dönüşmelerine yol açmıştır. 1960'ların sonlarına doğru gelişmiş dünyada hemen her ev ve iş yeri elektrik hizmetine kavuşmuştur. Yüz yılın sonlarına doğru ise bu karmaşa özellikle kalabalık şehirlerde ve ileri derecede sanayileşmiş bölgelerde artan enerji kayıpları ve denetim/takip güçlükleri olarak kendini göstermeye başlamıştır. Günümüz modern ihtiyaçları pek çok alanda mevcut şebeke altyapısı tarafından karşılanamayacak duruma geldiğinde ise yeni arayışlar başlamıştır. Bu arayışlar geleneksel şebekelerin geleceği olarak akıllı şebeke kavramını ortaya çıkaran nedenler arasındadır (Turan, 2014). Tablo 1.1'de geleneksel şebeke ile akıllı şebeke kıyaslaması gösterilmektedir. Geleneksel şebekelerden sonra akıllı şebeke ile güç sistemlerinde ve şebekede çift yönlü sağlanabilen enerji akışı ve haberleşme sinyalleri daha geniş çerçevede denetim ve haberleşme alt yapısı sunarak şebeke üzerindeki anlık yada olması gereken değişikliklere karşı etki üretilebilmesi olanağı sağlamıştır (Kabalci, 2016).

Tablo 1.1. Akıllı Şebeke ve Geleneksel Şebeke Kıyas

Geleneksel Şebeke	Akıllı Şebeke
Elektromekanik	Dijital
Sınırlı Koruma ve İzleme	Geniş Alanda Koruma ve İzleme
İzlenemeyen Tüketim	Akıllı Sayaç okuma
Tüketiciler Pasif	Tüketiciler Aktif
Manuel Kontrol	Uzaktan Kontrol
Tahminci	Kestirimci
Tek Yönlü İletişim	Çift Yönlü İletişim
Merkezi Üretim	Dağıtık Üretim

Akıllı şebekenin geleneksel şebekeye olan üstünlükleri Tablo 1.1’de gözlemlenebilmektedir. Özellikle akıllı sayaç okuma ve uzaktan denetim özellikleri elektrik şebekesinin bütünü hızla takip ve yönetim olanağını sunmaktadır.

Geleneksel elektrik şebekesinde olduğu gibi akıllı şebekenin de temel bileşenleri üretim, iletim ve dağıtımdır. Bu bileşenler kendi içerisinde detaylandırılmaktadır. Özellikle dağıtım hizmetleri bu noktada ön plana çıkmaktadır.



Şekil 1.1. Akıllı Şebeke Bileşenleri

Elektrik üretim, iletim, dağıtım hizmetleri ile diğer bileşenler bir haberleşme kanalı ile birbirine bağlanmak durumundadır. Haberleşme akıllı şebeke kavramının olmazsa olmaz en temel bileşenidir. İşletme ve uzaktan izleme hem tüketicilerin hem hizmet sağlayıcıların rolü olduğu bileşendir. Servis sağlayıcılar genel olarak elektrik dağıtım hizmeti ve haberleşme hizmeti sunan bileşenler olarak değerlendirilmektedir. Bir başka temel bileşen ise tüketicilerdir. Tüketiciler anlık sayaç okuma sonuçlarını takip ederek enerji verimliliği işlemlerini yürütmekte ve perakende hizmet sağlayıcının sunduğu tarife yapısına göre kendisine en uygun tarifeyi seçebilmektedir. Elektrik piyasasını oluşturan, elektrik dağıtım şirketleri, elektrik perakende şirketleri ve elektrik üretim şirketleri tüketim noktalarının ve üretim noktalarının anlık tüketimlerini, akıllı şebeke işlemlerinden olan uzaktan sayaç okuma sistemleri ile anlık takip ederek en doğru enerji talep ve tahminlerini yapmaya çalışarak elektrik piyasasına yön vermektedirler (Ayan, 2017).

Akıllı şebekelerde kullanılan haberleşme yöntemleri kablolu ve kablosuz teknolojiler olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Bu tez çalışmasında mevcut elektrik şebekesi üzerinden haberleşme ve veri iletimi olanağı sağlayan, kablolu haberleşme teknolojisi olan güç hattı haberleşmesi (Power Line Communication-PLC) ele alınmıştır. PLC ile akıllı şebekede dağıtım işlemlerinin en önemlilerinden olan uzaktan sayaç okuma yöntemi bu çalışmada ortaya konmaktadır.

Dünya genelinde, uzaktan sayaç okuma işlemleri, Otomatik Sayaç Okuma (Automated Meter Reading-AMR) ve Gelişmiş Sayaç Altyapısı (Advanced Metering Infrastructure-AMI) kavramlarıyla, farklı haberleşme yöntemleri kullanılarak uzun süredir yürütülmektedir. Ülkemizde ise elektrik dağıtım şirketlerinin sorumluluğunda olan uzaktan elektrik sayaçlarının okunması Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından ilgili mevzuatları ile düzenlenmektedir. EPDK, dağıtım şirketlerini ülkemizde bilinen adıyla Otomatik Sayaç Okuma Sistemleri (OSOS) kurulumu konusunda yatırım bütçesi vererek desteklemekte ve devamında denetlemektedir. Bu sebepten geniş yatırım bütçelerinin bulunduğu bu alanda doğru teknik modeli yakalayarak PLC gibi farklı haberleşme yöntemlerini sistem içine dahil ederek en iyilemeyi ve verimliliği sağlamak önem arz etmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde PLC kavramı ve uzaktan sayaç okuma ile ilgili literatür özetlerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise Texas Instruments (TI) TMDSPCKITV4 değerlendirme kartlarının laboratuvar ortamında alıcı ve verici şeklinde farklı PLC modülasyon türleriyle kullanılmasıyla veri iletişiminin sağlanması yöntemi ele alınmıştır. Bunun yanı sıra sahada alçak gerilim (AG) elektrik dağıtım şebekesinde PLC ile uzaktan sayaç okuma elektriksel modeli ortaya konmuştur. Tüm bu çalışmalar dikgen frekans bölmeli çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM) tabanlı dar bant (NB) G3-PLC standardı kullanılarak yürütülmüştür.

Dördüncü bölümde ise değerlendirme kartları üzerinden elde edilen farklı mesafe, yük değerleri ve PLC modülasyon türlerinde laboratuvar ortamında elde edilen Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio-SNR), Bit Hata Oranı (Bit Error Rate-BER), Paket Hata Oranı (Packet Error Rate-PER), Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (Received Signal Strenght Indicator-RSSI) değerleri ve saha çalışmasında PLC modem ile elde edilen sayaç okuma sonuçları ortaya konmuştur.

Beşinci bölümde ise laboratuvar ortamında ve saha çalışmasında elde edilen veriler değerlendirilmiş ve sonuçlara yer verilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

PLC geçmiş zamandan günümüze kadar ilgi duyulan bir konu olmuş ve farklı alt başlıklar oluşturularak değişik açılardan araştırılmış ve araştırılmaya devam edilmektedir. PLC ile ilgili ilk çalışma 1838 yılında İngiltere’de telgraf sistemindeki akülerin gerilim seviyesini uzaktan ölçmek amacıyla kullanılmıştır. 1890’lı yılların sonunda ve 1900’lü yılların başında İngiltere, Almanya ve Amerika’da alınan patentlerle günümüzde kullanılan PLC teknolojilerinin temeli atılmıştır (Sönmez, 2014). 2000’li yılların başında akıllı şebeke kavramının dünya genelinde yaygınlaşması sonucu veri alış verişi için haberleşme teknolojilerinin önemi artmış ve bu doğrultuda PLC ile ilgili çalışmalar artış göstermiştir.

2000 yılında Tang ve arkadaşları yüksek hızlı veri taşınması için Singapur güç dağıtım hatların karakteristiğini mesken bölgesi için analiz ederek gürültü ve sinyal zayıflamasının zaman, frekans ve konum değişiklikleriyle çeşitlilik gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu durumun sebepleri olarak, şebeke yapısının dinamik olması ve şebekede yük değişiminin her zaman mevcut olmasını göstermişlerdir (Tang, et al., 2000).

2001 yılında Moeneclaey ve arkadaşları çeşitli çoklu erişim tekniklerinin NB girişimlere karşı duyarlılığını araştırmıştır. Zaman bölmeli, kod bölmeli yapılar ve OFDM tekniğini, BER analizleri yaparak kıyaslamışlar ve OFDM tekniğinin diğer tekniklere göre daha müspet ve tercih edilebilir sonuçlar verdiği yargısına erişmişlerdir (Moeneclaey, et al., 2001).

2002 yılında Park ve arkadaşları PLC ile AMR uygulaması yapmışlardır. Mevcut yapı kullanılarak haberleşmenin düşük maliyetle sağlanması ve birçok tüketiciye erişim olanağı faydaları bu çalışma için motivasyon oluşturmuştur. PLC modem ve veri toplayıcı (Data Concentrator-DC) gibi AMR tasarımı için gerekli teknik unsurlar ve haberleşme protokolleri davranışları gerçek dağıtım şebekesinde gerçek zamanlı olarak incelenmiş, ilk aşamada PLC modem standardı ve güvenilir haberleşme noktasında sorunlar tespit edilmiştir. Uzun vadede daha çok gözlem yapılarak, deney sonuçlarının artırılması ve analiz edilmesi gerekliliği kanaatine varılmıştır (Park, et al., 2002).

2003 yılında Pavlidou ve arkadaşları PLC konusunun güncel ve gelecek durumunu ele almışlardır. Güç hatlarındaki veri iletim sorunlarını araştıran ve

modelleyen yaklaşımlar ortaya koymuşlardır ve haberleşme tekniği ile ilgili güvenilirlik sorunlarını incelemişlerdir. PLC konusunun araştırmaya açık bir çok noktası bulunan merak uyandırıcı bir alan olduğundan bahsetmişler ve PLC başarımının yüksek veri hızı iletimi gereksinimi sağlaması için geliştirilmesi ve bunun için birçok çalışmaya ihtiyaç olduğundan söz etmişlerdir. En önemli konunun yüksek frekanslı sinyallerin hat boyunca taşınması ve bu konuda standart oluşturulması ihtiyacı olarak tespit etmişlerdir (Pavlidou, et al., 2003).

2005 yılında Tran-Anh ve arkadaşları, PLC ile veri iletimini, 1-30 Mhz arası yüksek frekans değerinde ve farklı yeraltı ve havai hat uzunluklarında, OG/AG dağıtım trafosu üzerinden geçişini dikkate alarak oluşturdukları dağıtım şebekesi modeliyle incelemişler ve PLC haberleşme yönteminin yerel kullanımdan daha geniş alanlarda kullanılabilceğini, güvenilir sonuçlarla tahmin etmişlerdir (Tran-Anh, et al., 2005).

Mello ve arkadaşı, 2006'da PLC kanallarının modellenmesi, kestirimi ve benzetimi için elektriksel ve matematiksel bir model ortaya koymuşlardır. Bu modellerle PLC ağındaki karmaşık frekans yanıtlarını, çok yollu yayılmayı ve frekans seçici sönülmeyi tanımlamışlardır. Bu modellerle, OFDM temelli PLC parametrelerinin tahmini için düşük karmaşık seviyede yeni bir yöntem oluşturmuşlar ve elde ettikleri test verileri ile parametre ayarı için tatmin edici sonuçlara ulaşmışlardır (Mello and Grivet, 2006).

2008 yılında Choi ve arkadaşları yüksek güvenilirlikli NB-PLC için çip tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu çip, CENELEC B bandında 95 kHz-148 kHz frekans aralığında çalışacak ve üzerinde sinyal alıcı ve sinyal verici kısımlar bulunacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan bu çiple yapılan testlerde veri iletim hızının Robo modülasyonda 480 bps ile 2,5 kbps arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra çipin güç tüketimi 26 mW olarak tespit edilmiştir (Choi, et al., 2008).

2009 yılında Cataliotti ve arkadaşı MATLAB ortamında yaptığı benzetim çalışmasında, OG seviyesinde hattan hatta PLC ile veri iletimi modeli oluşturmuştur. Bu modelde alıcı ve verici kısımla beraber sinyal bağlama devresine yer verilmiştir. Alınan ve verilen sinyal gerilim seviyelerindeki zayıflamalar dikkate alınarak CENELEC frekans bandında farklı hat uzunlukları ve kablo kesitleri kullanılarak PLC başarımı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, iletim sinyali kayıplarının temel nedeninin bağlantı devresi olduğu tespit edilmiş ve kablo değerlerinin oluşturduğu

sinyal zayıflamalarının, bağlantı devresi sinyal zayıflamalarının yanında ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu yargısına ulaşılmıştır (Cataliotti and Tine, 2009).

2011 yılında Rao ve arkadaşları, akıllı sayaçların PLC sinyal güç seviyelerini analiz ederek şebekede aykırı durum tespiti yapmaya çalışmışlardır. Bu çalışmayla geniş çerçevede PLC sinyalini iletim sorunlarının tahmincisi olarak kullanarak yerel çerçevede elektrik kesintilerini önlemeyi hedeflemişlerdir. Bunun için trafo ve mesken bölgesindeki akıllı sayaçlar arasındaki sinyal güçlerini ölçümlemişler ve bu ölçümleri dört farklı başlık altında toplamışlardır. Çok sık sinyal gücü değişimine uğrayan sayaçlar, sinyal güçleri aynı olan sayaçlar, hızlı ve geniş ölçekte sinyal gücü düşüş gösteren sayaçlar, haftalık ortalama sinyal gücünde belirlenmiş standart sapmayı gösteren sayaçlar şeklinde bu başlıklar sıralanmıştır. Çalışma yapılan bölgenin elektrik dağıtım şirketi sayaçları üzerinden sağlanan 15 dakika aralıklı gerçek veriler ile 54 hafta boyunca 14524 adet akıllı sayaç izlenmiş ve bu sayaçlardan 677 tanesinin potansiyel bağlantı anormalliği gösterdiği tespit edilmiştir. Anormallik gösteren sayaçların büyük kısmının, PLC şebekesi ağındaki yanlış düğümlere atanması ve bu yüzden sert sinyal gücü düşüşlerine maruz kaldığı görülmüştür (Rao, et al., 2011). Depuru ve arkadaşları yaptıkları çalışmayla, akıllı sayaçların elektrik şebekesindeki kullanımını faydaları, zorlukları, sorunları ve mevcut durumunu ele almışlardır. Akıllı sayaç tasarımının hizmet veren dağıtım şirketi işletme gereklilikleri ve tüketici ihtiyaçlarına bağlı kalınarak yapılması gerektiğini söylemişlerdir. Akıllı şebeke içerisinde yer alan, akıllı sayaçların doğru haberleşme yöntemi seçimiyle akıllı şebeke içerisinde konumlandırılmasını vurgulamışlar ve PLC teknolojisini akıllı sayaç okuma için kullanılacak popüler haberleşme yöntemleri içerisinde göstermişlerdir (Depuru, et al., 2011).

2012 yılında Garrab ve arkadaşları, akıllı şebekede enerji tasarrufu sağlanması için akıllı sayaç ve PLC yöntemini kullanarak uçtan uca bir AMR sistemi tasarımı yaklaşımında bulunmuşlardır. PLC standardıyla beraber içerisinde ESP430CEI enerji ölçüm modülü bulunduran MSP430FE423A düşük güçlü mikrodenetleyiciyle sistem geliştirmesini yapmışlar ve tüketim verilerini elde etmişler. Temel yaklaşımları, AG seviyesindeki sayaçları PLC ile okuyup tüketiciye sürekli gerçek zamanlı tüketim bilgisi sunarak tüketicinin kendi enerji yönetimini yapması ve böylece tasarruf olanağı sağlanması, dağıtım şirketlerinin tepe yük zamanlarını tespit edip tüketicilere farklı tarifeler sunarak, tüketimleri tepe yük zamanı dışına itmek ve bu şekilde yeni elektrik

üretim tesisinin önüne geçerek karbon salınımı azaltmaya yardımcı olmak şeklinde olmuştur (Garrab, et al., 2012). Lee ve arkadaşları Avrupa standardı olan G3 NB-PLC ve Amerika Standardı olan HPGP geniş bant (BB) PLC yapılarını elektrikli araçların şarj istasyonları değerlerini akıllı şebeke sistemine aktarımı için, eşleşen PLC sinyalin durumuna göre seçenekli şekilde kullanılabilen, NB ve BB bir arada olmak üzere çift yapılı fiziksel katman modeli ortaya koymuşlardır. Bu modelle birlikte akıllı şebeke sistemine veri aktarımı yapabilecek PLC bant genişliğini artırarak, elektrikli araç ve şarj istasyonlarının takibinin daha etkin yapılarak elektrikli araç endüstrisine katkı sağlayacağını belirtmişlerdir (Lee, et al., 2012).

2013 yılında Usman ve arkadaşı yaptıkları çalışmada akıllı şebeke uygulamaları için kullanılan haberleşme teknolojilerinin gelişimi incelemişlerdir. Akıllı şebeke kavramının ortaya çıkmasının haberleşme teknolojilerinin gelişimini hızlandırdığını söylemişlerdir. PLC, Zigbee, Wi-Fi, GSM-GPRS gibi kablolu ve kablosuz haberleşme teknolojilerini AMR başta olmak üzere diğer akıllı şebeke uygulamalarında kullanımını değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmede, PLC teknolojisinin GSM-GPRS teknolojisiyle beraber diğer haberleşme türlerine göre, AMR uygulamaları için en uygun haberleşme teknolojileri olduğunu ortaya koymuşlardır. OFDM tabanlı, BPSK ve FSK gibi modülasyon türleri ile PLC teknolojisinin hızlı veri aktarım hızı, düşük maliyet ve düşük kayıpla çalıştığından bahsetmiş, NB-PLC ve BB-PLC türlerinin çalışma frekans aralıklarına çalışmalarında yer vermiş, NB-PLC türünün, BB-PLC türüne göre uzun mesafe uygulamalarında kullanımının faydasını vurgulamışlardır (Usman and Shami, 2013). Zheng ve arkadaşları yaptıkları çalışma ile PLC ve Radyo Frekans (RF) haberleşme teknolojilerinin akıllı sayaç uygulamaları için kullanım durumunu ele almışlardır. Fransa, Almanya, Hollanda, Norveç ve İngiltere gibi ülkelerdeki akıllı sayaç uygulamalarının güncel adetlerine ve bu ülkelerin akıllı sayaç konusunda gelecek öngörülerini ortaya koymuşlardır. Bunun yanı sıra Avrupa’da PLC ve RF haberleşme özellikli akıllı sayaç üreten şirketlerin ürünlerinden bahsetmişlerdir. Akıllı sayaç kavramının önemini ülkelerdeki yönetimler, dağıtım şirketleri ve tüketici açısından olmak üzere değerlendirmişlerdir (Zheng and Lin, 2013). Kabalci ve arkadaşı PV sistemde kullanılmak üzere MATLAB/Simulink ortamında PLC ile haberleşen bir ölçüm modeli ortaya koymuşlardır. PLC haberleşme türünün BPSK modülasyon tipini modelleyip, PV sistemin maksimum güç izleme noktasına ait akım ve gerilim

bilgilerinin, GSM tabanlı ya da başka herhangi bir haberleşme teknolojisi maliyeti ve ek bir izleme sistemi kurulumu maliyetine gerek duymadan uzaktan elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır (Kabalci and Kabalci, 2013).

2014 yılında Yigit ve arkadaşları PLC teknolojisinin akıllı şebeke uygulamalarında kullanılmasıyla ilgili gelişmeleri ve zorlukları incelemiştir. Farklı tür PLC haberleşme türünün kullanıldığı temel akıllı şebeke uygulamalarını, başta AMR ve AMI olmak üzere, elektrikli araçlar şebeke haberleşmesi, talep tarafı yönetimi, uzaktan arıza tespiti, akıllı ev içi uygulamaları şeklinde sıralamışlardır. Bunun yanı sıra, PLC kullanımının faydalarını; geniş kapsam alanı, esnek ve uzun mesafe haberleşme olanağı, düşük maliyet, kurulum kolaylığı, sabit şebeke şartlarında stabil olması şeklinde belirtmişler, PLC kullanımının mahsurlarını ise; şebekede yüksek gürültü kaynakları olması sonucu BER değerinin yüksek olması, sinyal zayıflaması ve sinyal bozulması, şebekenin değişkenliğe açık yapısı nedeniyle başka cihazların şebekeye eklenmesi sonucu oluşan haberleşme sinyalinin değişimi ve girişimler şeklinde ortaya koymuşlardır (Yigit, et al., 2014). Mlynek ve arkadaşları, sokak aydınlatmalarının denetimi için CENELEC A bandı NB-PLC seviyesinde, G3-PLC ve PRIME standartları ile çalışan PLC modemlerle yapılan deneylerle ayrı ayrı sonuçlar elde etmiş ve bunları kıyaslamışlardır. Bu çalışmada PLC modem donanımı olarak, TI C200 PLC modem geliştirme kiti ve yazılım olarak TI Zero Konfigürasyon sistemi kullanılmıştır. G3-PLC için ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK modülasyon türleri kullanılmış, PRIME için ise BPSK, QPSK, 8PSK özellikli modülasyon türleri kullanılmıştır. Ortada sokak aydınlatma yükü bulunan iki PLC modem arası yapılan, farklı mesafeler, farklı büyüklükte veri boyutları kullanılan deneyler sonucu RSSI, SNR ve kbps değerleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu 8PSK ve QPSK modülasyon türlerinde veri hızı yüksek olmasına rağmen veri iletiminde zaman zaman aksamalar olduğu gözlemlenmiştir. ROBO modülasyon türünün veri iletimi sağlamlığı açısından fayda sağlandığı ve G3-PLC standardının, PRIME standardına göre bir miktar daha verimli sonuçlar ortaya çıkardığı yargısına ulaşılmıştır (Mlynek, et al., 2014). Mlynek ve arkadaşları güç hattı kanalı için iletim işlevi geliştirmişler ve bununla güç hattı topolojisi parametrelerine etki etmek ve güç hattı kanalını topolojisini tahmininde bulunmayı hedeflemiştir. Güç hattı karakteristiği ve güç hattı topolojisi parametrelerinin iletim işlevine olan etkisini incelemişler ve yük empedansı, branş uzunluğu, branş sayısı, frekans seçiciliği etkilerini ele almışlardır.

Analiz sonuçlarında güç hattı şebekesi parametrelerinin iletim işlevi ve sinyal zayıflaması üzerinde ciddi boyutta etkisinin olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu etkiyi azaltmak adına şebeke parametrelerine göre, haberleşme parametrelerini, modülasyon türünü, alt taşıyıcıları, kod yapısını, güç seviyesini değiştirmeyi çözüm olarak önermişler ve G3-PLC standardının bu adaptasyon için uygun olduğunu belirtmişlerdir (Mlynek, et al., 2014).

2015 yılında Long ve arkadaşları, Kanada Fortis Alberta Elektrik Dağıtım şirketi bölgesinde PLC haberleşme türlü AMR sistemi uygulaması gerçekleştirmişler ve dağıtım şebekesi güç kalitesi durumunun bu sistem üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma şekli olarak ultra dar bant (UNB) PLC bant genişliğini seçmişler ve son nokta olarak belirtilen tüm sayaçların veri aktaracak yazılımla eş zamanlı haberleşmesini hedeflemişlerdir. PLC sinyalinin, güç kalitesini değiştiren, son nokta olan tüketici hareketlerinden, şebeke yük değişimlerinden, güç hattının dallanmasından ve dağıtım şebekesine eklenen donanımlardan etkilenerek girişimlere maruz kaldığını söylemişlerdir. Bu durumun yanı sıra PLC ile AMR uygulamasında özellikle nüfusun az olduğu yerler ve kırsal bölgelerde başarı sağlandığı, sayaç okuma işlemlerinin, manuel uygulamalardan ve dolayısıyla okuyucu hatalarından uzak daha doğru bir biçimde yapılarak, düşük maliyet ve verimlilik sağlandığını tespit etmişlerdir (Long, et al., 2015). Erlinghagen ve arkadaşları Avrupa'da akıllı sayaçlar için kullanılan haberleşme standartlarını karşılaştırmalı olarak ele almışlardır. Aralarında G3-PLC, PRIME gibi standartların da bulunduğu 17 adet haberleşme standardını belirlemiş oldukları teknik ve teknik olmayan kriterlere göre kıyaslamışlardır. Teknik kriterleri mesafe, birlikte çalışabilirlik, frekans bandı, veri hızı, sağlamlık ve veri modeli olarak; teknik olmayan kriterleri ise maliyet, mevcut ve beklenen kurulum şekli, standartların açıklığı ile haberleşme ağının mülkiyeti şeklinde belirlemişlerdir. Bunun yanı sıra akıllı sayaç sayılarının Avrupa yayılımı ile gelecek öngörüsünü açıklamışlar ve akıllı sayaçların akıllı şebeke içerisindeki önemine dikkat çekmişlerdir (Erlinghager, et al., 2015). Mlynek ve arkadaşları, yaptıkları çalışma ile PLC teknolojisini ve NB-PLC standartlarını tanımlamışlar ve akıllı sayaç verilerinin uzaktan merkezi veri yönetim sistemine aktarılması için G3-PLC ve kablosuz haberleşme yöntemlerinden Zigbee beraber kullanıldığı heterojen bir haberleşme modeli ortaya koymuşlardır. Akıllı sayaçlardan Rs485 haberleşme portu üzerinden PLC modemler ile elde edilen sayaç verileri bir noktada DC donanım üzerinde toplanarak o noktadan kablosuz Zigbee

haberleşme yöntemiyle uzaktan merkezi veri yönetim sistemine aktarılmıştır . Böylece iki farklı haberleşme metodu bir arada kullanılmıştır (Mlynek, et al., 2015). Bouassam ve arkadaşları, çoklu giriş çoklu çıkış PLC kanalı için yük empedansının etkisini, ekleme kazancı ve kapasite açısından ele almışlardır. Laboratuvar ortamında yaptıkları deneyle, elektrik şebekesi mevcut hattını PLC haberleşme şekli olarak kullanan bir çoklu giriş çoklu çıkış PLC sisteme yük eklendiğinde, yükün oluşturduğu empedansın sinyal zayıflamasına sebep olarak kazancı düşürdüğünü ve kapasitenin veri iletim hızı açısından yaklaşık dört kat azaldığını tespit etmişlerdir (Bouassam, et al., 2015). Pianta ve arkadaşları, PLC teknolojisinin akıllı şebeke uygulamalarından olan akıllı ev için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Akıllı ev için kullanılacak, çoklu taşıyıcılı yapıya sahip BB-PLC ve NB-PLC ile yüksek veri iletim hızı ve düşük veri iletim hızının sağlanabileceğini söylemişlerdir. Ev içi enerji yönetimi ve ev içi denetim haberleşmesi için bu bant genişliklerini kullanarak verici başlangıç noktası modeli ortaya koymuşlardır (Pianta and Tonello, 2015). Foudeh ve arkadaşları, Ürdün Elektrik Dağıtım bölgesinde GPRS ve PLC haberleşme yöntemlerinin kullanıldığı AMR ve AMI projeleri gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçlarla akıllı sayaç uygulamaları bakımından bu iki haberleşme teknolojisini karşılaştırmışlardır. Sayaç okuma başarısı olarak yüzde iki farkla GPRS önde çıkmışken, işletme maliyetlerinin az olması ve üçüncü kişiye gerek duymadan sistem sahibinin dağıtım şirketi olması faydaları ile de PLC, GPRS haberleşmeye göre ön plana çıkmıştır (Foudeh and Mokhtar, 2015).

2016 yılında Pagani ve arkadaşları, daha çok kablosuz haberleşme teknikleri ile özdeşleşmiş, çoklu giriş çoklu çıkış yapısını, başarımlarını sağlamak amacıyla bina içi PLC kanalı için önermişlerdir. Çoklu giriş çoklu çıkış yapısının matematiksel yapısına bağlı olarak İngiltere, Fransa, Belçika İngiltere, Almanya ve İtalya olmak üzere altı Avrupa ülkesinde otuz beş binada yaptıkları ölçümler sonucu elde edilen veriler ile başarılı bir istatistiksel model ortaya koymuşlardır (Pagani and Schwager, 2016). Oliveira ve arkadaşları OFDM tabanlı NB-PLC haberleşme türünde veri iletimi sırasında meydana gelen girişimlerden dolayı oluşan hataları düzeltmek ve BER değerini iyileştirmek amacıyla, literatürde yaygın olarak bilinen Reed-Solomon hata düzeltme kod yapısı yerine bir kod yapısı geliştirmişlerdir (Oliveira, et al., 2016). Malek ve arkadaşları PLC ile haberleşme sağlayan AMR sistemine ait elektrik sayaçlarının enerji ölçüm değerlerinin, PLC sinyalinden etkilenip etkilenmediğini araştırmışlardır. Bu çalışmada, FCC ve CENELEC bant genişliklerinde, OFDM

tabanlı G3-PLC ve PRIME standartlarını farklı ölçüm sınıflarına ait elektrik sayaçlarında kullanarak, benzetim çalışmalarını yaptıkları gürültü seviye değerlerinde yaptıkları ölçümlerle etkilenip etkilenmeme durumunu ortaya koymuşlardır. Farklı açılardan ele alınarak yapılan bu çalışma sonucunda elektrik sayaçlarının enerji ölçüm değerlerinin PLC sinyalinden etkilenmediğini ortaya koymuşlardır. Tüm ölçümler sonucunda PLC ile haberleşen AMR sistemindeki sayaçların ölçümlerinin hata değerlerinin, sayacın standardında belirtilen hata sınıfı içerisinde kaldığını tespit etmişlerdir (Malek, et al., 2016). Nazmudeen ve arkadaşları, akıllı şebekenin bir çok ülkede uygulandığını, tüketicilere daha temiz ve daha yeşil bir enerji sunduğunu belirtmişler ve akıllı şebekenin daha etkin, daha verimli kullanılması için veri toplama, işleme, taşıma işlemleri için belirli yerlerde yazılım özellikli altyapılar gerekliliği olduğunu söylemişlerdir. Akıllı şebeke unsurlarından akıllı sayaçlar, topladığı detaylı enerji tüketim bilgilerini veri birleştirme tekniklerini kullanarak sayaç verileri yönetim sistemlerine PLC haberleşme türünü kullanarak ilettiğinden bahsetmişlerdir. Yüklü miktarda gelen sayaç verilerinin merkezi yazılımlarda işlenerek enerji talep tahmini için kullanıldığı belirtmişlerdir. Bu noktada yüklü miktarda sahadan düzensiz olarak sürekli gelen sayaç verisi akışının PLC bant genişliğinin verimli kullanımına engel olduğu ve darboğaz oluşturduğunu söylemişler ve olumsuz bu durumu ortadan kaldırmak için sis bilişimi tekniğinin yardımıyla dağıtık veri birleştirme yaklaşımı için bir yapı önermişler ve bu öneriyle birlikte PLC kapasitesinin etkin kullanılmasını, sayaç verisi depolanmasının azaltılmasını hedeflemişlerdir (Nazmudeen, et al., 2016). Sebastian, akıllı sayaçları kullanarak PLC kanalındaki gürültü kaynağını tespit etmeye çalışmıştır. Bu çalışmasında, CENELEC-A bant genişliğinde G3-PLC standardını kullanarak akıllı sayaçların bağlı olduğu yüklere ait enerji ölçüm değerleri ile G3-PLC modem kullandığı kanal kalite değerleri raporları arasında ilişki kurmaya çalışmıştır. Elde ettiği değerler sonucunda akıllı sayaçların ölçüm yaptığı tüketici tarafındaki yük değerlerinin ve tüketim değerlerinin değişmesi sonucu gürültü üretiminin değiştiği ve bunun sonucunda PLC modem üzerinden ölçümlenen RSSI, SNR, BER ve PER değerlerinin doğrudan etkilenerek değişim gösterdiği yargısına ulaşmıştır (Avram, 2016).

2017 yılında Slacik ve arkadaşları, NB-PLC frekans aralığında PRIME ve G3-PLC standartlarını, Atmel marka geliştirme kitlerini alıcı ve verici olarak kullanarak, farklı mesafelerde, farklı modülasyon türlerinde, SNR, veri hızı gibi değerleri

ölçümleyerek karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Değerlendirme neticesinde, G3-PLC standardının, PRIME standardından yaklaşık %32,8 daha iyi sonuç ürettiği kanaatine varmışlardır (Slacik, et al., 2017). Moaveninejad ve arkadaşları AG seviyesinde PLC haberleşme ağının, akıllı sayaçlar ile ev içi cihazlar arasında doğrudan bağlantıya olanak tanıdığını söylemişlerdir. Bu çalışmayla akıllı sayaç sonrası, akıllı ev uygulaması için 125-140 kHz CENELEC-C bandı frekans aralığında, NB-PLC seviyesinde, sağlam veri iletiminin sağlanacağı, gürültü etkisinin en az olacağı PLC kanalının bulunması için OFDM tabanlı BPSK ve QPSK modülasyon türlerini kullanarak BER analizi yapmışlardır (Moaveninejad, et al., 2017). Arechalde ve arkadaşları, Avrupa merkezli akıllı sayaç uygulamalarında NB-PLC bant genişliğinin yaygın olarak kullanıldığı söylemişlerdir. Bu yaygın kullanımdan dolayı girişimlerden, sinyal bozulmalarından kaçınmak için NB-PLC bant aralığını genişletme ihtiyacı olduğunu belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, NB-PLC bant aralığını 150 kHz-500 kHz şeklinde belirleyerek, PRIME standardında, İspanya dağıtım şirketi bölgesinde kentsel alanda farklı yerlerde SNR, BER, başarılı alınan paket sayısı değerlerini ölçerek farklı kanallar için başarımlar analizi yapmışlardır. Bu analiz sonucunda haberleşme için uygun kanalları tespit etmişler, farklı tür girişimlere çeşitli frekans bantlarında rastlamışlar ve trafo merkezi ve sayaçlar arası mesafe arttıkça gürültü seviyesinin azaldığı yargılarına ulaşmışlardır. Tüm bunların yanı sıra daha doğru sonuç için, kırsal bölgelerde de ölçüm yapılarak saha testinin genişletilmesi gereksiniminden bahsetmişlerdir (Arechalde, et al., 2017). Hadlach ve arkadaşları MATLAB programında kurguladıkları benzetim çalışmasında PLC teknolojisini kullanarak akıllı şebeke görüntüleme sistemi ortaya koymuşlardır. Bu modelde, AG seviyesinde bir PV sisteme ait enerji ölçüm bilgilerini BPSK modülasyon türünü kullanarak taşıyıcı sinyali modüle edip üç faz hatta 25 km mesafe boyunca taşımışlar ve hattın sonunda sinyal iyileştirici blok ve filtre ile taşıyıcı sinyalin kanal boyunca maruz kaldığı bozucu etkileri azaltmışlardır (Hadlach, et al., 2017). Lisowski ve arkadaşları AMI sisteminin uzaktan sayaç okuma sistemini vurgulamışlar ve PLC ile yapılan normal bir uzaktan sayaç okuma işleminde veri iletimi esnasında darboğazlar oluşabileceğini söylemişlerdir. Bunun yanı sıra akıllı sayaçlardan PLC ile DC birimine kadar taşınan verilerin, DC biriminden sayaç yönetim sistemine aktarımı için kablosuz haberleşme teknolojisi sağlayıcılarının yüksek kontrat bedelleri istediklerini belirtmişlerdir. Bu sebeplerden dolayı veri iletimini hacmini azaltmak için sayaç verilerinin tahmine dayalı seyrek raporlama algoritmasına göre elde edilmesini

önermişlerdir. Bu algoritmaya göre dokuz ay boyunca beş yüz adet sayacın verilerinin uzaktan okunması izlemişler ve gereksiz okumaları elemine ederek sayaç veri hacmini düşürdüklerini tespit etmişlerdir (Lisowski, et al., 2017). Masood ve arkadaşları, AMI sistemlerinin, akıllı şebeke içerisinde, elektrik dağıtım şirketleri işlemleri ve tüketiciler için önemli olduğunu belirtmişlerdir. NB-PLC seviyesinde G3-PLC ve PRIME gibi standartların kullanılarak uzaktan sayaç okuma işlemlerinin yaygınlaşacağını söylemişlerdir. Bu doğrultuda bir MATLAB benzetim çalışmasında, CENELEC-A bandında 75 kVA-200 kVA güç trafosu modeliyle, 9 kHz-90 kHz frekans aralığında PLC teknolojisi için değerlendirmede bulunmuşlardır. Sonuç olarak benzetim çalışmasıyla elde edilen sonuçların PLC kanal iletim işlevi ile yakın değerde olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmayla özellikle Güney Asya coğrafyası için daha gelişmiş ve daha doğru bir NB-PLC kanal modeli önermişlerdir (Masood, et al., 2017). Khazee ve arkadaşları AMI sistemini kullanarak ticari ve mesken ağırlıklı tüketici bölgelerde dağıtım kayıplarını azaltmak için AG seviyesinde pilot bir saha uygulaması yapmışlardır. Bu uygulamada tüketim noktalarındaki sayaçların ölçüm bilgileri PLC haberleşme türü ile dağıtım trafosu noktasında bulunan DC birimine aktarılmış, oradan da GPRS haberleşme türü ile sayaç veri yönetim yazılımına iletilmiştir. Bu çalışma sonucunda tüm sayaçlar eş zamanlı bir şekilde aynı anda uzaktan okunarak, toplam ölçüm değerleri, dağıtım trafosu noktasındaki sayacın tüketim değeri ile kıyaslanarak özellikle teknik olmayan kayıp noktalarını tespit etmişlerdir (Khazee, et al., 2017). Ozgonenel ve arkadaşları dağıtım trafoları üzerinden PLC ile haberleşmenin, dağıtım trafosunun teknik yapısı dolayısıyla sorunlu olduğunu söylemişlerdir. Bu doğrultuda NB-PLC seviyesi ve CENELEC bandı 3 kHz-148,5 kHz frekans aralığını kullanarak, ilk aşamada dağıtım trafosunun yüksek frekans modelini oluşturmayı, ikinci aşamada minimum BER ve PER değerlerine sahip haberleşme alt yapısı oluşturmayı planlamışlardır. Laboratuvar ortamında, üç faz, 2kVA, 50 Hz değerlerinde trafo, pi model 137 km, 77 kV, 100 A değerlerinde iletim hattı ve sinyal üretici kullanarak önerdikleri PLC modeline ait eşdeğer devreyle, BPSK modülasyon türünde BER ve gerilim kazancı değerlerini elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, dağıtım trafosunun yüksek frekans davranışı nedeniyle PLC sinyalinin dağıtım trafosu aracılığıyla iletiminin zorlayıcı bir iş olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra yüksek frekans modeli yöntemini temel alan üç faz hat ve üç faz trafo yapısıyla etkin sinyal rotası oluşturulabileceğini söylemişlerdir (Ozgonenel, et al., 2017). Ercan ve arkadaşları PLC kullanımının, OG ve AG seviyelerinde dağıtım trafosunu üzerinden

gerçekleşerek genişlemesini hedeflemişlerdir. Bunun için güç hattının ve dağıtım trafosunun yüksek frekans modelini geliştirmek için iletim hattı modeli tekniğini önermişlerdir. Önerdikleri bu modeli, laboratuvar ortamında, 50 kVA, 34,5 kV/0,4 kV, üçgen-yıldız bağlı dağıtım trafosundan aldıkları gerçek zamanlı ölçümlerle doğrulamışlardır. Deneysel sonuçlardaki ve karşılaştırma için kullandıkları MATLAB benzetim çalışmasında bulunan sonuçlardaki BER değerleri, tasarladıkları iletim hattı modelinin, dağıtım trafosunun yüksek frekans modeli için uygun olduğunu göstermiştir (Ercan, et al., 2017).

2018 yılında Masood ve arkadaşları istatistiksel ve determinist yaklaşımları kullanarak AG şebekede, NB-PLC seviyesinde PLC ile haberleşme için kanal modeli oluşturmuşlar ve iki farklı yaklaşımla elde edilen sonuçların uygunluğunu karşılaştırmışlardır. İstatistiksel yaklaşımı, empedans uyumsuzluğu ve AG şebekesinde bulunan dalların sayısı dahil olmak üzere, sinyalin çok yollu yayılma özelliklerini temel alarak oluşturmuşlardır. Determinist yaklaşım ise iletim hattı parametreleri değerleri dikkate alınarak, frekans seçiciliği ve empedans ilişkisi kurularak oluşturulmuştur. Her iki yaklaşımın doğrulaması NB-PLC 3 kHz-500 kHz frekans aralığında gerçekleştirilmiş ve uygunlukları tespit edilmiştir (Masood, et al., 2018). Merkulov ve arkadaşı, tahmine dayalı veri sıkıştırma algoritması ve taşıma denetim protokolünü kullanarak modem üzerinde geliştirdikleri metot ile NB-PLC kanalı kullanımında verim artışı sağlamışlardır (Merkulov and Shuvalov, 2018). Carvalho ve arkadaşları AG şebekede üç yüz otuz akıllı sayaç, otuz üç DC ve BPSK modülasyon türlü PLC haberleşme kullanarak bir AMI sistemi oluşturmuşlar ve elde ettikleri ölçüm süresi değerlerini IEC 61968 standardı değerlerine göre kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçların, kıyaslama yapılan standardın minimum gereksinimlerini karşıladığı yargısına ulaşmışlardır (Carvalho, et al., 2018). Li ve arkadaşları AG şebekede, PLC ve Zigbee haberleşme teknolojilerini beraber kullanarak akıllı sayaçların %99'dan fazlasının verilerinin okunabildiği, düşük güç tüketimli, düşük maliyetli AMI sistemi tasarımı gerçekleştirmişler ve sahada uygulamışlardır (Li, et al., 2018). Ercan ve arkadaşları yaptıkları çalışmayla dağıtım trafolarını PLC kanalı olarak kullanılma durumunu araştırmışlardır. Genel olarak, trafoların alçak geçiren filtre özelliğine sahip olduğunu ve bu sebepten yüksek frekanslı sinyalin taşınmasına uygun olmadığını bildiğini söylemişlerdir. Geliştirdikleri dağıtım trafosu yüksek frekans modelini kullanarak, 400 kVA, 11 kV/0,416 kV değerlerinde Dy11 bağlantı şeklinde trafo

kullanarak, CENELEC bandı BPSK modülasyon türünde yaptıkları gerçek zamanlı deneyler sonucunda elde ettikleri BER değerlerine göre, dağıtım trafosu yüksek frekans modeliyle, dağıtım trafosu üzerinden veri iletiminde, kabul edilebilir ölçüde hata oranı tespit ettiklerini belirtmişlerdir (Ercan, et al., 2018).

2019 yılında Ngcobo ve arkadaşı, AMI sistemin akıllı şebekenin en önemli parçalarından biri olduğunu ve tüketiciyle elektrik dağıtım hizmeti sağlayıcı arasında çift yönlü haberleşme sağlaması gerektiğini söylemişlerdir. Bu kapsamda yaptıkları çalışma ile NB-PLC ile haberleşen, akıllı sayaç ve DC bileşenlerinden oluşan bir AMI sisteminin, iki farklı topolojide, benzetim çalışmasını yapmış ve bu iki farklı topolojiyi, akıllı sayaçlardan PLC ile DC birimine aktarılan verilerin çakışma durumu açısından kıyaslamışlardır. Birinci topolojide, AMI sisteminde bulunan akıllı sayaçların DC ile bağlantıları merkezi şekilde yapılmışken, ikinci topolojide akıllı sayaç bağlantılarını üç faza yayarak, dağıtık bir şekilde DC birimiyle bağlantı kurmalarını sağlamışlardır. Benzetim çalışması çıktılarına göre, merkezi AMI topolojisinde DC noktasında, dağıtık AMI topolojisine göre daha çok sayaç verisi çakışması olduğu gözlemlenmiştir (Ngcobo and Ghayoor, 2019). Fernandez ve arkadaşları AG şebekesi giriş empedansını, üç farklı ölçüm metodu kullanarak, NB-PLC seviyesi, 9 kHz-500 kHz frekans aralığında, benzetim çalışmaları ve İsviçre elektrik dağıtım bölgesi sahasında ölçümlemişlerdir. Bu çalışmayla belirlenen frekans aralığında NB-PLC iletim kanalına doğrudan etki eden empedans değerlerini belirleyerek, düzeltme ve iyileştirme gereksinimleri için yanıt aramayı hedeflemişlerdir. Kullanılan üç metodun temelinde ortak olarak şebekeye bir referans sinyali gönderme olmakla beraber, bu üç metodun, donanım, sinyal işleme, şebekeye bağlantı devresi ve ölçüm yöntemi açısından farklı olduklarını söylemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarla, üç metotla da elde edilen verilerle, AG şebeke empedansını karakterize etme hususunda, tutarlı ve yüksek doğrulukta sonuçlara ulaştıklarını belirtmişlerdir (Fernandez, et al., 2019). Lopez ve arkadaşları, akıllı şebekede, PLC teknolojisinin rolünü, karşılaşılan zorluklar, mevcut uygulamalar ve araştırılan noktalar açısından geniş ölçekte ele almışlardır. PLC yönteminin doğal yapısıyla ekonomik ve teknik faydalar içerdiğini söyleyerek, geniş bir kullanım alanı olduğundan bahsetmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, PLC teknolojisinin, özellikle kablosuz haberleşme teknolojileri tarafından zorlandığını, fakat akıllı şebeke ekosisteminde, en büyük uygulamaların başarılı bir şekilde PLC kullanılarak

gerçekleştirildiğini, gelecek yıllarda da PLC kullanımının var olacağını ve pazar payının garanti olduğunu söylemişlerdir (Lopez, et al., 2019).

2020 yılında, Llano ve arkadaşları, oluşturdukları sanal PLC laboratuvarında, yaptıkları benzetim çalışmalarıyla AMI sistemlerinde kullanılan, NB-PLC seviyesi, G3-PLC ve PRIME standartlarının fiziksel katmanları için geliştirme noktalarını tespit etmeye çalışmışlardır. Bu analiz çalışmasında, standartlaşmış test ve ölçüm yöntemleri uygulamışlar, ETSI tarafından tanımlanan parametrelerle kanal bozulmasının etkisini incelemişler ve dağıtık üretim tesisi tarafından üretilmiş gürültü seviyelerini kullanmışlardır. Her iki standardı özellikle OFDM tabanlı gürültülü alt kanalın bastırılması ve hata düzeltme kodu başarımları açısından değerlendirmişler ve gelecekteki PLC teknolojileri için geliştirme yapılacak noktalar için önerilerini belirlemişlerdir (Llano, et al., 2020). Borovina ve arkadaşları, NB-PLC kullanılan bir akıllı sayaç uygulaması için hata başarımları analizi ve modeli çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında, sınırlı kullanılan olasılık kuramı ve kırsal AG dağıtım şebekesi işlemleri esnasında ölçülen uzun dönemli verilerden faydalanmışlardır. Bu çalışmada ilk adımda, PLC kanalındaki gürültü ve ileri hata düzeltme tekniklerinin etkisi dikkate alınarak mesajlardaki hataların olasılık dağılımını tanımlamaya çalışmışlar, ikinci adımda ise BER değerinin rastgele bir değişken olduğunu varsayarak, hataların mesajlar halinde kümelenmesinden ziyade, örnekte rastgele dağıtıldığı düşünülerek, farklı SNR değerleri için, gerçek BER değerinin güvenli çalışma aralığını hesaplamışlardır. Bu araştırmadaki sonuçlarla, fiziksel katmanda, gelişmiş yapıları içeren üst katman haberleşme protokollerinin başarımının ortaya koyulmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir (Borovina, et al., 2020). Shrestha ve arkadaşları akıllı şebeke için uygulanan güvenlik sınıflandırma yöntemini ortaya koymuşlardır. Akıllı sayaç, DC, haberleşme kanalları, merkezi yazılım gibi AMI bileşenlerini dikkate alarak, dağıtım hizmet sağlayıcıları ve son kullanıcılar açısından siber güvenlik tehditlerini ortaya koymuşlar ve bu tehditlere karşı alınabilecek önlemleri belirtmişlerdir (Shrestha, et al., 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

PLC ile haberleşme, başta uzaktan akıllı sayaç okuma uygulamaları olmak üzere akıllı şebeke kapsamında yaygın şekilde kullanılmaktadır. PLC ile haberleşme türüne ait temel parametreler; haberleşme çeşitleri ve standartları, modülasyon teknikleri bu haberleşme türünün temelini oluşturmaktadır. Verici ve alıcı iki nokta arası haberleşme esasına dayanan akıllı sayaç uygulamalarında, PLC kullanım uygunluğunun farklı senaryolarla araştırılması için programlanabilen geliştirme bordları ve gerçek verilerin elde edildiği uzaktan akıllı sayaç okuma saha modeli yöntem olarak ön plana çıkmaktadır.

3.1. Güç Hatları Üzerinden Haberleşme

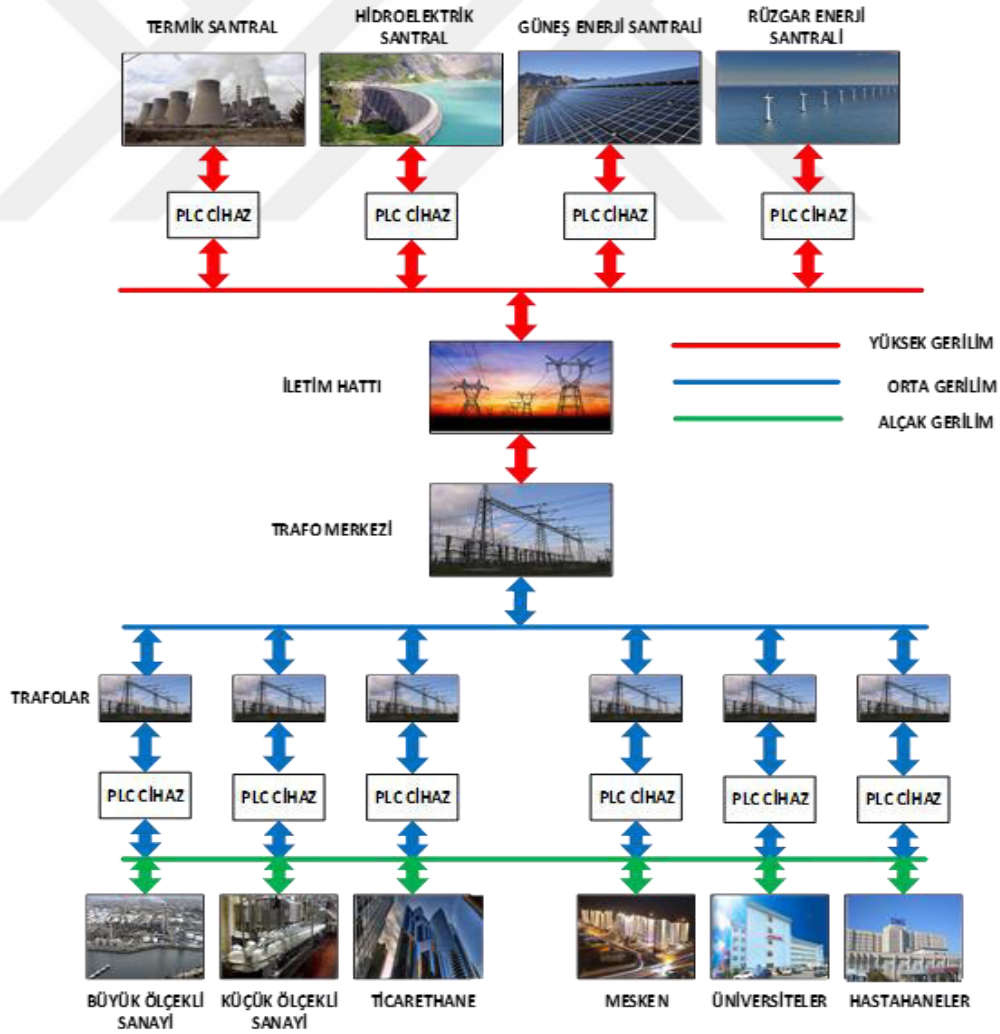
PLC teknolojisi, mevcut elektrik şebekesi üzerinden üretim, iletim ve dağıtım işlemleri yürütülürken aynı zamanda veri iletişiminin gerçekleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. PLC, yüksek frekans uygulamalarının geliştirilmesi ve önem kazanmasıyla, elektrik üretim iletim ve dağıtım işlemlerinde uzaktan denetim ve şebeke takip için kullanılmaya başlanmıştır (Goyal, 2013).

PLC teknolojisinin uçtan uca iletişim yeteneğine sahip olması ile yeni nesil elektrik şebekesine duyarlı olduğu kanıtlanmıştır ve daha da önemlisi PLC haberleşme türünün teknolojik olarak ele alınmasıyla, PLC standartları ve sertifikasyonları oluşturulmuş ve bunun sonucunda PLC, elektrik şebekesinin haberleşmesi ve uzaktan denetimi açısından ilgi görmüştür (Sharma and Saini, 2017).

PLC haberleşme üretim, iletim, dağıtım hatları içerisindeki akıllı şebeke nesnesi ile uzaktan denetim merkezi arasında çift yönlü iletişim sağlama yöntemidir. PLC teknolojisi ile üretim, iletim, dağıtım hatları, elektrik şebekelerinde başta uzaktan sayaç okuma olmak üzere, yük denetimi ve koruma sinyalizasyonu gibi uygulamalar için veri iletişimi ortamı olarak kullanılmaktadır. Sinyalizasyon yüksek gerilim hatlarında kullanılırken, sayaç okuma sonuçları gibi verilerin iletişimi OG ve AG hatları üzerinden yapılmaktadır. Günümüzdeki uygulamalarda PLC ile haberleşme yönteminin, elektrik dağıtım işlemlerinden olan uzaktan sayaç okuma için yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi mevcut dağıtım şebekesinin trafodan sayaca kadar var olmasıyla veri iletişimi için hali hazırda kablolu bir haberleşme yöntemi zemini olmasıdır.

Elektrik şebekesi açısından bakıldığında haberleşme yöntemi olarak PLC kullanımının faydaları, mevcut elektrik hatlarını kullanması ve bu hatlara bağlı olan cihazlarla iletişime geçecek olmasıyla yeni saha yapılanma ihtiyacının olmaması, zorlu saha şartlarında haberleşme sağlama özelliğiyle kapsama alanı sorunu olmaması, anten kullanımını gereksinimi olmaması şeklinde sıralanırken, mahsurları ise, elektrik hatlarının haberleşme amaçlı tasarlanmaması, haberleşme empedansı ve haberleşme kanal koşullarının sürekli değişmesi, şebekedeki aşırı anahtarlama sayısı, işaret zayıflaması ve girişime maruz kalması şeklinde sıralanabilmektedir.

PLC ile haberleşme elektrik şebekesinin genelinde her katmanda mümkün olmakla beraber en yaygın kullanım AG elektrik dağıtım şebekesinde gözlemlenmektedir. Elektrik üretim, iletim ve dağıtım işlemlerinin yürütüldüğü noktalarda PLC özellikli modem ile mevcut elektrik şebekesi üzerinden iletişim sağlanabilmektedir.



Şekil 3.1. Elektrik Şebekesi Katmanlarında PLC kullanımı

3.2. Güç Hattı Haberleşmesinin Temel Parametreleri

Güç hattı üzerinden verici ve alıcı iki nokta arasında veri taşınan PLC kanalı, sinyal zayıflaması, gürültü, sinyalin girişime maruz kalması, değişken ve düzensiz yük değişimi ve anahtarlama, kuplaj devresi uygunluğu, elektrik şebekesi dinamik yapısı ve farklılıkları gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. PLC yöntemi kullanılarak haberleşme sağlanması için bu sorunların aşılması amacıyla, zaman ve frekans düzleminde çeşitli modeller geliştirilmiştir. Zaman düzlemi temelli modeller çok yönlü yayılma modeli olarak bilinirken, frekans düzlemi temelli modeller, iletim hattı modeli olarak bilinmektedir. PLC kanalı modeli için istatistiksel ve determinist yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. PLC kanalının dinamik ve değişken yapısı dolayısıyla şebekeden elde edilen verilerle oluşturulan istatistiksel yaklaşım yöntemi ön plana çıkmaktadır. Son yıllardaki araştırmalarda ise hem istatistiksel hem de determinist yaklaşım yöntemlerinin birlikte kullanıldığı modellerin oluşturulmaya çalışıldığı gözlemlenmektedir (Lampe, et al., 2016).

Haberleşme türü olarak PLC yönteminin kullanımı için PLC kanalına ait empedans değeri, PLC kanalının şebekede karşılaşacağı gürültü ve uçtan uca veri taşınması esnasında yaşanabilecek sinyal zayıflaması olmak üzere üç temel parametrenin dikkate alınması gerekmektedir.

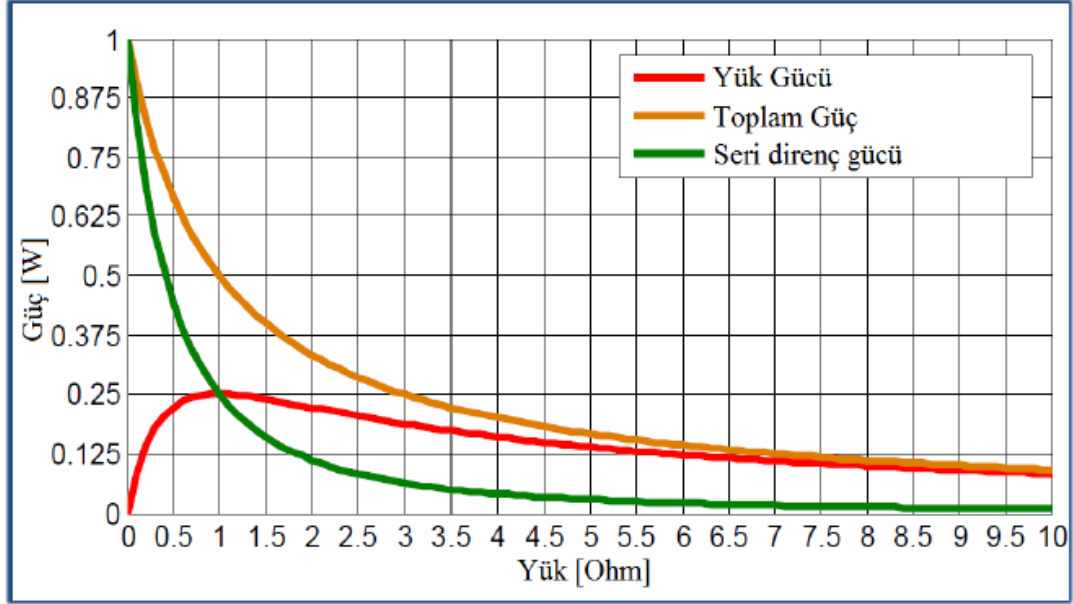
3.2.1. Empedans Değerleri

Frekans ve şebekede bulunan yüklerin durumuna göre zamanla değişken karaktere sahip empedans değeri, NB-PLC kanalı için giriş empedansı ya da kanal empedansı olarak ifade edilmektedir. NB-PLC kanalına ait çalışma frekans aralığında, düşük değerli giriş empedansları görülmesi, sayaçlarla bütünleşik yada ayrı olarak beraber çalışan PLC modemlerde, güç aktarımı noktasında sorun teşkil edebilmektedir.

Dünya geneli kabul görmüş PLC standartları tarafından belirtilmiş sinyal genliklerinin, PLC ile veri iletişimi gerçekleştirilmesi hedeflenen hattın düşük kanal empedans değerleri için de geçerli olması gerekmektedir. Bu durum en düşük empedans değerinin belirlenip, bu değere göre verici noktasında gerekli en büyük gücün tespit edilmesiyle mümkündür.

Alıcı/verici devrenin empedans değeri, veri iletişiminin sağlandığı kanal empedansı ile aynı değerde olursa, iki nokta arası veri taşıyacak sinyalin gücü en üst

seviyede hatta iletilmiş olur. Maksimum güç aktarım kuramı şeklinde ifade edilen bu durum Şekil 3.2’de gösterilmektedir. 1 Volt genlik değerine sahip, 1 Ohm seri direnci olan bir kaynaktan enerji almış bir direncin değerinin değişimine göre aktarılan gücün durumu görülmektedir. Maksimum güç aktarımının, direnç değerinin seri dirence eşit olduğu 1 Ohm değerinde gerçekleştiği gözlemlenmektedir.



Şekil 3.2. Maximum Güç Aktarım Kuramı

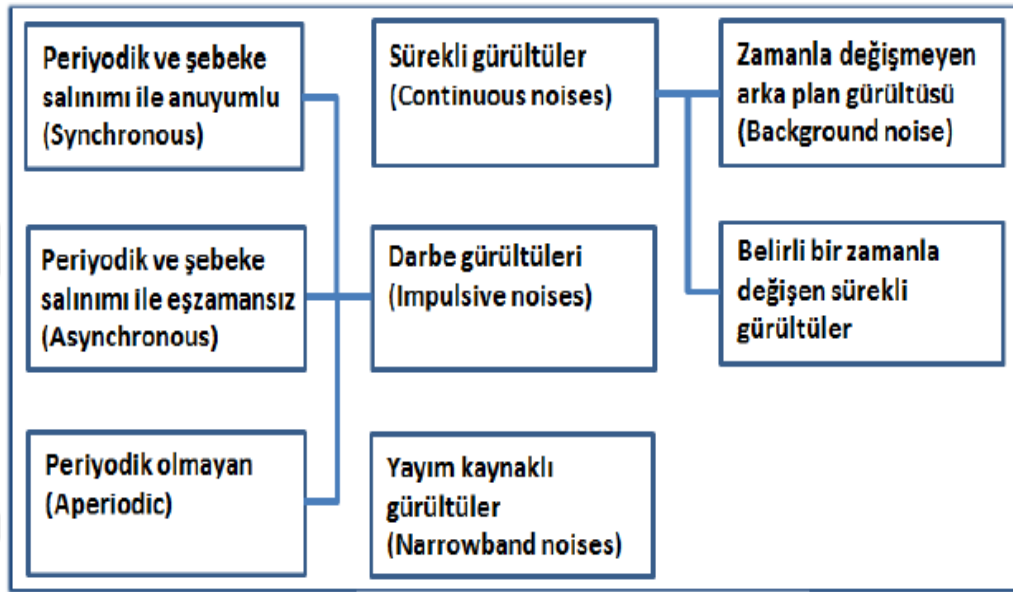
PLC teknolojisinde kuplaj devreleri, taşıyıcı sinyallerin güç hattı ile irtibatlanmasını sağlamaktadırlar. Özellikle kapasite kullanılarak tasarlanan kapasitif özellikli kuplaj devreleri ile alıcı verici noktalar arasında çift yönlü haberleşme olanağı oluşturulmaktadır. Kuplaj devresinin temel görevi, haberleşmenin sağlandığı güç hattı empedansı ile modem üzerindeki verici ve alıcı devrelerin empedans değerlerinin eşit hale getirmektir. Bu durum hat empedans parametrelerine göre kuplaj devresinin alt ve üst kesim frekans değerlerinin değiştirilmesi ile sağlanmaktadır (Sönmez, 2014).

3.2.2. Gürültü

Gürültü, PLC haberleşme kanalının çalışmasını, oluşturduğu bozucu etkiyle olumsuz yönde değiştirebilen temel parametrelerden biridir. Güç hattında gözlemlenen gürültüler, şebekede bulunan yüklerin karakteristiklerine, bu yüklerin hatta bağlantı durumlarına, devreye girip çıkma durumlarına, şebekede meydana gelen sık anahtarlama işlemlerinde ve zamana göre farklılık göstermektedir. Gürültüler şebekede oluşturdukları özellikleriyle, verici ve alıcı olarak konumlanmış iki nokta

arasında veri iletişimini sağlayan taşıyıcı sinyallerin, frekans ve genlik değerlerini doğrudan etkilemektedir.

Gürültüye ait, frekans, süre, genlik ve güç yoğunluk spektrumu parametreleri, gürültü analizinde kullanılan başlıca değerlerdir. NB-PLC seviyesi için, spektrum analizör, osiloskop, veri toplama kartlarıyla yapılan ölçümler sonucu elde edilen veriler, analitik çalışmalar ve şebeke yüklerine göre yapılmış çalışmalar değerlendirilerek, şebekedeki gürültüler Şekil 3.3'te sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.3. NB-PLC Gürültü Sınıfları

Başta darbe gürültüsü olmak üzere, sürekli gürültüler ve yayım kaynaklı gürültüler şeklinde üç temel başlıkta gürültüler sınıflandırılmıştır. PLC teknolojisi için üzerinde en çok durulan ve modellenmeye çalışılan gürültü türü darbe gürültüsüdür. Darbe gürültüsü kaynağı, elektrik şebekesinde bulunan yükler ve donanımlardır. Darbe gürültüleri düzenli veya düzensiz darbeler şeklinde oluşan yüksek genlik değerine sahip gürültülerdir. Periyodik ve şebeke ile zaman uyumlu eş zamanlı darbe gürültüleri yarı iletken elemanların anahtarlama yapması sonucu oluşan gürültüler, şebekeyle uyumlu fakat frekans açısından eşzamansız darbe gürültüleri anahtarlama güç kaynakları çalışması sonucu oluşan gürültüler, periyodik olmayan gürültüler ise şebekedeki cihazların devreye giriş çıkış anlarında oluşan geçici hallerdeki şebeke frekansından bağımsız oluşan gürültüler şeklinde örneklendirilebilir. Sürekli gürültüler, PLC kanalında şebeke frekansı ve bu frekans değerindeki harmoniklerle aynı periyotta ve şebekedeki yükler sebebiyle hattın belirli bir kısmında ortaya çıkan

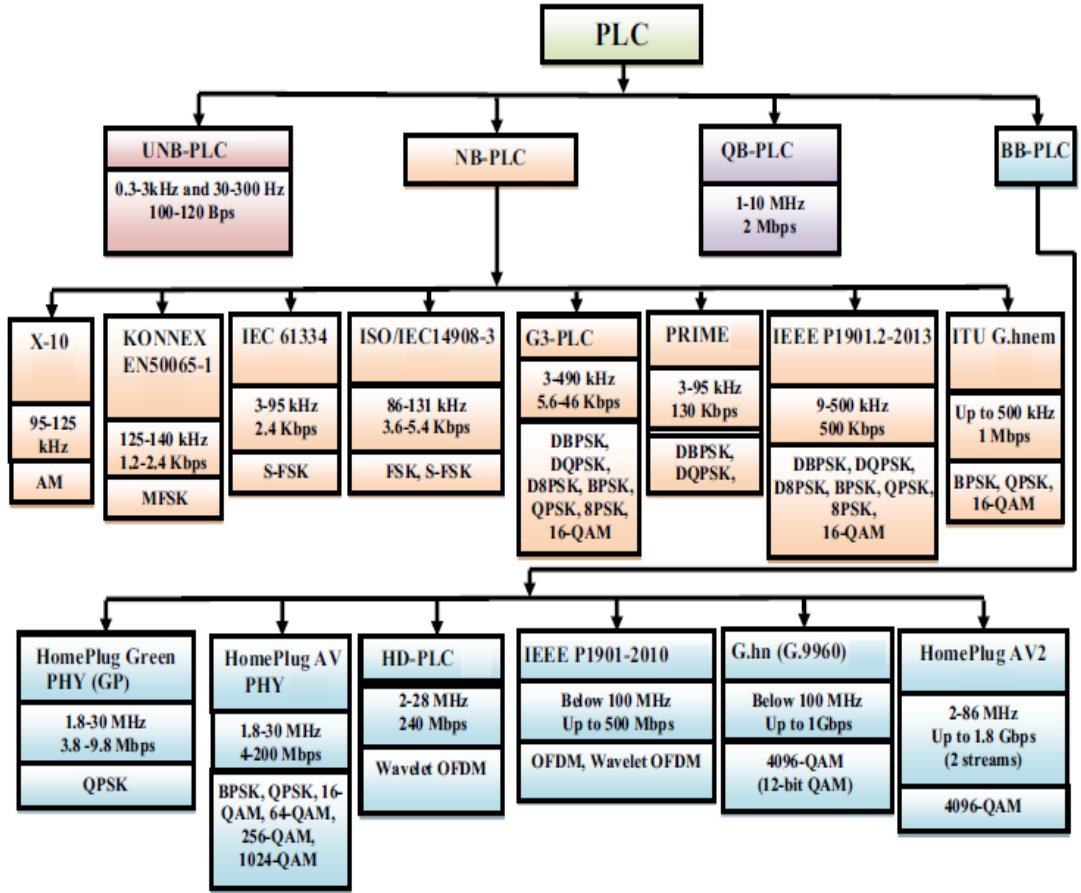
gürültülerdir. Yayım gürültüsü kablo uzunluğu nedeniyle ortaya çıkan gürültülerdir (Sönmez, 2014).

3.2.3. Sinyal Zayıflaması

PLC teknolojisinde, sinyal zayıflaması için en önemli iki parametre, veri iletişiminin yapıldığı güç hattının uzunluğu ve bu hat üzerindeki ek sayısıdır. Verici ve alıcı noktalar arasındaki mesafenin uzun olmasının ve bu hat üzerinde aşırı derecede ek noktası bulunmasının, sinyal zayıflamasına neden olması beklenmektedir. Bu durumların yanı sıra dikkate alınması gereken bir diğer parametre haberleşme hattında bulunan yükler ve bu yüklerin devreye girip çıkması sonucu oluşan değişken durumların hat empedansında meydana getireceği değişkenliklerdir. Bu değişkenlikler dolaylı olarak sinyal genliğini farklılaştıracağı için sinyal zayıflamasına etki edecektir. Bu nedenle aynı iletken uzunluğuna ve aynı ek sayısına sahip hatlarda farklı sinyal zayıflama değerleri görülebilmektedir. Ülkemizde yapılan bir çalışma sonucunda, sanayi bölgesinde 30 dB, kentsel bölgede 20 dB ve kırsal bölgede 19 dB seviyelerinde sinyal zayıflaması değerleri ölçümlenmiş ve bu sinyal zayıflama seviyelerinin kablosuz haberleşme teknolojileri sinyal zayıflama değerlerinden aşırı derecede yüksek olmadığı tespit edilmiştir (Cavdar and Karadeniz, 2008).

3.3. Güç Hatları Üzerinden Haberleşme Çeşitleri ve Standartları

İlk olarak PLC sinyali 500 Hz mertebesine kadar New York şehri sokak aydınlatması denetimi için kullanılmıştır. Sonrasında PLC teknolojisinin ilerleyişiyle beraber veri iletimi işlemlerinde şebeke hattı üzerinden güvenilir şekilde haberleşme için uygulanmış ve öncelikle elektrik dağıtım şebekesi üzerinde bu haberleşme yöntemi tesis edilmiştir. Akıllı sayaç uygulamalarında, PLC metodunun yaygın şekilde kullanılmasıyla etkinliği kanıtlanmış ve dünya genelinde akıllı sayaç uygulamalarının haberleşme alt yapısını oluşturmuştur. Bu durumdan dolayı öncelikli olarak akıllı sayaç ile enerji ölçüm işlemleri baz alınarak dünya geneli PLC standartları ve modülasyon türleri oluşturulmuştur. PLC ile haberleşme çeşitleri veri aktarım hızları ve çalışma frekans aralıkları dikkate alınarak, UNB-PLC, NB-PLC, Yarı Bant (QB)-PLC ve BB-PLC olmak üzere dört temel başlığa ayrılmıştır. Şekil 3.4'te bu PLC çeşitlerine ait veri iletim hızı, frekans aralıkları, modülasyon türleri ve tanımlanmış standartlar görülmektedir (Sharma and Saini, 2017).



Şekil 3.4. PLC Haberleşme Çeşitleri ve Standartları

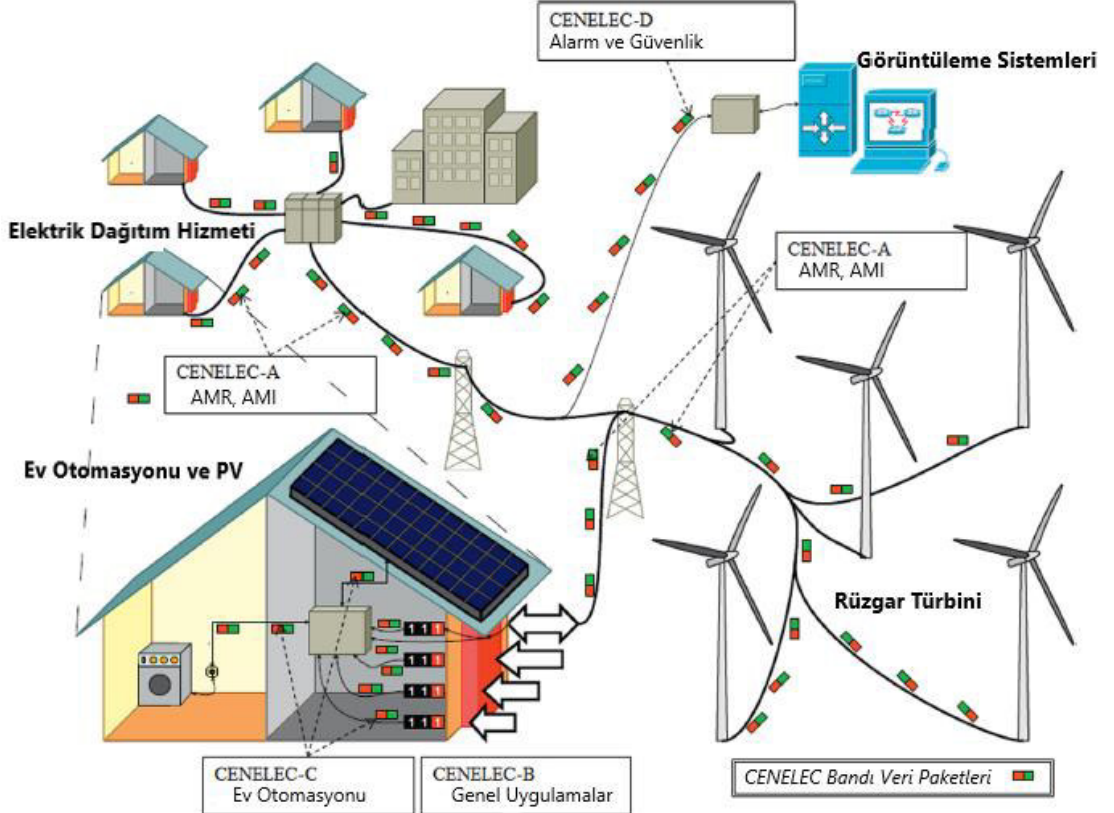
Şekil 3.4 incelendiğinde PLC haberleşme çeşitlerinden NB-PLC ve BB-PLC yapılarının ön plana çıktığı görülmektedir. Oluşturulan PLC standartları NB-PLC ve BB-PLC ile ilişkili olarak kümelenmektedir. NB-PLC için 3 kHz - 500 kHz frekans aralığı ve 1,2 kbps - 1Mbps veri iletişim hızı aralığı görülürken, BB-PLC için 1,8 MHz - 100 MHz frekans aralığı ve 9,8 Mbps - 1,8 Gbps veri iletişim hız aralığı görülmektedir. NB-PLC teknolojisine ait G3-PLC ve PRIME standartları üzerinde yoğun çalışılan ve yaygın kullanılan standartlardır. Bunun yanı sıra, BB-PLC teknolojisi için HomePlug AV ve IEEE P1901-2010 standartların kullanımının yüksek olduğu söylenebilmektedir.

NB-PLC, özellikle elektrik şebekesinde akıllı sayaç verilerini uzaktan elde etmek için kullanılan, yoğun işlem hacmine sahip PLC çeşidi olarak bilinmektedir. Bu doğrultuda, Avrupa kökenli CENELEC, Amerika kökenli FCC ve Japonya kökenli ARIB isimli kuruluşlar, NB-PLC seviyesi için kendi standartlarını oluşturacak frekans bantlarını belirlemişlerdir. Tablo 3.1’de bu frekans aralıkları görülmektedir (Berger, et al., 2013).

Tablo 3.1. NB-PLC Frekans Aralıkları

BÖLGE	KURULUŞ	FREKANS ARALIĞI
AVRUPA	CENELEC	3 kHz - 148,5 kHz
ABD	FEC	10 kHz - 490 kHz
JAPONYA	ARIB	10 kHz - 450 kHz

Avrupa standartlarını düzenleyen CENELEC, işlem çeşitliliğini göz önüne alarak, verimli ve sorunsuz çalışmanın sağlanması için 3 kHz – 148,5 kHz çalışma frekans aralığını dört alt frekans bandına bölmüştür. 9 kHz – 95 kHz frekans aralığında, CENELEC-A bandı, sadece, dağıtım ve üretim hizmet sağlayıcılarına tahsis edilmiştir. 95 kHz – 125 kHz frekans aralığında CENELEC-B bandı, tüketici genel uygulamaları için ayrılmış banttır. 125 kHz – 140 kHz frekans aralığında CENELEC-C bandı bina içi denetim haberleşmesi için düzenlenen frekans bandıdır. 140 kHz – 148,5 kHz frekans aralığında, CENELEC-D bandı tüketicilerin alarm ve güvenlik sistemlerinin kullanımı için oluşturulmuş banttır. Şekil 3.5'te CENELEC alt bantlarının elektrik şebekesinde kullanım durumu görülmektedir (Masood and Baig, 2016).



Şekil 3.5. Elektrik Şebekesinde CENELEC Alt Bantları Kullanımı

Bu tez çalışmasında araştırmalar, verici-alıcı olarak programlanmış geliştirme kitleri ile laboratuvar ortamında, PLC modem, akıllı sayaç ve DC ile AG elektrik dağıtım şebekesi saha ortamında olmak üzere iki uygulamayla yürütülmüştür. Her iki araştırma da PLC ile akıllı sayaç verilerini uzaktan okuma amaçladığından, geliştirme kitleri ve PLC modem programlarında NB-PLC seviyesi CENELEC-A bandı frekans aralığı yöntem olarak kullanılmıştır.

3.4. Akıllı Şebekelerde Güç Hattı Haberleşmesi

Geleneksel şebekelerin, akıllı şebekeye dönüşümü, her ne kadar elektrik dağıtım seviyesinde ön plana çıkmış olsa da bu dönüşüm elektrik üretim ve iletim seviyelerinde de gerçekleşmektedir. Bu sebepten akıllı şebekenin bileşenlerinden biri olan haberleşme sistemi ihtiyacı, elektrik şebekesinin her katmanı ve her gerilim seviyesi için geçerlidir. PLC haberleşme türü yaygın olarak elektrik dağıtım şebekesinin AG seviyesinde kullanılmaktadır. Bu durumun sonucu olarak elektrik şebekesinde oluşturulan PLC standartlarının bir çoğu NB-PLC seviyesinde yoğunlaşmıştır. Bu durumun yanı sıra NB-PLC teknolojisini, yeteri kadar uygulanmamış ve standartlaşmamış olsa da şebekenin OG ve YG seviyesindeki, iletim ve üretim işlemleri için kullanmak mümkündür.

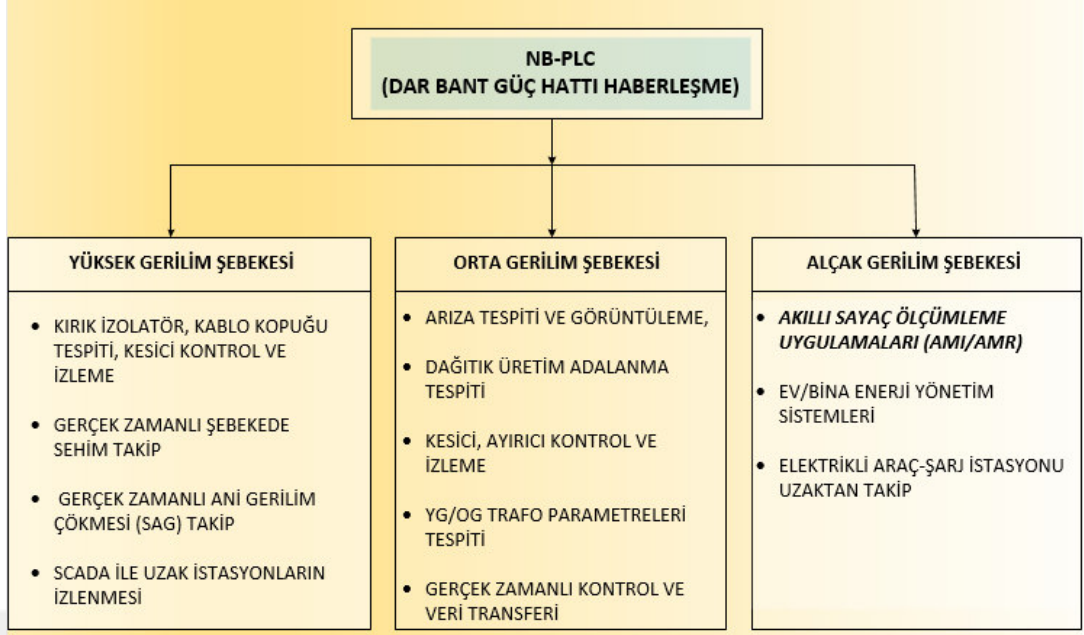
PLC teknolojisinin işlem hacmi açısından en geniş kullanıldığı yer AG elektrik dağıtım seviyesidir. Şebekede tüketim noktalarındaki milyonlarca elektrik sayaçlarının verilerinin uzaktan elde edilmesi için akıllı şebekenin en temel uygulamaları olan AMR ve AMI sitemlerinin haberleşme ihtiyacını NB-PLC çeşidi ve bağlı haberleşme standartları sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, kullanımı artmaya başlayan, gelecek nesil elektrik şebekesinin en aktif bileşenlerinden olacak elektrikli araçlar, şarj istasyonları ve elektrik dağıtım hizmet sağlayıcıları üçgeni arasındaki uzaktan izleme ve görüntüleme ihtiyacının giderilmesinde AG seviyesinde PLC haberleşme teknolojisinin rol aldığı görülmektedir. Akıllı bina olarak bilinen bina içi enerji yönetimi ve bina içi denetim sistemleri haberleşmesi için kullanılan PLC teknolojisi bir diğer AG şebekede katmanında görülen PLC uygulamasıdır. Özellikle PV ve Rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile tesis edilen dağıtık üretim tesisleri başta olmak üzere üretim tesislerin ürettiği enerji verileri çift yönlü sayaç üzerinden AMR ve AMI uygulamaları dahilinde PLC ile uzaktan okunabilmektedir.

OG seviyesinde bulunan cihazların denetimi ve durum bilgilerinin bir haberleşme sistemi ile sağlanabilmesi, akıllı şebeke gelişimi için son derece önemlidir

ve PLC teknolojisi bu kapsamda kullanılması mümkün olan bir haberleşme teknolojisidir. OG şebekede, arıza tespitinin yapılması, güç kalitesi ölçer cihazlar ile trafo merkezi, dağıtım merkezi gibi yerlerin güç kalitesi parametrelerinin PLC ile merkezi yazılımlara iletilmesi başlıca yürütülen işlemlerdir. YG/OG dönüşüm sağlayan trafoların yağ sıcaklıklarının ve ikincil sargı gerilim seviyelerinin uzaktan tespit edilmesi için PLC kullanımı yine OG seviyede mümkün olabilecek işlemlerdendir. Kesici, ayırıcı gibi OG seviyesi anahtarlama donanımlarının konum bilgisi ve uzaktan denetimi için PLC, kullanılabilen bir haberleşme teknolojisidir. Bunlara ek olarak OG seviyesi dağıtık üretim şeklinde tesis edilmiş şebekede arıza oluşması sonucu istenmeyen durum olan adalanmanın görülmesi mümkündür. Bu istenmeyen durum OG şebekeye PLC sinyali enjekte ederek tespit edip önlemek mümkündür (Galli, et al., 2011).

YG seviyesinde, özellikle NB-PLC, koruma donanımlarının durum takibi ve izleme sistemlerinin verilerinin uzaktan okunması için, geniş frekans aralığı, uzun mesafe iletişim olanağı, düşük maliyet ve veri iletim hızı özellikleri kullanılabilen bir haberleşme teknolojisidir. Arızalı bölgenin tespiti, kırık izolatör, sigorta konum tespiti, kopuk iletken, YG seviyesi hatların sehim tespiti gibi durumlar PLC sinyallerden faydalanılarak uzaktan tespit edilebilecek durumlardır (Ademi, et al., 2009). Elektrik şebekesinde, YG ve OG gerilim seviyeleri için uzaktan izleme ve yönetim sistemi olarak bilinen SCADA sistemlerinde PLC haberleşme teknolojisi olarak kullanılabilir. Bunlara ek olarak, şebekede ani gerilim düşüşü olarak bilinen Sag olayının gerçek zamanlı uzaktan takibi PLC sinyalin davranışlarını inceleyerek mümkündür (Villiers, et al., 2008).

Şekil 3.6'da elektrik şebekesinde, dağıtım, iletim ve üretim gerilim seviyeleri olan, AG, OG ve YG seviyelerinde, NB-PLC teknolojisinin kullanıldığı şebeke uygulamaları gösterilmektedir. NB-PLC uygulamalarının çok büyük çoğunluğu AG şebekede gerçekleştirilen uzaktan sayaç okuma işlemleridir. NB-PLC gelecekte çok daha yaygınlaşarak elektrikli araçlar, şarj istasyonları ve ölçüm noktaları arasındaki haberleşme için daha etkin kullanılacaktır. Akıllı ev, akıllı bina yönetim sistemleri haberleşmesi için her ne kadar BB-PLC ön plana çıkmış olsa da bu yönetim sistemlerinin haberleşmesinde teknik olarak NB-PLC uygulamalarına da rastlamak mümkündür.

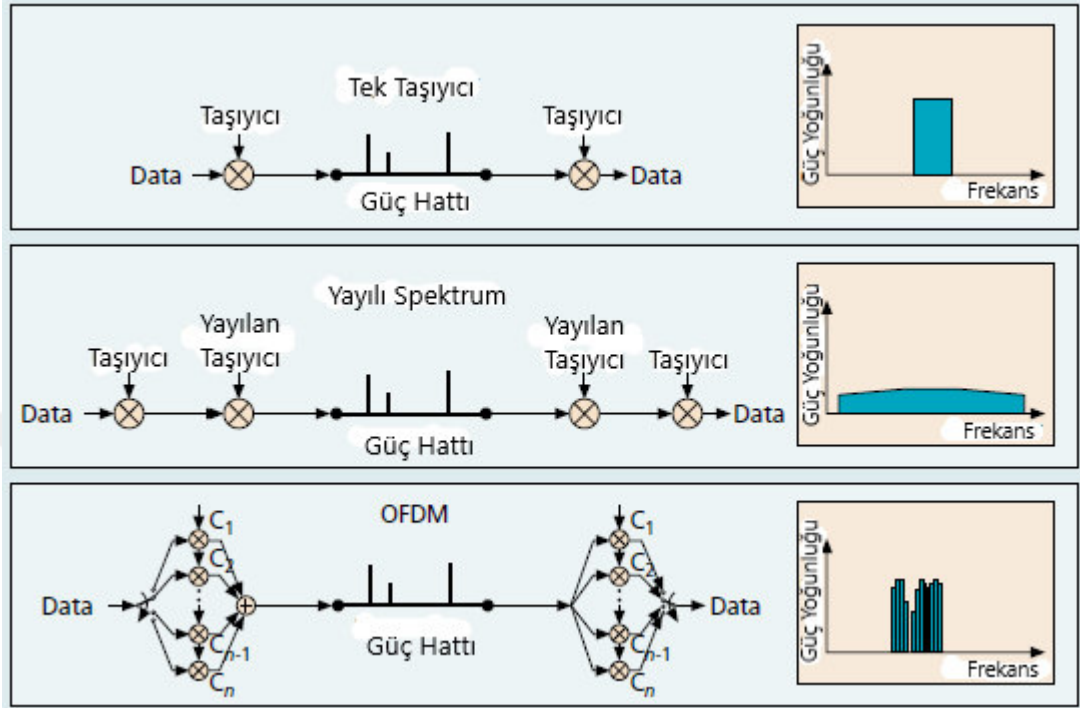


Şekil 3.6. NB-PLC ile Akıllı Şebeke Uygulamaları

3.5. Güç Hattı Haberleşmesinde Kullanılan Modülasyon Teknikleri

PLC yöntemiyle verici ve alıcı noktalar arası veri taşıma işlemi, mevcut geleneksel elektrik şebekesi üzerinden gerçekleştirilmektedir fakat geleneksel elektrik şebekesi iki nokta arası veri iletişimini sağlamak amacıyla değil, güç taşımak amacıyla tasarlanmıştır. Bu sebepten veri taşıyan sinyalin, verinin taşındığı PLC kanalına uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, veri taşıyan sinyalin, faz, genlik veya frekans parametrelerinden birinin karakteristiğinin, düzenleyici sinyale göre dönüşüm gerçekleştirilmesi modülasyon olarak tanımlanmaktadır. Modülasyon işlemiyle iki nokta arası veri taşıyan sinyal, PLC kanalına uygun hale getirilmiş olur. Modülasyon türleri, faz kaydırmalı anahtarlama olarak bilinen PSK, genlik kaydırmalı anahtarlama olarak bilinen ASK, frekans kaydırmalı anahtarlama olarak bilinen FSK şeklinde sıralanmaktadır. Bu modülasyon türlerinin, iletilecek sinyal için tek bir taşıyıcı kullanmaları durumu, tek taşıyıcılı modülasyon olarak bilinmektedir. Bunun yanı sıra tek taşıyıcıyı serpmeye taşıyıcı olarak yayılı spektrumda kullanmak da tek taşıyıcılı modülasyon kapsamındadır. Modülasyon türlerinin PLC kanalında sinyal iletimi için birden fazla taşıyıcı kullanma halleri ise çok taşıyıcılı modülasyon olarak ifade edilmektedir. Çok taşıyıcılı modülasyonun en bilinen yapısı dikgen frekans bölmeli çoklama olarak adlandırılan OFDM tekniğidir. Şekil 3.7’de modülasyon şekline göre veri taşıma biçimleri görülmektedir. Yayılı spektrum düşük güç yoğunluğu ile dikkati çekerken, OFDM ise oluşturduğu çoklu dar yapıda alt veri

taşıyıcılarla girişimlerden daha az etkilenen, diğer modülasyon türlerine göre daha sağlam veri iletim şekline sahip modülasyon şeması olarak ön plana çıkmaktadır (Gotz, et al., 2004).

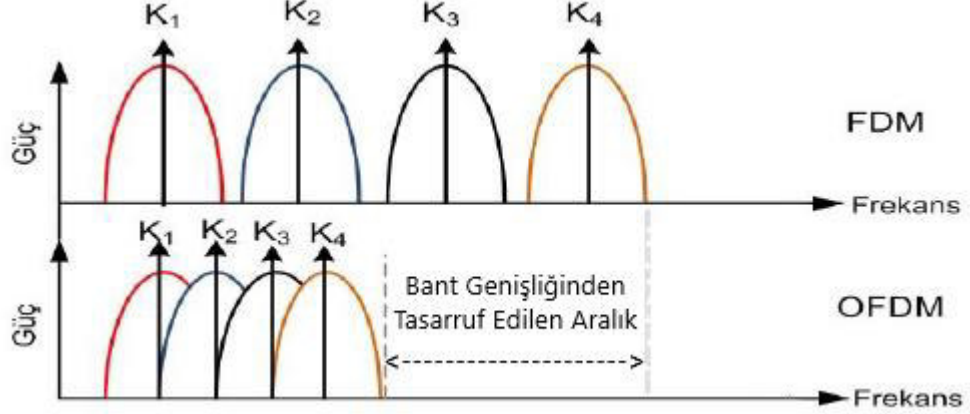


Şekil 3.7. PLC Modülasyon Yapıları

3.5.1. OFDM

Bir PLC kanalı içerisinde birden fazla taşıyıcı oluşturularak, sinyali girişimlerden korumak ve sağlamlığını artırmak hedeflenmiş ve bu doğrultuda çoklama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler PLC kanalına ait frekans, zaman ve kod bilgilerinden birinin bölümlenmesiyle geliştirilmiştir. PLC kanalının çalışma frekans aralığını, çoklu taşıyıcılar için alt frekans aralıklarına bölümlenerek oluşturulan yöntem, frekans bölmeli çoklama (FDM), veri taşınan kanalı taşıyıcılar için zaman farklılığı sağlanarak bölümlenmesiyle oluşturulan yöntem, zaman bölmeli çoklama (TDM), kanal kullanıcılarını farklı kod dizileri ile ayıran yöntem ise kod bölmeli çoklama (CDM), şeklinde sıralanmaktadır. FDM yönteminde bant genişliği alt taşıyıcılar için ayrı ayrı bölümlendiğinden, farklı sinyaller birbirleriyle etkileşime girmeden taşınabilmektedir fakat bölümlenerek oluşturulan frekans bantları tek bir taşıyıcıya atandığından, kanalın verimli bir şekilde kullanılmasına engel olmaktadır. Buradaki verim sorununun ortadan kaldırılması için dikgen frekans bölmeli çoklama olarak bilinen OFDM kavramı ortaya çıkmıştır. Bu kavramla, kanal içerisindeki alt

taşıyıcılar dikgen forma dönüştürülerek kullanılan bant genişliği azaltılarak, kanalın etkin bir şekilde kullanılması sağlanmıştır. Şekil 3.8’de OFDM ve FDM tekniklerinin bant genişliğini kullanım şekilleri görülmektedir (İrgan, 2019).



Şekil 3.8. OFDM ve FDM Frekans Aralığı Kullanım Şekli

PLC kanalı bölümlenmiş frekans aralığında, veri iletimi için K indisleriyle gösterilen alt taşıyıcılar dikgen şeklinde konumlandığında, bant genişliğinden tasarruf sağlayarak verimi artırmaktadır. Bu dikgen yapının tam anlamıyla sağlanamaması halinde veri taşıyan sinyallerin birbirleri arasında girişim oluşturarak, haberleşmenin bozulması riskinin ortaya çıkarmaları mümkündür.

OFDM tekniğinde PLC kanalında veri iletimi, dönüşüm işlemleriyle düşük hızda çalışan dikgen yapıya alt taşıyıcılara bölünerek paralel bir şemayla sağlanmaktadır. OFDM yönteminde, birbiriyle etkileşime girmeden çalışacak yüksek verimli dikgen yapıya alt taşıyıcıların oluşturulmasıyla ilgili matematiksel ifadeler aşağıdaki gösterilmektedir (Goyal, 2013).

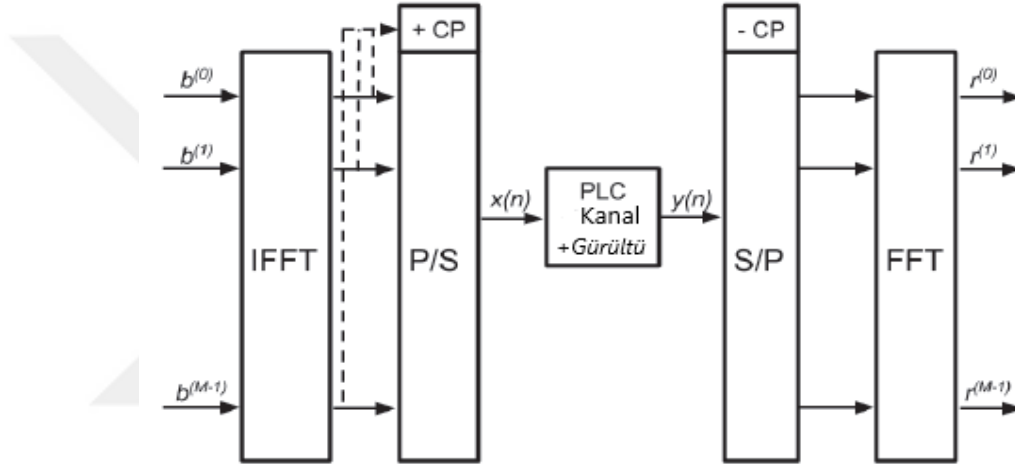
$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^{N_{SC}} c_{ki} s_k(t - iT_s) \quad (3.1)$$

$$s_k(t) = \prod (t) e^{j2\pi f_k t} \quad (3.2)$$

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq T_s \\ 0, & t \leq 0, t > T_s \end{cases} \quad (3.3)$$

Bu denklemlerde, c_{ki} , k . alt taşıyıcı için i . sembol bilgisini, s_k , k . alt taşıyıcı için dalga biçimini, N_{SC} , alt taşıyıcı sayısını, f_k , k . alt taşıyıcının frekansını, T_s , sembol periyodunu, $\Pi(t)$, darbe şekillendirme işlevini ifade etmektedir.

Şekil 3.9’da OFDM yönteminin çalışma ilkesini gösteren temel blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.9. OFDM Blok Şeması

OFDM’de iletilecek veri, IFFT dönüşümüyle modüle edilerek alt sembollere ayrılır ve bunlara dikgen yapının sağlanması amacıyla çevrimsel ön ek (CP) koyularak paralel veri akışıyla $x(n)$ sinyali şeklinde PLC kanalına iletilir ve böylece iletim işlemi tamamlanmış olur. PLC kanalı çıkışında $y(n)$ olarak alınan sinyalden çevrimsel ön ek çıkarılarak, paralel veri akışı sonrası, FFT dönüşümüyle verinin demodülasyonu gerçekleştirilir ve böylece verinin alınma işlemi sonlanmış olur.

OFDM tekniği bu çalışma şekliyle kullanımda birtakım faydalar ve mahsurlar ortaya çıkarmaktadır. Faydaları; kanal bant genişliğini verimli kullanması, NB-PLC kanalındaki girişimlere karşı sağlam yapılı olması, zaman eşleme hatalarına karşı düşük hassasiyet göstermesi, IFFT ve FFT işlemlerinin etkin bir şekilde uygulanabilmesi, çok yönlü yayılma sebepli sönmülemelere karşı sağlam yapılı olması şeklinde sıralanmaktadır. Mahsurları ise; frekans eş zamanlama sorunları ve faz

gürültülerine karşı hassas olması olarak sıralanmaktadır. Tüm bu çalışma yapısıyla beraber OFDM, özellikle faz kaydırmalı anahtarlama yöntemleriyle, NB-PLC AMR uygulamalarında en çok kullanılan teknik olarak bilinmektedir (Ndjiongue and Ferreira, 2019).

Bu doğrultuda bu tez çalışmasında yöntem olarak OFDM tabanlı ve PSK modülasyon türlü yapılar kullanılarak araştırmalar yapılmıştır.

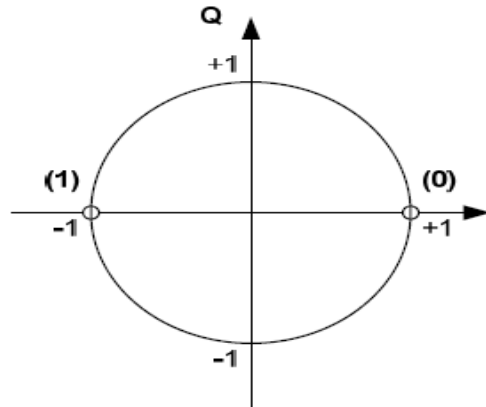
3.5.2. BPSK

İkili faz kaydırmalı anahtarlama yöntemi olarak bilinen, BPSK modülasyon türünde, taşıyıcının 0° ve 180° (π radyan) faz açısı değeri, “0” ve “1” olmak üzere ikili sistemdeki işaretlerle ilişkili olarak kaydırılır. Aşağıdaki denklemlerden görüleceği üzere $0 < t < T_s$ zaman aralığında gerçekleştirilen veri iletim işleminde, “0” biti için 0° faz açılı $S_0(t)$ taşıyıcısı, “1” biti için 180° kaydırılmış faz açılı $S_1(t)$ taşıyıcısı oluşturulmuştur.

$$S_0(t) = A \sin(2\pi f_c + 0^\circ) \quad (3.4)$$

$$S_1(t) = A \sin(2\pi f_c + 180^\circ) \quad (3.5)$$

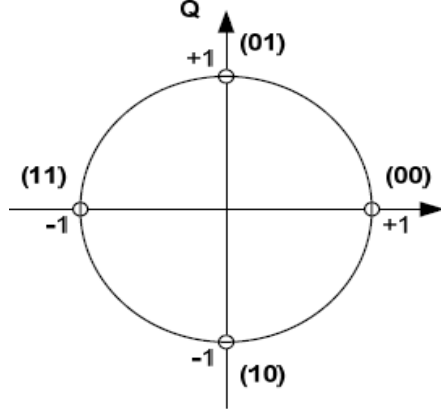
Yukarıdaki denklem 3.4 ve 3.5’te, A genlik bilgisini, f_c taşıyıcı frekansdır. 0° ve 180° faz kaymalarını ifade eden açı değerleridir. Bu denklemlerden de görüldüğü üzere BPSK modülasyon türü ikili sembol değerlerine göre modülasyon sinyalini 180° (π radyan) faz farkıyla üretmektedir. Şekil 3.10’da BPSK modülasyon türü çalışma diyagramı görülmektedir. Buna göre giriş biti “0” olduğunda çıkış fazı 0° , giriş biti “1” olduğunda ise çıkış fazı 180° (π radyan) şeklinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.10. BPSK Modülasyon Diyagramı

3.5.3. QPSK

Dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama olarak bilinen QPSK modülasyon türünde, “0” ve “1” şeklinde 2 bit değeri dört farklı faz açısı için kaydırmalı olarak kodlanmaktadır. Şekil 3.11’de bu durum görülmektedir.

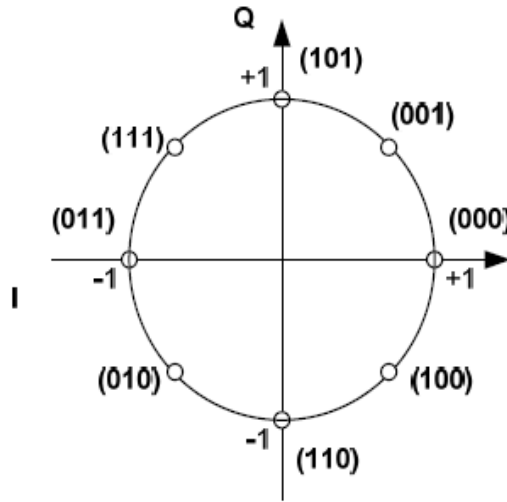


Şekil 3.11. QPSK Modülasyon Diyagramı

0° , 90° ($\pi/2$), 180° (π) ve 270° ($3\pi/2$) faz açıları için sırasıyla, “00”, “01”, “11”, “10” değerleri gösterilmektedir.

3.5.4. 8PSK

Sekizli faz kaydırmalı anahtarlama olarak bilinen 8PSK modülasyon türünde, ikili sistemde oluşturulan 3 bit değeri sekiz farklı faz açısı için kaydırmalı olarak kodlanmaktadır. Şekil 3.12’de bu durum görülmektedir.



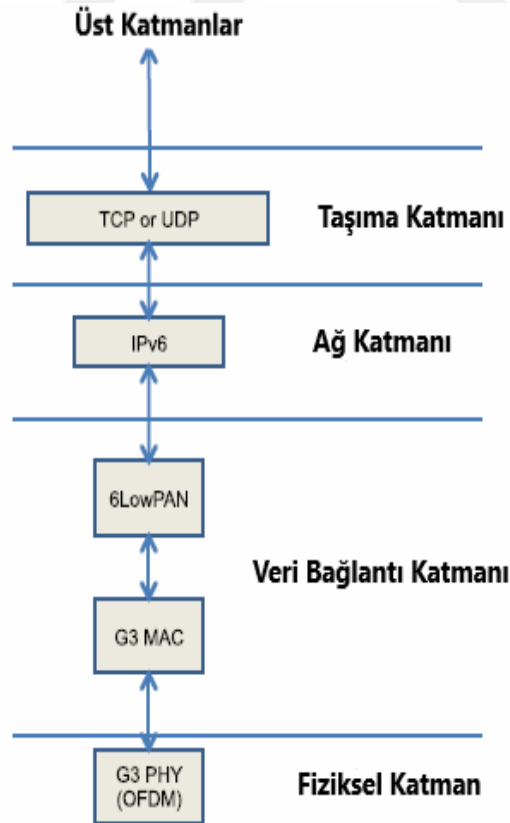
Şekil 3.12. 8PSK Modülasyon Diyagramı

0° , 45° ($\pi/4$), 90° ($\pi/2$), 135° ($3\pi/4$), 180° (π), 225° ($5\pi/4$), 270° ($3\pi/2$) ve 315° ($7\pi/4$) faz açıları için sırasıyla, “000”, “001”, “101”, “111”, “011”, “010”, “110”, “100” değerleri gösterilmektedir (CENELEC, 2011).

3.6. G3-PLC Standardı ve Özellikleri

G3-PLC ilk olarak 2009 Ağustos ayında, ERDF olarak bilinen Fransa elektrik dağıtım şebekesi yönetimi için, AMR, AMI ve diğer akıllı şebeke uygulamalarının haberleşme gereksinimlerini karşılamak amacıyla açık protokol olarak ortaya çıkarılmıştır. Sonrasında 2011 yılında ERDF liderliğinde, başta ölçümleme ürünleri konusunda dünya genelinde başarılı şirketler olmak üzere on iki adet şirketin katılımıyla G3-PLC birliği kurulmuş ve mevcut protokol bu birliğin katkılarıyla düzenlenerek geliştirilmiştir. 2012 Kasım ayında ise G3-PLC, Uluslararası Telekomünikasyon birliği tarafından “ITU-T G.9903” adı ve “NB-OFDM-PLC Vericisi-Alıcısı” açıklamasıyla standartlaştırılmıştır.

G3-PLC standardı Şekil 3.13'te gösterildiği üzere genel olarak; fiziksel katman, veri bağlantı katmanı, ağ katmanı ve taşıma katmanı şeklindeki bölümlerden oluşmaktadır.

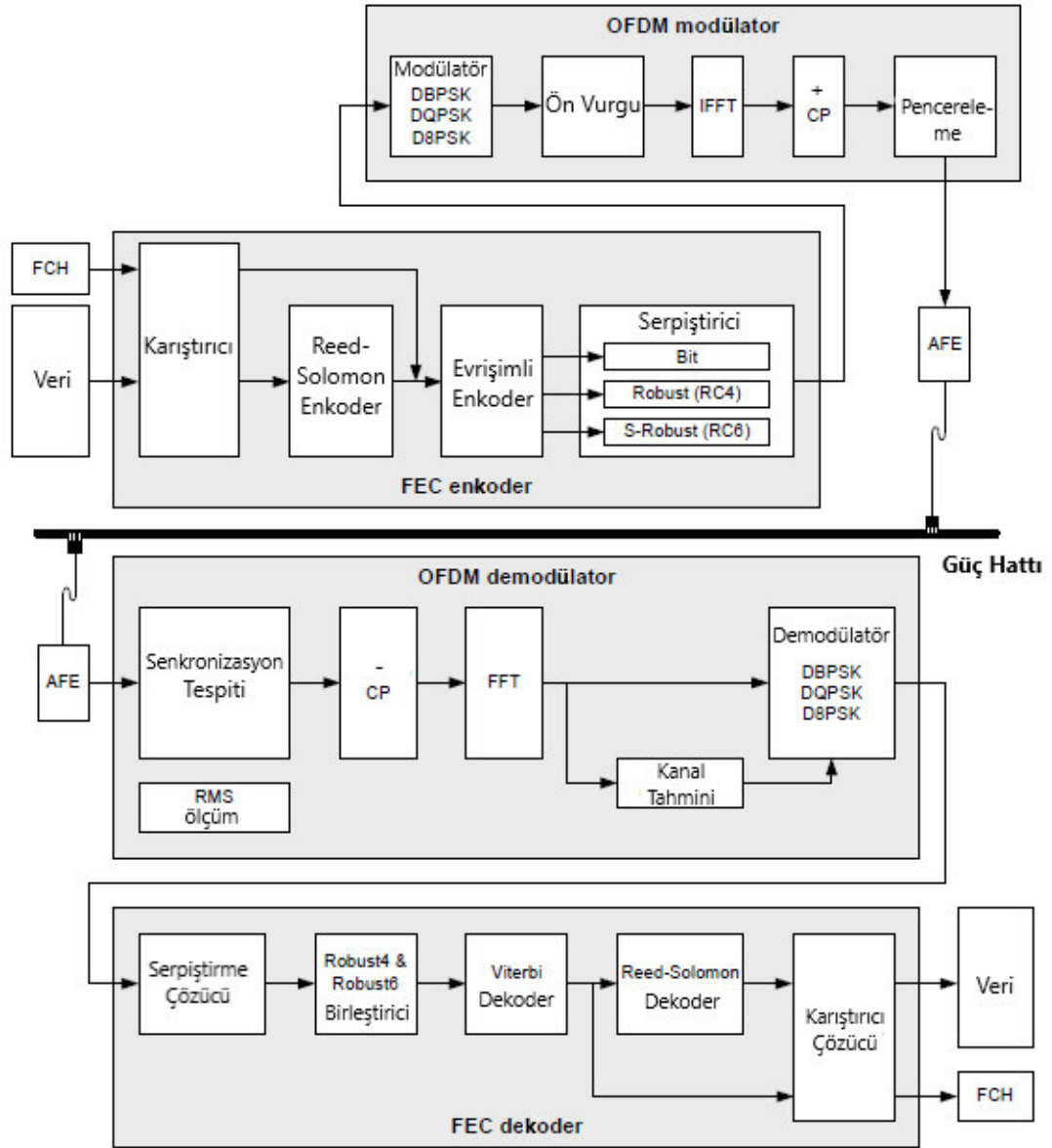


Şekil 3.13. G3-PLC Standardı Katmanları

Fiziksel katmanda (PHY), G3-PLC standardının, OFDM tekniği işlem adımlarıyla, G3-PLC'ye özgü işlem adımları beraber yer almaktadır. Bu sebepten PHY, G3-PLC standardının tanımlandığı ve yürütülme yapısının bulunduğu en önemli katmandır. Bu doğrultuda bu tez çalışmasında G3-PLC-PHY katmanında çalışmalar yürütülmüştür. Veri bağlantı katmanında alt katman şeklinde bulunan medya erişim denetimi (MAC) alt katmanı, haberleşmenin yapıldığı PLC kanalını kullanarak MAC paketlerinin iletimine izin verir, üst katmanlara iletimin, pozitif ya da negatif gerçekleştiği bildirimini yaparak doğrulama denetimi sağlar ve düğüm noktaları ilişkilendirmesiyle haberleşen noktalar arasında ağ yapısının kurulmasını sağlar. Bu detay özellikleriyle MAC katmanı ön plana çıkmaktadır. Ağ ve taşıma katmanı olarak bilinen katmanlar, adaptasyon katmanları olarak adlandırılırlar ve düşük güç tüketimli, kabul görmüş protokol yapılarıyla haberleşmenin AG ve OG elektrik şebekesinde güvenli şekilde tamamlanmasına yardımcı olurlar (Lampe, et al., 2016).

G3-PLC, OFDM yapılı fiziksel katmanı özellikleriyle sınırlı bant genişliklerini verimli şekilde kullanmaktadır. G3-PLC standardı, NB-PLC bant genişlikleri olan CENELEC, FCC ve ARIB yapılarında belirli frekans aralıklarında yerini almıştır. Buna göre, CENELEC-A (35,938 kHz – 90,625 kHz), FCC-1 (154,687 kHz – 487,5 kHz) ve ARIB (154,7 kHz – 403,1 kHz) aralıkları G3-PLC tarafından kullanılmaktadır.

OFDM tabanlı G3-PLC standardı, diferansiyel olarak kodlanmış faz kaydırmalı modülasyon şekilleriyle, daha önceki bölümde açıklanan OFDM yöntemi işlem adımları çerçevesinde, sinyalin alt taşıyıcılarla iletimini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra G3-PLC, ileri hata düzeltme (Forward Error Correction-FEC) bloğunda bulunan, karıştırıcı, serpiştirici, evrişimli ve Reed-Solomon alt bloklarıyla, alıcı ve verici noktalar arasındaki haberleşmeyi daha güçlü hale getirerek, gürültülerin neden olduğu hataları ve bit akışındaki hataları temizleyip, alıcı tarafta kayıp bitlerin kurtarılmasını sağlamaktadır (Başayar, 2019). Elektrik şebekesi gibi haberleşme amacıyla tasarlanmamış bir ortamda veri iletimi için G3-PLC'nin haberleşmeyi kuvvetlendirici bu yapısı fayda sağlamaktadır. Şekil 3.14'te G3-PLC standardında, verici ve alıcı noktalar arasındaki yapıyı anlatan diyagram görülmektedir.



Şekil 3.14. G3-PLC Standardı Verici-Alıcı Blok Diyagramı

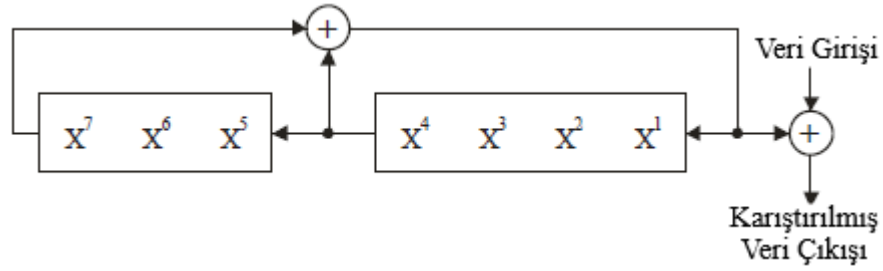
Analog ön uç olarak bilinen AFE üzerinden, verici ve alıcı taraflar güç hattına bağlanmaktadır. FEC enkoder kısmında görülen veriyle beraber karıştırıcı bloğa bilgi sağlayan FCH, her PHY veri çerçevesinin başlangıcında iletilen bir veri yapısıdır ve mevcut veri çerçevesi ile ilgili, ton haritası indeksi, veri uzunluğu gibi bilgileri içermektedir. Pencereleme işlemiyle iletimi gerçekleştiren sinyallerin bant aralığı dışına sızıntısı azaltılır. Ön vurgu bloğuyla gönderilen sinyalin frekans şekillendirmesi için hazırlık yapılmaktadır.

Karıştırıcı bloğu verinin rastgele bir dağılımla iletilmesi için kullanılmaktadır. Bu rastgele dağılım “XOR” kapısı ve yinelenen PN öge dizisi kuramı yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Her bir FCH ve PHY süreci için karıştırıcı yeniden

başlatılmaktadır. Denklem 3.6’da karıştırıcı için oluşturulan polinomun matematiksel ifadesi görülmektedir.

$$S(x) = x_7 \oplus x_4 \oplus 1 \quad (3.6)$$

Şekil 3.15’de karıştırıcı yapısı gösterilmektedir. Üretilen polinoma göre çıkışta veri, karıştırılmış hal almaktadır.



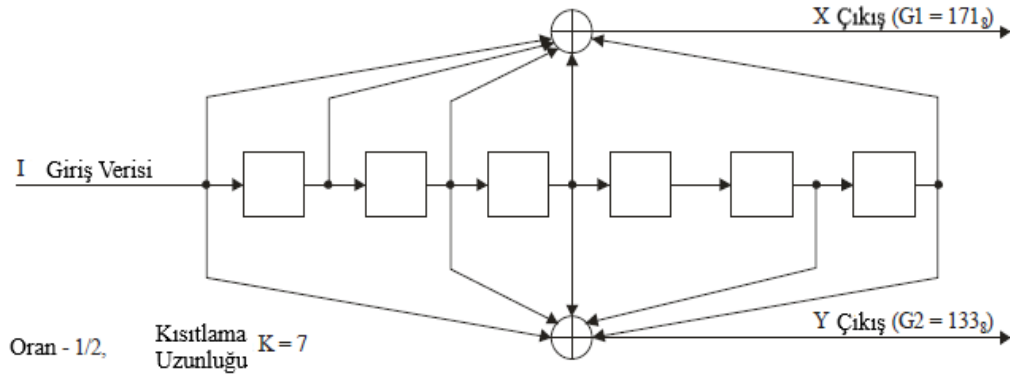
Şekil 3.15. Veri Karıştırıcı

Karıştırıcıdan çıkan veri Reed Solomon enkoder bloğuna gelir. Reed Solomon bloğu, kompleks yapının düzenlenmesine ve hatalı bitlerin sonlu alan kuramı olarak bilinen Galois Alanı (GF) aritmetiğine göre optimize edilmesine yardımcı olur. Tablo 3.2’de, N iletilen toplam sembol sayısı, K veri sembollerinin sayısı, T düzeltilebilir sembol hatalarının sayısı olmak üzere GF (2⁸) kodlamasına göre Reed Solomon bloğun çalışma yapısı görülmektedir.

Tablo 3.2. Reed Solomon Blok Yapısı

Mod	Sembol Dağılımı	Kod Yapısı
Normal	RS - (N = 255, K = 239, T = 8)	GF
Sağlam	RS - (N = 255, K = 247, T = 4)	GF

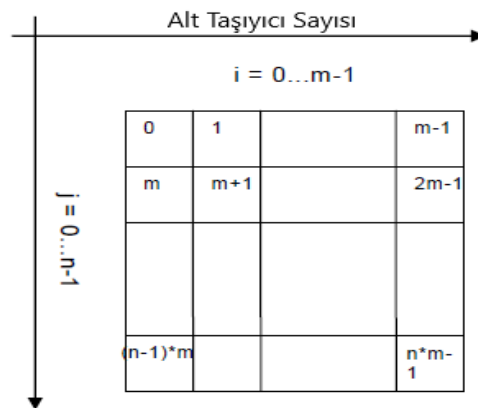
Evrişimli kodlayıcı, Reed Solomon bloğunun çıkışındaki bit akışını standart oran 1/2 ve K kısıtlama uzunluğu 7 olacak şekilde kodlamıştır. Çıkış verileri bağlantıları, x=0b1111001 ve y=0b1011011 biçiminde tanımlı olmak üzere Şekil 3.16’da görülmektedir.



Şekil 3.16. Evrişimli Kodlayıcı

Evrişimli kodlayıcıya son veri biti alındığında, evrişimli kodlayıcı, kendini "sıfır durumuna" döndürmek için gereken altı kuyruk biti ekler. Bu, evrişimli kod çözücü tarafında hata olasılığını iyileştirir, bu da kod çözme sırasında gelecekteki bitlere dayanır. Kuyruk bitleri altı sıfır olarak tanımlanır.

Serpiştirici bloğu, bazı ardışık OFDM sembollerinin bozulmasına sebep olabilecek patlama hatası ve fazla sayıda OFDM sembolü için, bitişik yapıyı frekansı bozan derin frekans sönümlemesine karşı koyarak veri iletimine koruma sağlamaktadır. Bu iki hata durumunu aynı anda engelleyip koruma sağlamak için serpiştirme işlemi iki adımda yürütülür. İlk adımda, her sütun dairesel olarak farklı sayıda kaydırılır. Bu nedenle, bozuk bir OFDM sembolü farklı sembollere yayılır. İkinci adımda ise her satır farklı bir sayıda dairesel olarak kaydırılır, bu da derin bir frekansın tüm sütunu bozmasını engeller. Dairesel kaymaların miktarı, her OFDM sembolündeki (m) alt taşıyıcıların sayısının yanı sıra her serpiştirme bloğundaki (n) OFDM sembollerinin sayısına bağlı olarak seçilen m_i , m_j , n_i ve n_j parametreleri tarafından belirlenir. Şekil 3.17’de serpiştirici içerisine satır satır yerleştirilmiş bitlerin durumu görülmektedir.



Şekil 3.17. Serpiştirici

Serpiştirici bloğunda alt blok olarak görülen Robo ve süper Robo modlar, veri iletimi işlemi esnasında oluşan olumsuz koşullar altında çalışmayı iyileştirmek için zaman ve frekans çeşitliliği sağlamaktadırlar. Robo modda, evrişimli kodlayıcının çıkışındaki her bit dört kez tekrarlanır ve ardından serpiştiriciye girdi olarak aktarılır. Örneğin giriş bitleri “0101” yapısında ise, her bir bit dört kez tekrarlanarak çıkışta “0000111100001111” yapısını alır. Süper Robo modda ise tekrarlama işlemi altı kez yapılır. Örneğin giriş bitleri “0101” yapısında ise altı kez tekrarlama sonucu çıkışta “000000111111000000111111” bit yapısı oluşturulur. Robo modlar, modülasyon şeması olarak “BPSK” modülasyon türünün şemasını kullanmaktadırlar (ITU-T, 2017). G3-PLC standardının önemli özelliklerinden olan “Robo mod” farklı bir modülasyon türü olarak çalışmalara dahil edilerek etkisi araştırılmıştır.

G3-PLC standardı fiziksel katmanı için kullanılan modülasyon türlerine ait farklı frekans bantlarında beklenen maksimum veri hızı değerleri Tablo 3.3’te görülmektedir (Lampe, et al., 2016).

Tablo 3.3. G3-PLC Modülasyon Türleri Veri Hızları

FREKANS BANDI	ROBO (bps)	DBPSK (bps)	DQPSK (bps)	DSPSK (bps)
CENELEC A (36 kHz - 91 kHz)	4500	14640	29285	43928
FCC (150 kHz - 487,5 kHz)	21000	62287	124575	186683
FCC (10 kHz - 487,5 kHz)	38000	75152	150304	225457

AMR ve AMI işlemleri için dünya geneli kabul görmüş standartlardan bir tanesi de ITU-T G.9904 olarak bilinen PRIME standardıdır. G3-PLC standardı ile genel çerçevede kıyaslandığında, PRIME standardında, maksimum veri hızının 128,6 kbps değerlerine ulaşabildiği görülürken, FEC bloğunda Robo mod yapısının bulunmadığı görülmektedir. Bu doğrultuda PRIME, G3-PLC’ye göre daha az karmaşık yapıya sahip olarak nitelendirilirken; G3-PLC’nin PRIME standardına göre daha güçlü yapıya sahip olduğu ortaya konmuştur (Hoch, 2011).

Bu tez çalışmasında yöntem olarak NB-PLC, CENELEC A bandı, OFDM tabanlı G3-PLC standardı kullanılmıştır. Bu bölümde açıklanan G3-PLC standardı modülasyon türlerinin tamamı farklı şartlardaki deneyler için kullanılıp, kıyaslamaları oluşturulmuştur.

3.7. TMDSPCKITV4 Değerlendirme Bordu

Bu tez çalışmasında kullanılan materyallerden biri TI tarafından PLC geliştirmeleri ve analizleri için üretilmiş TMDSPCKITV4 değerlendirme bordudur. PLC teknolojisinin farklı şartlardaki çalışma durumları değerlendirilmesi için bu üründen Tx olarak ifade edilecek verici kısım için bir adet, Rx olarak ifade edilecek alıcı kısım için bir adet olmak üzere toplam iki adet kullanılmıştır. CENELEC A bandı G3-PLC standardı çalışmasını sağlayan G3-PLC programı iki borda da yüklenerek çalışmalar yürütülmüştür. Bu bordlar PLC kanalındaki alıcı ve verici noktalarda, verinin iletilmesi ve verinin alınması sağlayan birer modem gibi çalışmaktadırlar. TMDSPCKITV4 ürünü, donanımı ve beraberinde çalıştığı yazılımlar olmak üzere iki genel başlıkta değerlendirmek mümkündür. Şekil 3.18’de TMDSPCKITV4 ürününün genel yapısı görülmektedir.

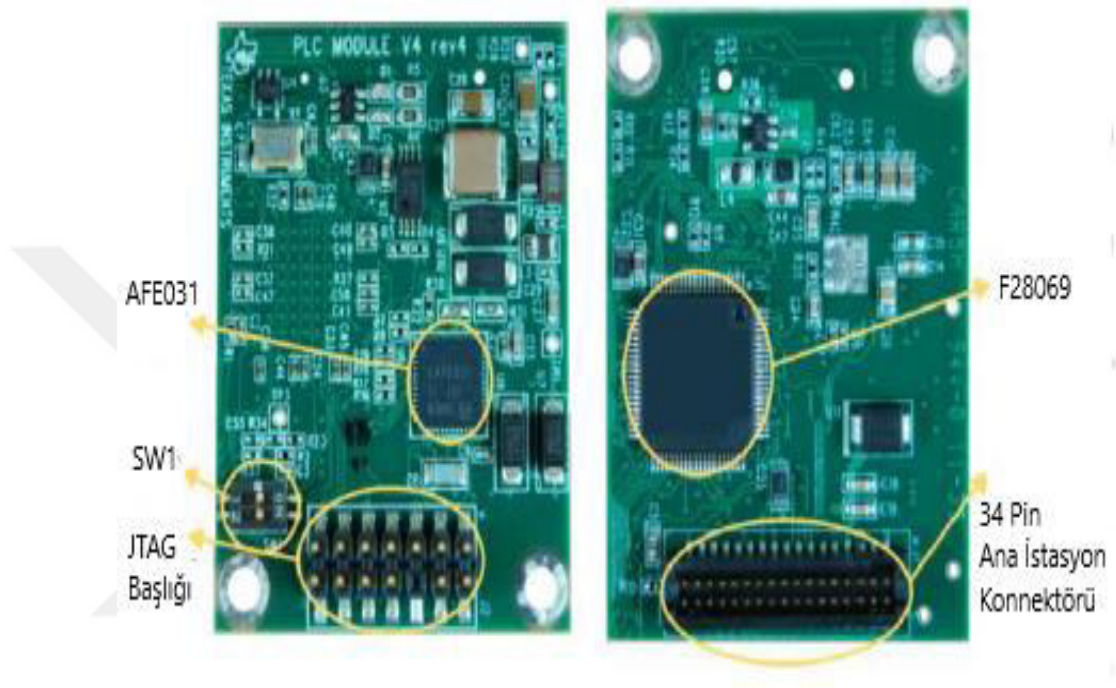


Şekil 3.18. TMDSPCKITV4 Genel Görünüş

3.7.1. Donanımsal Özellikler

TMDSPCKITV4, CENELEC bandında, OFDM tabanlı G3-PLC standartları özelliklerinden, FEC enkoder ve dekoder blokları içerisinde olan, evrişimli, Reed Solomon, Robo modlar ve diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama gibi yapıları çalıştırabilecek donanımsal özelliklere sahiptir. Bunun yanı sıra veri portu için seri arayüz UART, programlama için USB ve JTAG yapılarını içermektedir. TMDSPCKITV4 bordu donanımsal olarak iki ana parçadan oluşmaktadır. Bunlardan biri PLC modül, diğeri ise PLC modülün konumlandığı yerleştirme istasyonudur. Bu iki ana parça beraber çalışarak TMDSPCKITV4 yapısını meydana getirmektedirler.

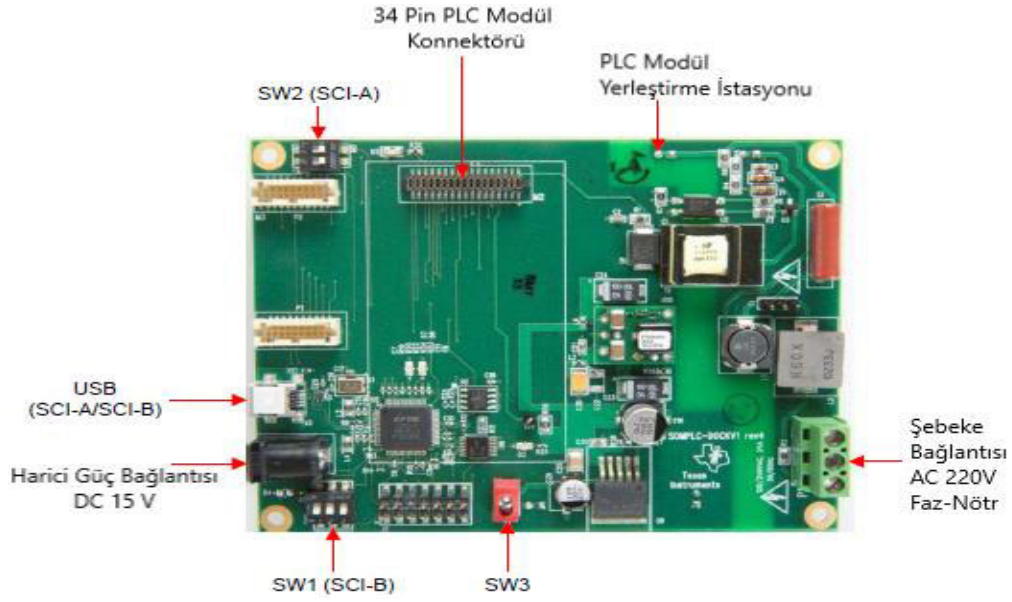
PLC modül olarak, TI tarafından üretilmiş F28PLC84 mikro denetleyicisi, analog ön uç olarak tanımlanan AFE031 ürünüyle beraber kullanılmaktadır. PLC modülün temel görevi TMDSPCKITV4 bordunun programlandığı PLC standardının ilgili frekans bandında çalışmasını sağlamaktadır Programlama işlemi PLC modül kısmına yapılmaktadır. Şekil 3.19’da F28PLC84 PLC modülünün ön ve arka yüzlerinin görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.19. PLC Modül Yapısı

SW1, önyükleme modu anahtarı olarak “on” pozisyonundadır. Bu konumdayken önyükleme yapılabilir. JTAG ile programlama için kullanılacak 14 pinli yapı gösterilmektedir. 34 pinli bağlantı ucuyla PLC modül, TMDSPCKITV4 bordunun diğer temel parçası olan ana yerleştirme istasyonuna bağlanmaktadır.

Ana yerleştirme istasyonu üzerinde, bağlantı devresi ve bordun güç kaynağı kısımlarını bulundurmaktadır. 34 pinli bağlantı ucuyla PLC modül ile irtibat kurmaktadır. Şekil 3.20’de ana yerleştirme istasyonu görülmektedir.

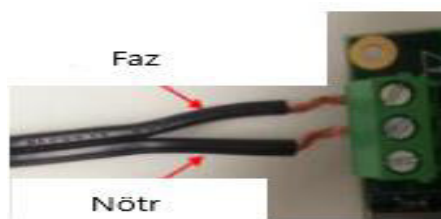


Şekil 3.20. Ana Yerleştirme İstasyonu

220V AC bağlantı klemensiyle haberleşme yapılacak güç hattına bağlanmaktadır. 15V bağlantı ucuyla TMDSPCKITV4 beslenmektedir. SW3 olarak gösterilen anahtar “off” konumundayken bordun beslemesi kesilmektedir. Noktadan noktaya haberleşmede TMDSPCKITV4 bordu için SCI-A portu aktiftir. Bundan dolayı SW2 anahtarı aktif konumdayken, SCI-B portunu temsil eden SW1 anahtarı pasif konumdadır. Mini USB portu üzerinden programların çalıştırıldığı bilgisayar ile bordun bağlantısı kurulmaktadır.

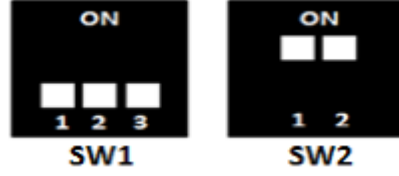
Noktadan noktaya haberleşme için Tx ve Rx taraflarda bulunan her bir TMDSPCKITV4 bordun değerlendirme ve geliştirme amacıyla bilgisayar üzerinden ilgili yazılımlarını çalıştırmadan önce yapılması gereken donanımsal işlem adımları ve anahtar pozisyonları şu şekilde sıralanmaktadır.

Birinci adımda ana yerleştirme istasyonu üzerindeki klemenslere, AG elektrik dağıtım şebekesinden gelecek olan AC 220V faz ve nötr giriş kablo bağlantıları yapılmalıdır. Şekil 3.21’de bu bağlantı görülmektedir.



Şekil 3.21. Faz-Nötr Klemens Bağlantıları

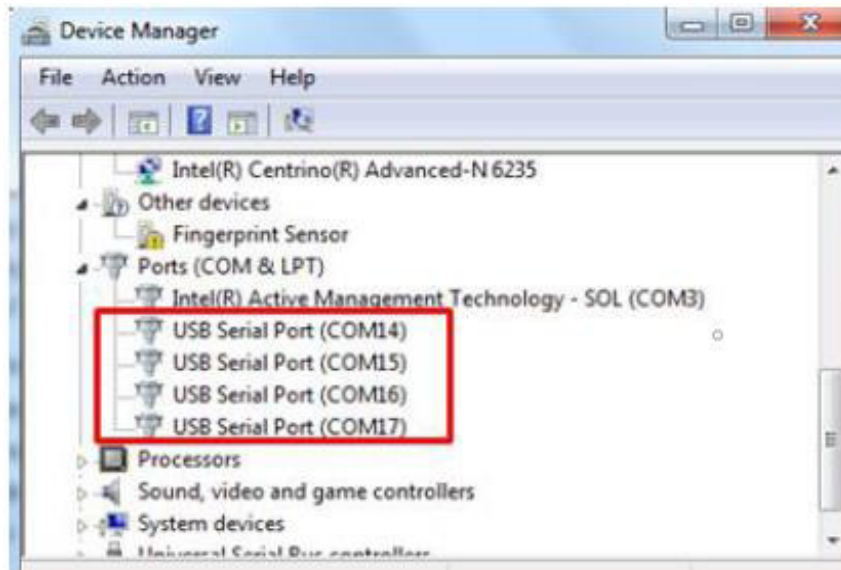
İkinci adımda, SCI-A portu üzerinden bordların beraber kullanılacakları bilgisayarla haberleşmesi için Tx ve Rx tarafındaki her iki bordun, ana yerleştirme istasyonları üzerinde bulunan “SW1” ve “SW2” anahtarlarının pozisyonları Şekil 3.22’deki gibi olmalıdır.



Şekil 3.22. Anahtar Konumları

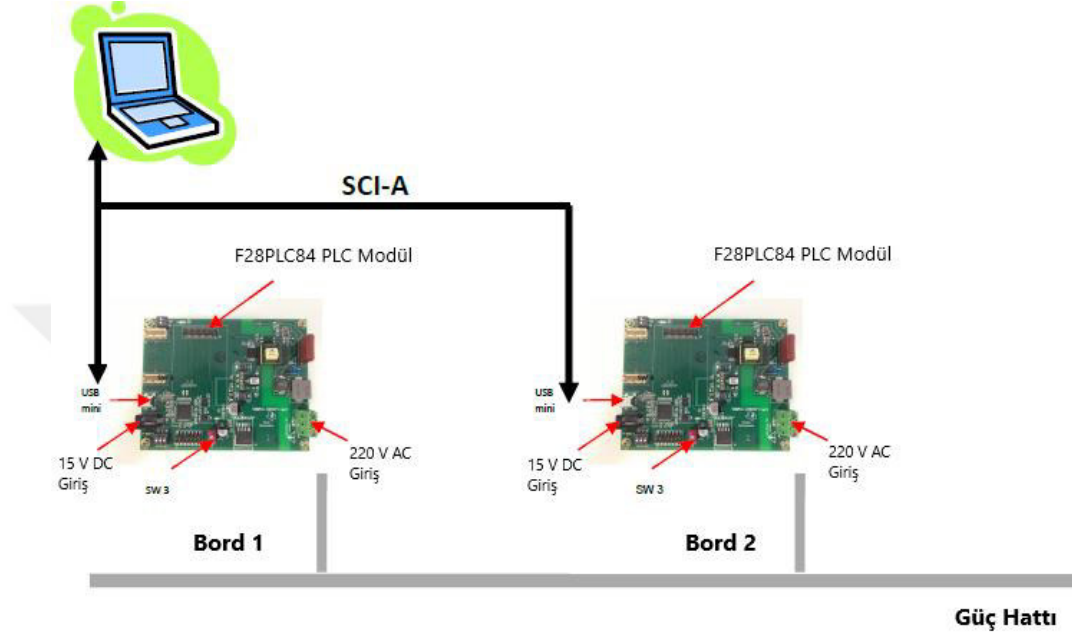
Üçüncü adımda ana yerleştirme istasyonları üzerinden harici 15V giriş sağlanarak bord beslemesi yapılmalıdır. Sonrasında ana yerleştirme istasyonu üzerinde bulunan “SW3” anahtarı bordların dışına bakacak konuma getirilerek TMDSPCKITV4 enerjilendirilmelidir.

Dördüncü adımda mini USB kablo bağlantısı ile Tx ve Rx taraflar için konumlandırılmış her iki bord bilgisayara bağlanmalıdır. Bordlarla bilgisayar arasında seri USB bağlantısının sağlanması için “XDS100” sürücüsünün bilgisayarda kurulu olması gerekmektedir. Tüm bağlantı ve kurulum işlemleri sonrasında, bilgisayar cihaz yöneticisi üzerinden bordların kullanımı için seri portların hazır olduğu denetlenmelidir. Şekil 3.23’te iki bord için atanmış dört adet seri port bilgisayar üzerinde görülmektedir.



Şekil 3.23. USB Seri Portlar

Bu dört adımın yürütülmesiyle beraber TMDSPCKITV4 bordların ilgili yazılımlarıyla beraber çalıştırılması için donanımsal tüm işlemler tamamlanmış olacaktır. Şekil 3.24’te bordların bilgisayar üzerindeki yazılımlarıyla beraber çalıştırılarak gerekli değerlendirme ve programlama işlemlerine hazır hali görülmektedir.



Şekil 3.24.TMDSPCKITV4 Donanım Kurulumu

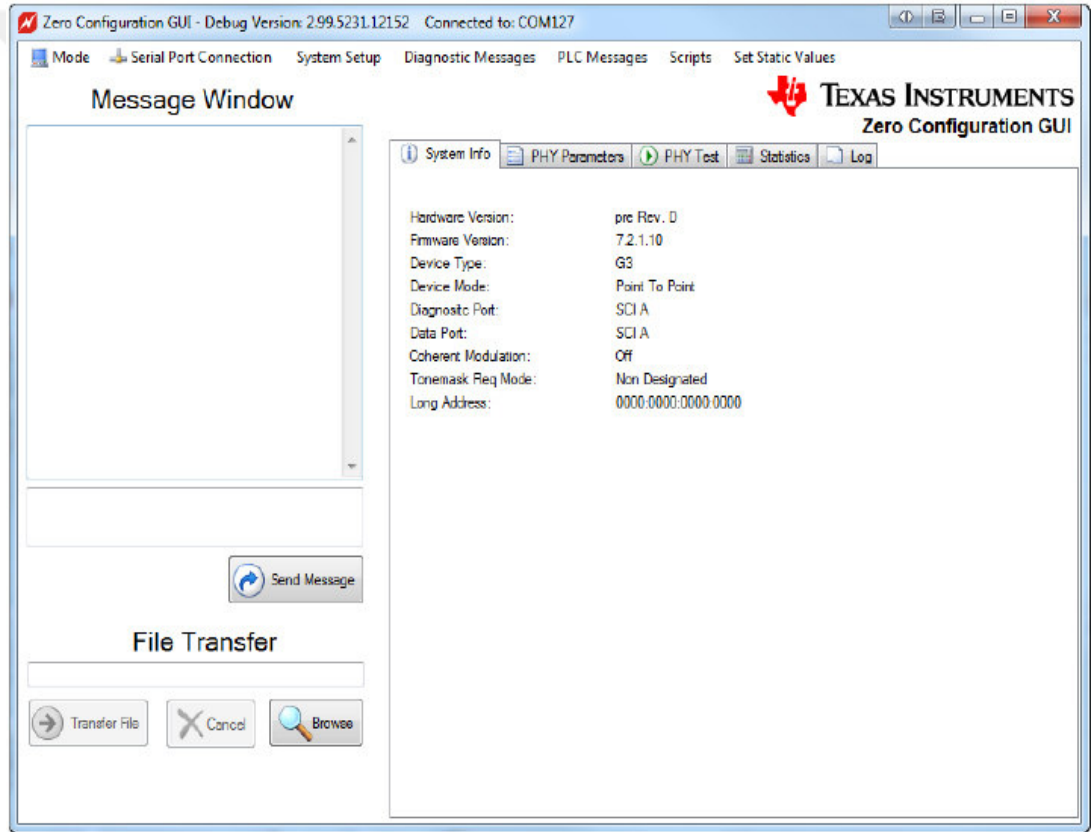
Tek bir bilgisayara iki adet bord bağlanabileceği gibi her bir bord farklı bir bilgisayara bağlanarak çalıştırılabilmektedir. Seri portların çakışması gibi durumların önüne geçilmesi için bu çalışmada her bir bord için bir adet bilgisayar kullanılmıştır. Bir başka dikkat edilmesi gereken nokta TI TMDSPCKITV4 ürününün donanımsal ve yazılımsal özelliklerinden dolayı çalışma yapılacak bilgisayarın işletim sistemi dilinin İngilizce olması zorunluluğudur (TI, 2014), (TI, 2015a).

3.7.2. Yazılımsal Özellikler

TMDSPCKITV4 borduyla beraber kullanılan programlar iki ana grupta toplanmaktadır. Bu gruplardan biri bord programlandıktan sonra kullanılan ZCG olarak adlandırılacak “Zero Configuration Gui” ve IM olarak adlandırılacak “Intermediate Mode” programlarından oluşmaktadır. Diğer grup ise borda, istenilen PLC standardına ait programın veya geliştirilen bir PLC programının yüklenilmesi için kullanılan ara programlardır. Bu ara programlar, CCS olarak adlandırılan “Code Composer Studio”, C2 olarak adlandırılan “Code Skin” ve IM içerisinde bulunan

“Programlama Modu” şeklinde sıralanmaktadır. Öncelikli olarak farklı şartlar için Tx ve Rx tarafında gerekli konfigürasyonlar oluşturularak kullanılan PLC kanalı ve modülasyon türlerine ait sonuçların elde edildiği ZCG ve IM programları ele alınmıştır. Sonrasında ise ara programlar kullanımına değinilmiştir.

ZCG, PLC modem olarak kullanılan TMDSPLCKITV4 bordun, mesajlaşma şeklinde metin alma ve gönderme, farklı formatlarda dosya iletimi, PHY parametrelerini görüntülüne, PHY modülasyon türünü değiştirme, mevcut kullanılan sistem bilgilerini görüntüleme, istatistikleri ve uygulama sonucu oluşan bilgileri görüntüleyip kaydetme, işlemlerine olanak sağlayan TI ürünü bir programdır. Şekil 3.25’de ana ekranı görülmektedir.

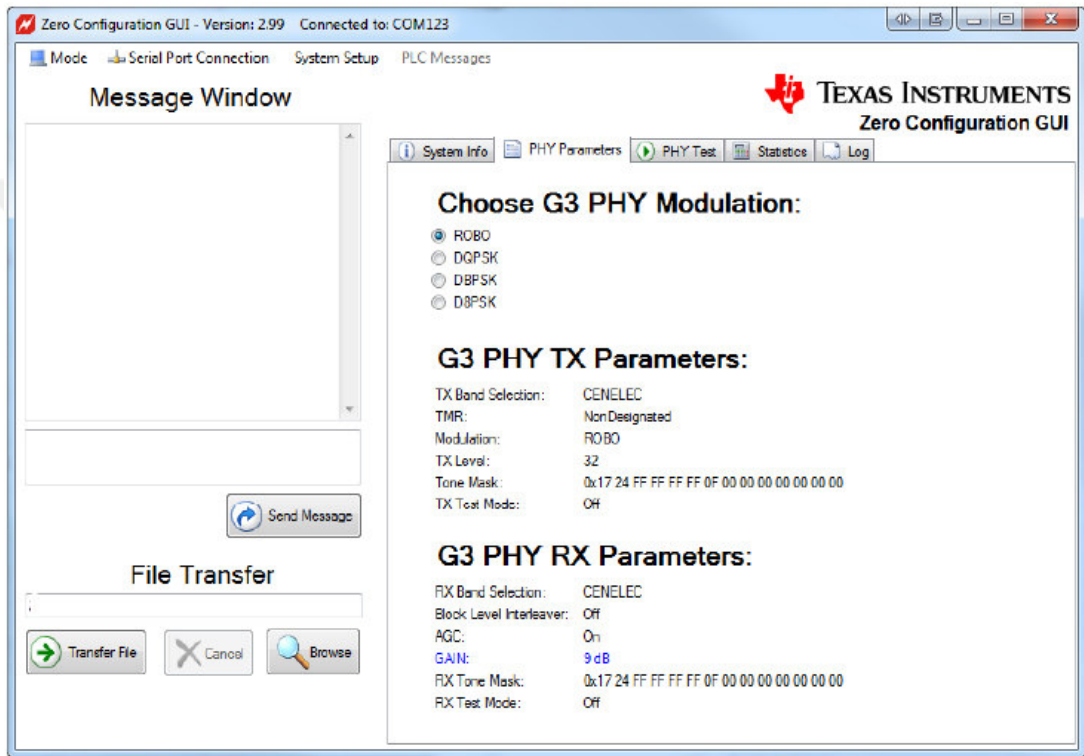


Şekil 3.25. ZCG Ana Ekran

ZCG üzerinden ayarlanan en önemli parametrelerden biri port türüdür. TMDSPLCKITV4 ilgili dokümanları içerisinde noktadan noktaya haberleşme için kullanılan port türü SCI-A portudur. İlk ekran açılışında gelen SCI-B portu, birbiriyle haberleşen tüm bordlar için SCI-A olarak değiştirilmelidir. Bu durumun sağlanmaması durumunda Tx ve Rx noktaları arasında yürütülecek işlemler için hata uyarı ekranları

çıkacaktır. Bunun yanı sıra bir önceki bölümde anlatılan donanım işlem adımlarında hata olması durumunda ZCG ekranı bord bulunamadı uyarısıyla hiç açılmayacaktır.

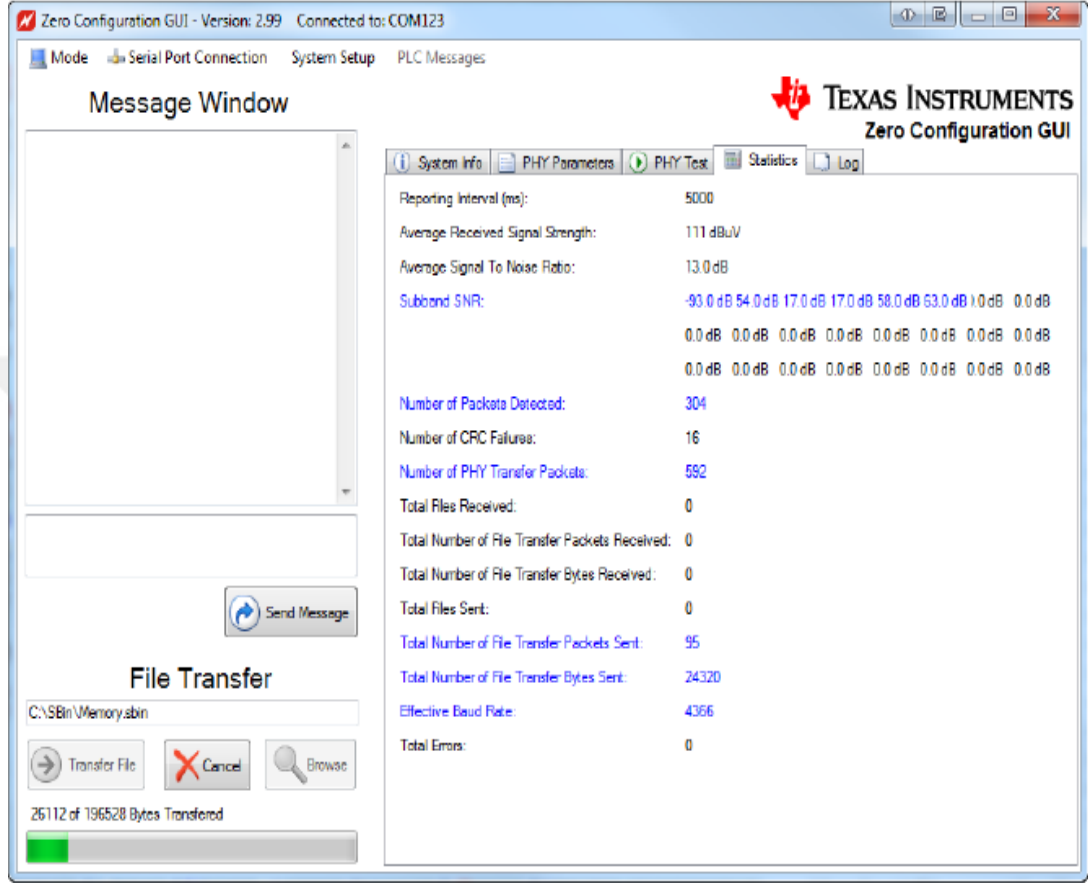
Ana ekranda görülen PHY parametreleri sekmesinden, Tx ve Rx olarak konumlandırılmış bordların modülasyon türleri değiştirilebilmektedir. Mevcut kullanılan sistem bilgileri Tx ve Rx tarafları için ayrı ayrı görülebilmektedir. Şekil 3.26'da G3-PLC standardı ile programlanmış bir TMDSPCKITV4 bordun PHY parametreleri sekmesinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.26. ZCG PHY Parametreleri

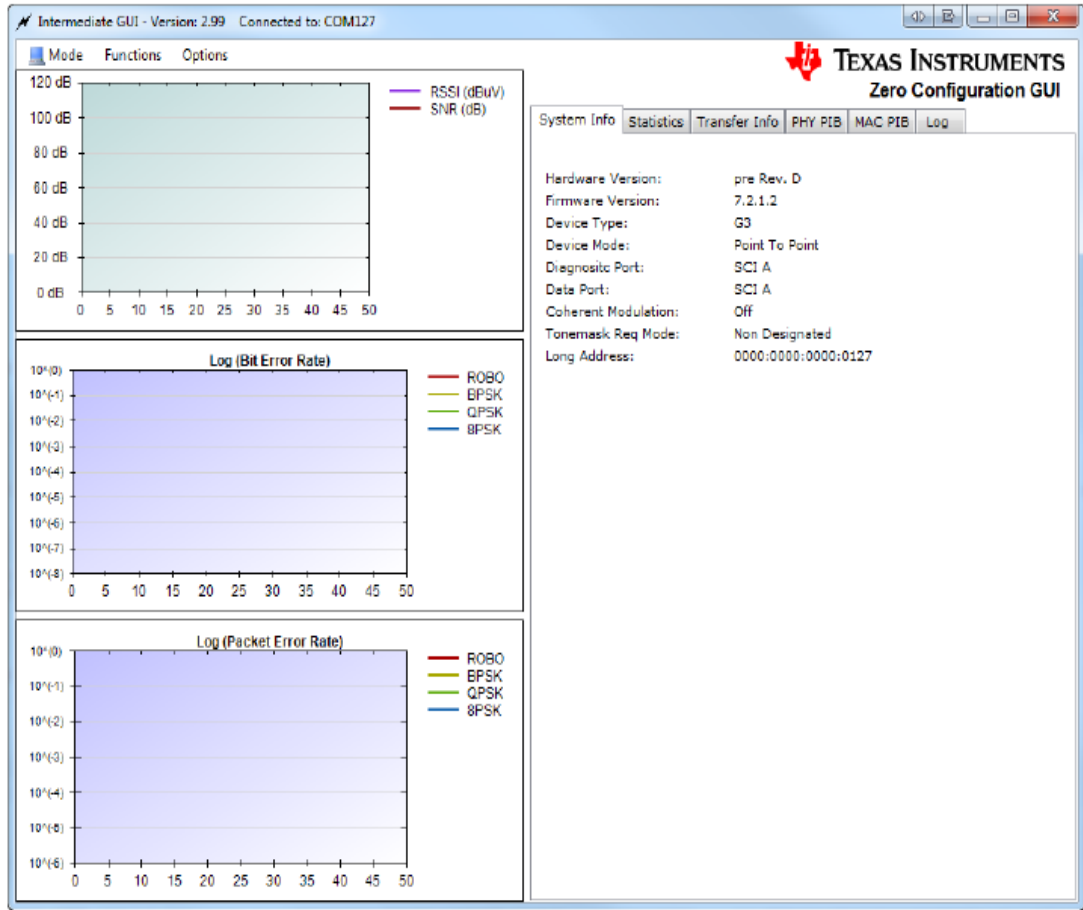
İstatistik sekmesinde, ZCG üzerinden dosya iletimi boyunca PLC haberleşme durumunu anlatan, ortalama SNR, alt band SNR, RSSI, gönderilen ve alınan paket sayısı, byte sayısı, hata sayısı gibi kritik değerler belirli zaman aralığında yenilenerek görülmektedir. Tx ve Rx noktalar arasında dosya iletimi tamamlandığında ise bu verilerin son hali elde edilerek kaydedilebilmektedir. Şekil 3.27'de Tx tarafında modem görevi gören TMDSPCKITV4 bordun dosya iletimi esnasındaki ZCG istatistik sekmesi durumu görülmektedir. PHY test sekmesinde Tx ve Rx taraf seçilerek basit bir test başlatarak genel denetim olanağı elde etmek mümkündür. Log sekmesinde bordların ZCG üzerinden çalışmaya başlamasından veri gönderimi alımı işleminin sonuna kadar oluşan tüm aksiyonlar zaman damgasıyla görülmektedir.

Dosya iletimi bölümünün üst kısmında görülen mesajlaşma penceresinden gönderilen metinler iki bord arasında PLC haberleşmesi sağlıklı ise Tx tarafında mesaj gönderildi, Rx tarafında mesaj alındı şeklinde zaman bilgisiyle ZCG mesaj panelleri üzerinde görülmektedir.



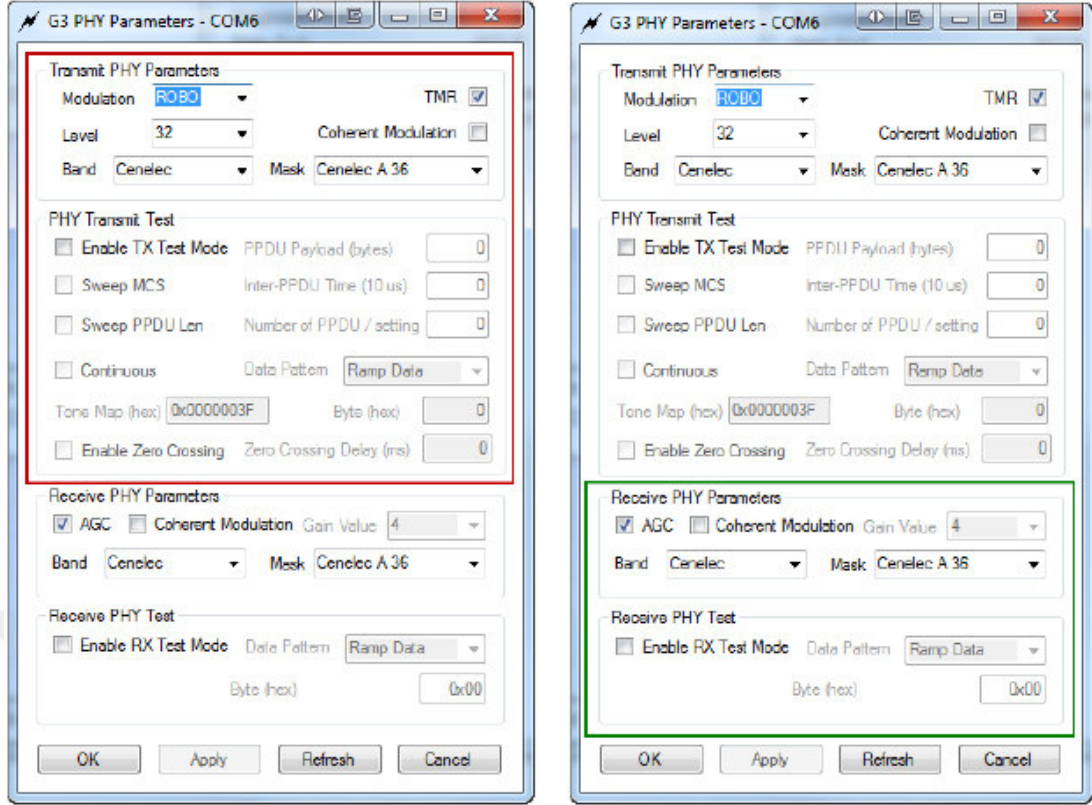
Şekil 3.27. ZCG İstatistik Paneli

IM programı, ZCG içerisinde ayrı bir ara yüz olarak konumlanmıştır. ZCG üzerinden erişilebileceği gibi ayrı şekilde de çalıştırılabilir. IM üzerinden, mevcut sistem bilgilerini görüntüleme, dosya/mesaj gönderme, modülasyon türü değişikliği gibi ZCG ile yapılabilen işlemlerin bir çoğu yapılabilmektedir. IM ara yüzünü farklı kılan gelişmiş özellikleri, PLC kanalındaki haberleşme kalitesi temel parametreleri olan RSSI, SNR, BER, PER değerlerini, veri hızlarını, modülasyon türüne göre, belirli zaman aralığında grafiksel olarak göstermesidir. Bunun yanı sıra, IM ara yüzüyle, Tx ve Rx olarak TMDSPCKITV4 bordların çalışma şekilleri belirlenerek bu iki nokta arasında gönderilecek veri paketlerinin sayısı, bu veri paketlerinin gönderilme zaman aralığı ve veri paketlerinin boyutları düzenlenebilmektedir. Şekil 3.28’de G3-PLC standardı ile programlanmış borda ait IM kullanıcı ara yüzü ana ekranı görülmektedir.



Şekil 3.28. IM Kullanıcı Ara Yüzü Ana Ekranı

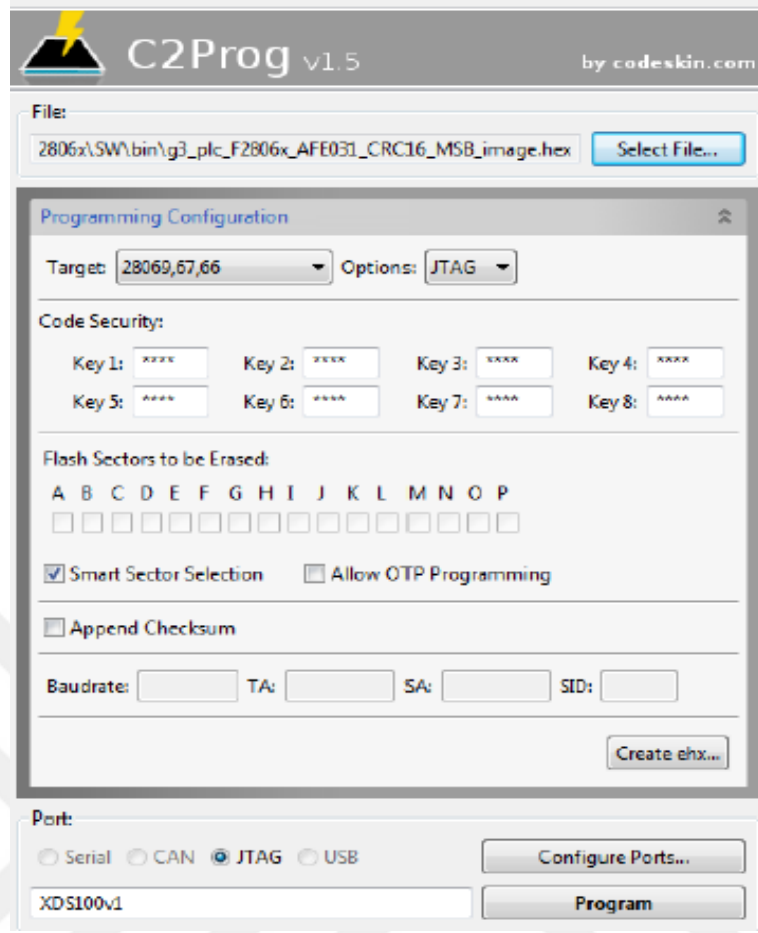
IM programıyla PHY parametrelerinin konfigürasyonu yapılabilmektedir. Bu düzenlemelerle birlikte, IM ara yüzüyle, TMDSPCKITV4 bordları, Tx ve Rx çalışma şeklinde ayarlanarak, kullanılan güç hattının PLC uygunluğu test edilebilmektedir. PHY protokolü veri birimi (PPDU) parametreleri (veri boyutu, veri gönderme zaman aralığı, veri paketi sayısı) Tx olarak konumlandırılmış bordun IM ara yüzünden ayarlanarak, Tx ve Rx arasında yapılacak test sonucu elde edilecek RSSI, SNR, BER ve PER grafikleriyle ve istatistik sekmesinden elde edilecek sonuçlarla PLC kanalının uygunluğu yorumlanabilecektir. Veri iletimini sağlayacak güçte RSSI, yüksek SNR, sıfıra yakın BER ve PER değerleri kullanılan güç hattının haberleşme için uygunluğunu ortaya koyacaktır. Şekil 3.29’da G3-PLC standardında çalışan bir bordun IM ara yüzü PHY parametreleri düzenleme ekranı görülmektedir. Modülasyon türleri, bordların Tx ve Rx seçimlerinin yapılması, bant türü seçimi gibi birçok testle ilgili parametre ayarı PHY test parametreleri ayarları bölümünden yapılabilmektedir. Bu ayarlama aracı sayesinde PHY katmanda farklı şartlarda PLC durumu analiz edilebilmektedir.



Şekil 3.29. IM Ara Yüzü PHY Parametreleri

Şekil 3.29’da kırmızı çerçevelenmiş yer, Tx olarak ayarlanacak borda ait değerleri göstermektedir. Tx test modu aktifleştirildiğinde, PPDU parametreleri ayarlanabilir hale gelecektir. Yeşil çerçeveli yer, Rx olarak ayarlanacak borda ait değerleri göstermektedir. Rx test modu yeşil çerçeveli yerde işaretlenerek PLC kanalı uygunluk testi başlatılabilir hale gelecektir. Bu ayarlamaların yanı sıra her iki borda ait çalışma frekans bandı ve modülasyon türlerinin de aynı olması gerekmektedir (TI, 2015b).

Yazılım açısından ele alınması gereken bir başka konu TMDSPCKITV4 geliştirme borduna, çalışma yapılacak standardın ya da geliştirilmiş PLC programının yüklenmesidir. Bu yükleme işi CCS, C2, IM programlama ara programlarından biri kullanılarak yapılmalıdır. Ara programa göre kullanılacak dosya uzantıları değişiklik göstermektedir. CCS ile yapılacak program yükleme için “.out” uzantısı, C2 kullanılarak yapılacak program yükleme için “.hex” uzantısı, IM programlamayla yapılacak yükleme için “.sbin” uzantısı kullanılmalıdır. Bunun yanı sıra bord üzerinde SW1 anahtarı programlamaya izin verecek “Flash Moda” getirilmelidir. Şekil 3.30’da G3-PLC standardı dosyasının, TMDSPCKITV4 borduna, C2 ara programıyla yüklendiği ekran görülmektedir (TI, 2015c).



Şekil 3.30. C2 Ara Programı

Bu çalışmada yöntem olarak, Tx ve Rx tarafında modem olarak kullanılan TMDSPLCKITV4 bordlar C2 ara programı kullanılarak, G3-PLC standardı ile programlanmıştır. Dosya iletimi, mesajlaşma ve port değişikliği uygulamaları ZCG üzerinden gerçekleştirilmiştir. IM, PHY test modu ve PPDU parametreleri kullanılarak farklı modülasyon türlerinde, PLC kanalına ait SNR, RSSI, BER ve PER grafikleri ve değerleri elde edilmiştir.

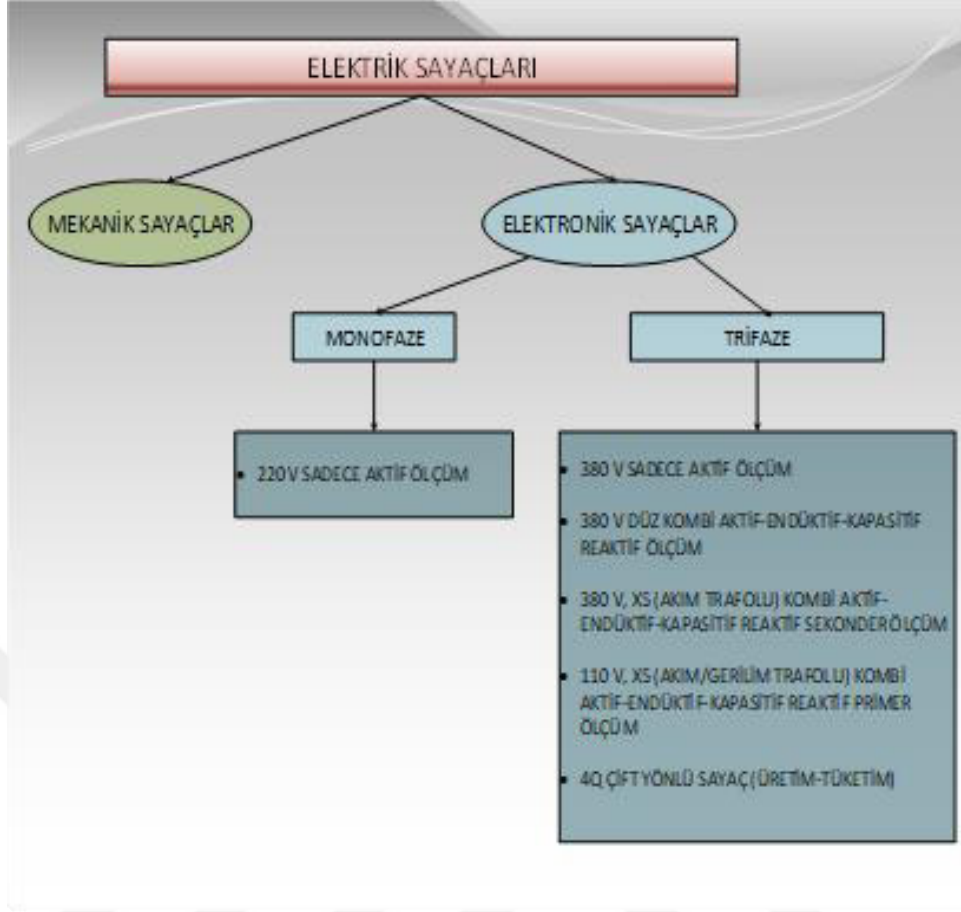
3.8. Akıllı Sayaç Okuma Sistem Yapısı

Akıllı sayaç sistemleri beş temel parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar elektrik sayacı, modem, haberleşme yöntemi, merkezi ana yazılım ve kullanıcı ara yüzüdür. Bu bölümler, saha, yazılım ve kullanıcı arasında belirli düzen ve zaman çerçevesinde, uzaktan veri alış verişi, uzaktan takip ve yönetim işlemlerini siber güvenliğe uygun şekilde yaparak akıllı sayaç okuma sistemlerini meydana getirmektedir.

Akıllı sayaçların gereksinimleri, rekabetçi piyasa şartlarına ve dünyanın çoğu bölgesindeki akıllı şebeke uygulamalarını zorunlu kılan çeşitli devletler

düzenlemelerine cevap olarak hızla gelişmektedir. Bugünlerde akıllı sayaçlarla yüksek veri iletişim hızları, doğru ölçümleme, sağlam ve güvenilir yapıyla işlemsel esneklik sağlanmaktadır. Bu durumlardan dolayı dünya genelinde milyonlarca mekanik sayaç, elektronik akıllı sayaçlara dönüştürülmektedir. Akıllı sayaçlardan alınan veriler, şebeke takip için; akım, gerilim, güç, güç faktörü ve faturalama amaçlı olanlar; yük profili, saatlik veya belirli zaman aralıklarındaki tüketim değerleri, maksimum talep edilen güç, reaktif enerji tüketimi şeklinde sınıflandırılabilir (Sharma and Saini, 2015).

Akıllı sayaçlar, modem ile bütünleşik üretilebildiği gibi elektronik sayaç ve modem ayrı iki ünite halinde elde edilip sonrasında birbirlerine monte edilmek suretiyle akıllandırılarak haberleşmeye hazır hale getirilebilirler. Bir modem elektrik sayacıyla bağlantı kurabilmesi için sayacın üzerinde haberleşme portu bulunmalıdır. Bu haberleşme portu yaygın olarak Rs485, Rs232 haberleşme portları olmakla beraber Rs485 portu özellikle tek bir modem üzerinden birden fazla sayaçla haberleşme olanağı sağladığından dolayı akıllı sayaç uygulamalarında çoğunlukla tercih edilmekte ve Rs232 haberleşme portuna göre son derece yaygın olarak kullanılmaktadır. Modem, sayaçla sahada haberleşerek sayaç kimliğini okur ve sayaçlarda obis kodları olarak tutulan anlık şebeke takip değerlerini ve faturalamaya esas tüketim bilgilerini elde ederek üzerinde tesis edilmiş haberleşme yöntemi ile sayaçtan aldığı verileri ana kurulum merkezi yazılımına aktarır ve aktarılan bu veriler yazılımda işlenerek son kullanıcının ara yüzüne kullanıcının yöneteceği biçimde sunulur. Bu ara yüz; bilgisayar, tablet, cep telefonu donanımları ile kullanılabilir. Şekil 3.31'de elektrik şebekesinde kullanılan sayaçların basit dağılımı görülmektedir. Akıllı sayaç uygulamalarında mekanik sayaçların kullanımı mümkün değildir. Elektronik bir sayacın akıllı sayaç uygulamasında kullanılabilmesi için üzerinde bütünleşik olarak bir modem barındırması gerekli ya da sonradan modem montajı yapılması gereklidir.



Şekil 3.31. Elektrik Sayaçları Genel Dağılım

Otomatik sayaç okuma olarak bilinen AMR sisteminin temel görevi uzaktan, istenilen sayaç verilerinin bir yazılıma sahadan aktarılmasıdır. AMR sistemleri, ileri sayaç altyapısı olarak AMI sistemlerinin alt bileşenlerinden biridir. AMI ise, veri yönetim sistemleri ile bağlantı kuran, denetim ara yüzünü içeren, kullanım zamanına bağlı fiyatlama yapılabilen, akıllı sayacın merkezi yazılımla haberleşme ağı yönetimini sağlayan, en genel başlık olarak çatı şeklinde, hem akıllı sayaç merkezi yazılım iletişimini sağlayan, hem de ölçümlenme ve ölçümlenmeye bağlı işlemlerin tamamını içeren sistemdir (Avancini, et al., 2019). AMI ve AMR sistemleriyle uzaktan veri alınan sayacın yapısına göre, otomatik faturalama işlemi başta olmak üzere, uzaktan açma-kesme, güç kalitesi ve şebekeye ait parametrelerin ölçülmesi, tüketici kullanımına göre dinamik fiyatlandırma, etkin kayıp-kaçak takibi, enerji talep tahmini gibi özellikle elektrik dağıtım şebekesine ait işlemler yürütülmektedir. Bir elektrik dağıtım şebekesine ait AMR ve AMI sistemleri, yine aynı dağıtım şebekesine ait, tüketici yönetim sistemi, arıza yönetim sistemi, coğrafi bilgi sistemi, enerji talep tahmin sistemi gibi yazılımlarla entegrasyon sağlayarak, dağıtım şebekesinin hatasız,

dinamik daha ölçülebilir ve anlık takip edilebilir şekilde yönetilmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmanın saha uygulaması kısmında sayaç okuma sonuçları, AMR sisteminden gerçek zamanlı şekilde elde edilerek kullanılmıştır.

3.8.1. Güç Hattı Haberleşmesinde Sayaç Okuma Modeli

Akıllı sayaç okuma sistemlerinde kablolu ve kablosuz haberleşme yöntemleri kullanılmaktadır. Kablolu haberleşme yöntemlerinden PLC ile haberleşme, kablosuz haberleşme yöntemlerinden RF ve GPRS/3G ise dünya geneli akıllı sayaç okuma sistemleri için en yaygın kullanıma sahip haberleşme yöntemleri olarak bilinmektedirler. Bu haberleşme yöntemlerinden PLC ve GPRS/3G ele alındığında, her iki haberleşme yönteminin de sağladığı faydalar ve mahsurlar olduğu görülmektedir. Bir elektrik dağıtım şebekesinde, akıllı sayaç okuma işlemini, haberleşme yöntemi tamamı ile PLC olacak ve sonrasında haberleşme yöntemi tamamı ile GPRS olacak şekilde ayrı ayrı sahada uygulandığında, Tablo 3.4'teki gibi bir sonuç ortaya çıkmıştır (Foudeh and Mokhtar, 2015).

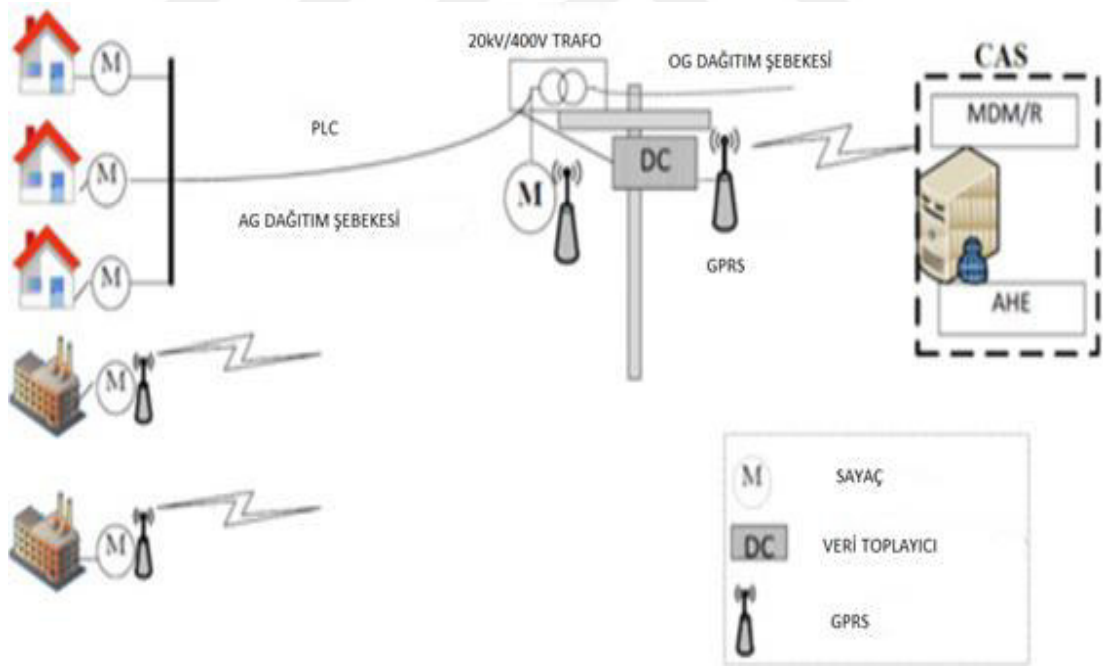
Tablo 3.4. PLC ve GPRS Haberleşme Kıyaslaması

KIYASLAMA KALEMİ	PLC	GPRS
Erişim Kabiliyeti	95%	97%
Yatırım Maliyeti	Orta	Düşük
İşletme Maliyeti	Düşük	Orta
İşletme Şekli	Kendi	Mobil Operatör
Sayacın Adreslenmesi	Veri Toplayıcı	Doğrudan
Gerçek Zamanlı İşlemlere Uygunluk	Evet	Hayır
Esneklik	Orta	Yüksek
Güvenirlilik	Yüksek	Çok Yüksek

Özellikle PLC yönteminde işletme maliyetlerinin düşük olması, gerçek zamanlı işlemlere uygun olması ve çok sayıda sayacın verisini bir DC'ye aktarabilme özellikleri en önemli olumlu noktalarıdır. GPRS/3G'nin ise çok yüksek güvenirliliğe sahip olması ve yatırım maliyetlerinin düşük olması olumlu noktalarıdır. Tüm bu özellikler ile dağıtım trafosundan sayacın bulunduğu son tüketim noktasına kadar elektrik dağıtım şebekesi varlığı düşünüldüğünde, PLC yöntemini ana haberleşme

şekli olarak seçerek, birden fazla sayacın okuma sonuçlarını dağıtım trafosuna kadar mevcut dağıtım hattı ile taşımak doğru bir yaklaşım olacaktır.

Şekil 3.32’de akıllı sayaç uygulamasında ana haberleşme yöntemi olarak PLC teknolojisinin seçildiği saha modeli görülmektedir. Bu modele göre, elektrik dağıtım şebekesi AG tarafında bulunan ve aynı dağıtım trafosundan beslenen sayaçların bilgileri AG hattı üzerinden PLC ile dağıtım trafosuna eş zamanlı olarak aktarılmaktadır. Dağıtım trafosunda bulunan DC ile sayaçlar ayrı ayrı adreslenmektedir. Sonrasında dağıtım trafosundaki DC cihazda toplanmış sayaç okuma sonuçları, sadece DC olmak kaydıyla tek bir cihazda bir sim kartla GPRS/3G haberleşme kullanılarak, uzaktan merkezi yönetim yazılımına aktarılmaktadır. Trafo AG tarafında, toplam tüketimi ölçecek bir sayaç bulundurulmasıyla o trafodan beslenen tüm sayaçların okuma sonuçları aynı anda gerçek zamanlı olarak PLC yöntemiyle elde edilerek, kayıp-kaçak takibinin de (özellikle teknik olmayan kayıplar için) sayaç okuma sonuçları toplamları karşılaştırılarak yapılabilmesi mümkündür (Khazae, et al., 2017).



Şekil 3.32. PLC ile Sayaç Okuma Modeli

Bu tez çalışmasının saha uygulaması kısmında bu bölümde anlatılan model dağıtım trafosunun bir AG çıkışında bulunan sayaçlar için ana haberleşme yöntemi PLC olacak şekilde kullanılmıştır.

3.8.2. Ülkemizde Akıllı Sayaç Okuma Durumu ve OSOS

Dünya genelinde akıllı sayaç okuma sistemleri AMI ve AMR isimleri ile bilinirken bizim ülkemizde ise akıllı sayaç uygulamaları “OSOS” olarak adlandırılmıştır.

OSOS tesis etmek ülkemizde elektrik dağıtım hizmet sağlayıcıların sorumluluğundadır. Elektrik dağıtım şirketleri OSOS uygulamalarını EPDK'nın oluşturmuş olduğu mevzuatlar çerçevesinde yürütmektedir. Bu mevzuatlar, “EPDK Otomatik Sayaç Okuma Sistemlerinin Kapsamına ve Sayaç Değerlerinin Belirlenmesine İlişkin Usul ve Esaslar” ve “EPDK OSOS kapsamına dahil edilecek sayaçların, haberleşme donanımının ve ilave teçhizat ve altyapının asgari teknik özellikleri” şeklindedir. Dağıtım şirketleri bu mevzuatlar çerçevesinde OSOS tesis etmek zorunda oldukları tüketicileri belirler ve yine mevzuatta belirtilen asgari teknik özellikleri sağlayacak şekilde uygulamalarını gerçekleştirmektedirler. Dağıtım şirketlerinin, üretim santralleri, lisanssız üreticiler, genel aydınlatmalar, iki dağıtım şirketi arası enerji alış veriş noktaları ve dengeleme ve uzlaştırmaya esas tüketim noktalarına OSOS tesis etme zorunlulukları olmakla beraber, kendilerinin belirlediği ve EPDK'ya bildirdiği yıllık enerji tüketim limitine ulaşmış mesken, ticarethane, sanayi, tarımsal sulama tarife gruplarına ait tüketicilere de OSOS tesis etmek durumundadırlar. Tablo 3.5'te dağıtım şirketlerinin belirlemiş ve EPDK'ya bildirmiş oldukları OSOS kurulum tüketim limiti değerleri görülmektedir (EPDK, 2018).

Tablo 3.5. OSOS Kurulumu için Tüketim Limitleri

ELEKTRİK DAĞITIM ŞİRKETLERİ	OSOS TÜKETİM LİMİTİ (MWh/yıl)
Akdeniz Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	30
Akedaş Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	100
Aras Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	100
ADM Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	100
Başkent Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	100
Boğaziçi Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	50
Çamlıbel Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	30
Çoruh Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	40
Dicle Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	10
Fırat Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	25
GDZ Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	80
İstanbul Anadolu Yakası Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	130
Kayseri ve Civarı Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	40
Meram Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	100
Osmangazi Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	400
Sakarya Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	30
Toroslar Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	150
Trakya Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	50
Uhudağ Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	25
Vangözü Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	100
Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi	55

Dağıtım hizmet sağlayıcıları bu tüketim limitlerini belirlerken en az kurulum ile dağıtım bölgeleri geneli toplam enerji tüketimlerinin olabildiğince en yüksek miktarını uzaktan denetim ve takip edebilme amacıyla hareket etmektedirler.

Ülkemizde mevcut OSOS uygulamalarının çok büyük bir bölümünde GPRS haberleşme yönteminin kullanıldığı görülmektedir. OSOS kurulumu için gereken asgari teknik özelliklerin belirtildiği yönergede kullanılabilecek haberleşme yöntemleri ve bu haberleşme yöntemlerinin içermesi gereken özellikler belirtilmiştir. PLC teknolojisi de burada yer alan bir haberleşme yöntemidir. PLC ile ilgili bu yönergede sadece BB-PLC ve NB-PLC yapısı ve CENELEC frekans bandı kullanılabilir şekilde ifadeler bulunmaktadır.

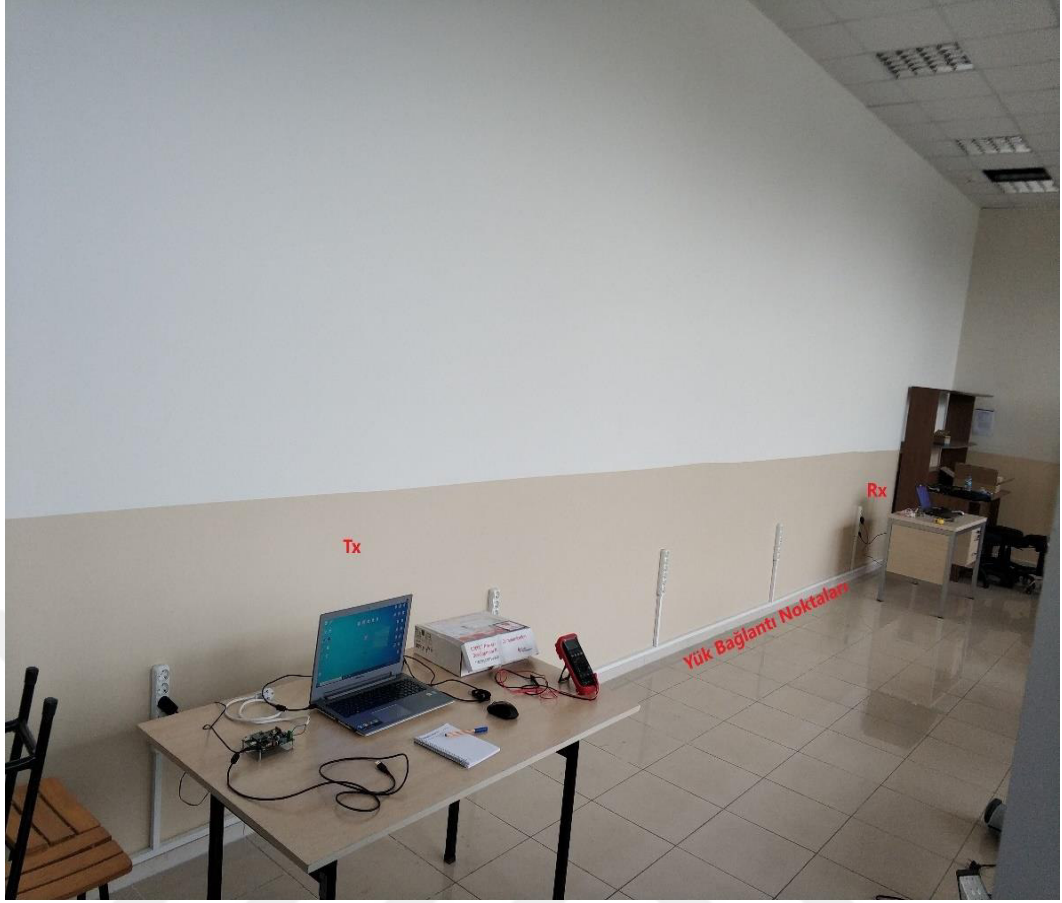


4. BULGULAR VE TARTIŞMA

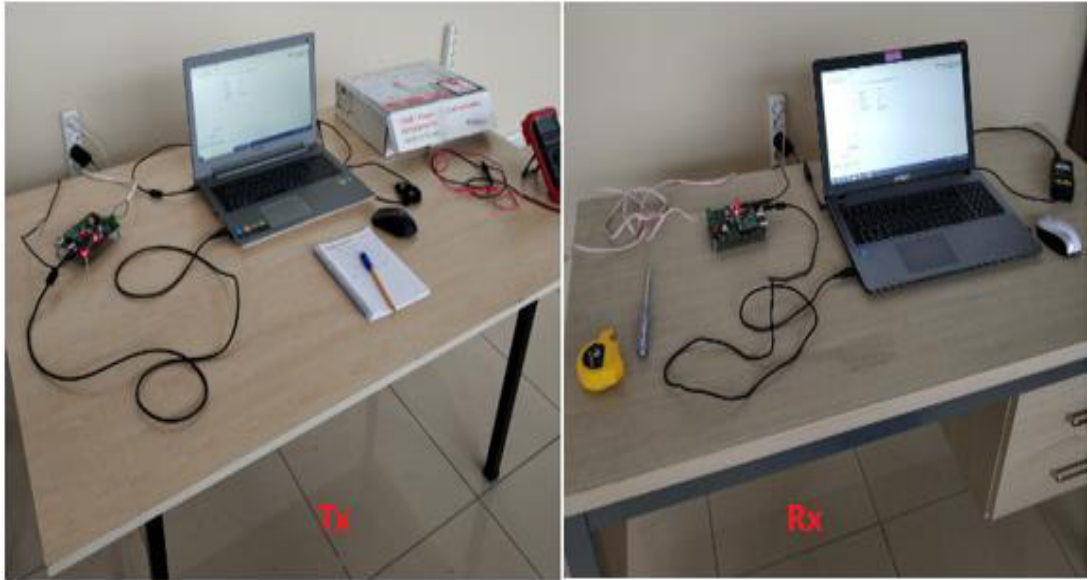
Bu çalışmada bulgular, laboratuvar ortamında yapılan deneyler ve saha uygulamasıyla elde edilen gerçek zamanlı verilerle oluşturulmuştur. Laboratuvar ortamındaki deneyler CENELEC-A bandı G3-PLC standardı ile programlanmış, Tx ve Rx taraflarında kullanılan iki adet TMDSPCKITV4 bordun, ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK modülasyon türleri kullanılarak, omik ve endüktif deney karakteristiklerinde, farklı mesafeler, farklı yük durumları oluşturulup, tüm deneylerde aynı kablo kesiti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında, TI ZCG programı ve IM programı kullanılarak bordlar üzerinde PHY test konfigürasyonları oluşturulmuş ve RSSI, SNR, BER, PER değerleri ve grafiksel sonuçları elde edilmiştir. Saha çalışmaları ise dağıtım trafosu AG tarafında bulunan aynı çıkış hattındaki mesken özellikli tüketim noktalarındaki sayaçlara, CENELEC-A bandı G3-PLC standardı programlı, ROBO modülasyon türünde çalışan PLC modemler monte edilerek ve dağıtım trafosu AG panosunda DC kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmasında elde edilen sayaç okuma sonuçları, AMR programı üzerinden gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir.

4.1. Omik Karakteristikli Laboratuvar Deneyleri

Omik deneyler, Tx ve Rx arası noktaların, yüksüz, 1500w, 3300w, 1500w darbeli yük durumları için 5m, 25m ve 55m mesafeleri için G3-PLC standardına ait dört modülasyon türlerinde yürütülmüştür. Tüm deneylerde Tx ve Rx arası mesafe artırımı için $3 \times 2,5 \text{mm}^2$ kesitli iletken kullanılmıştır. IM programı PHY test bölümünden TMDSPCKITV4 bordların, Tx ve Rx seçimleri yapılarak PPDU parametreleri ayarlanmıştır. Tüm deneylerde PPDU parametreleri olan, veri paketi gönderme zaman aralığı 1000 (seçilen zaman parametresi program tarafından 10 μs değeri ile çarpılmaktadır bu durumda her bir veri paketi arasında 0,01 s zaman farkı oluşmaktadır), her test için gönderilecek toplam veri paketi sayısı 1000, bir veri paketi boyutu ise 100 byte olacak şekilde Tx tarafında konfigürasyonlar yapılmıştır. Rx tarafında ise RSSI, SNR, BER ve PER grafikleri ve değerleri değişimi test süresi boyunca 3 saniye aralıklarla güncellenmiş verilerle takip edilmiştir. Bunlara ek olarak, omik deney düzeneğinde, ZCG programı ile Tx ve Rx arası veri dosyası iletimi deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de omik deney düzeneği yapıları görülmektedir.

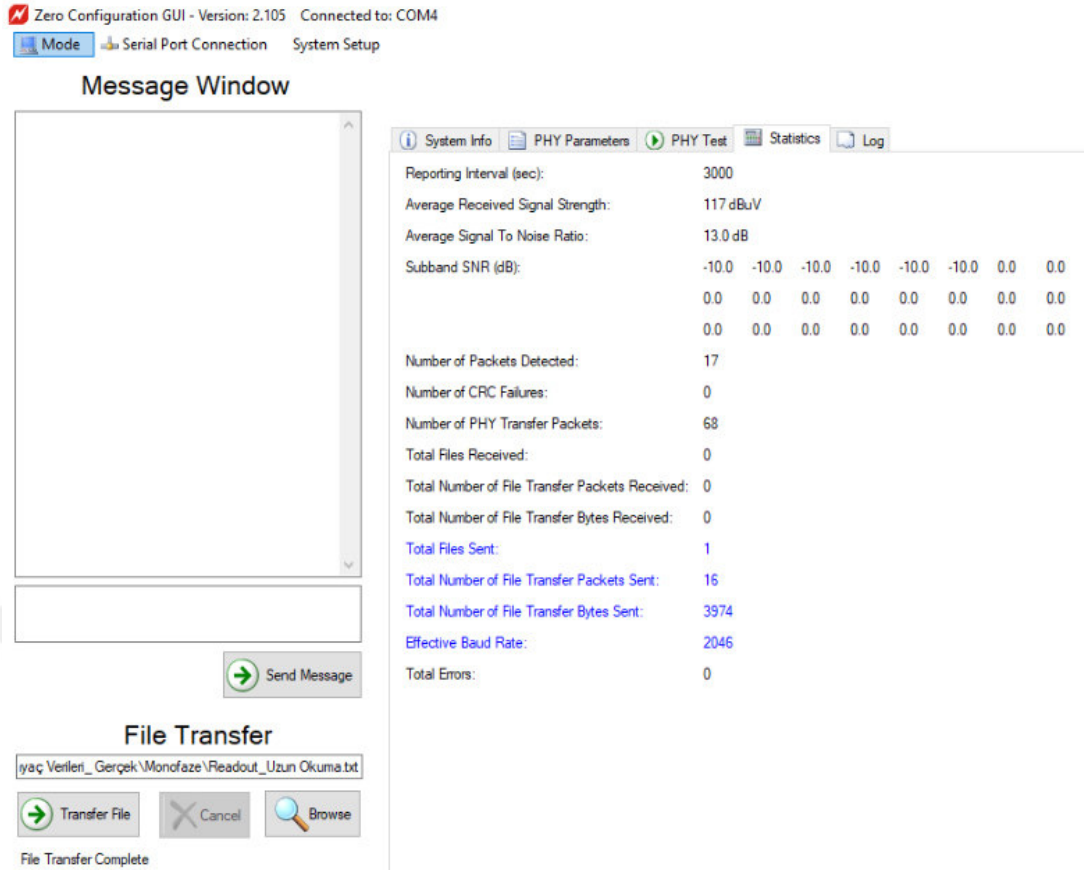


Şekil 4.1. Omik Deney Düzenegi Genel Görünüm



Şekil 4.2. Omik Deney Tx ve Rx

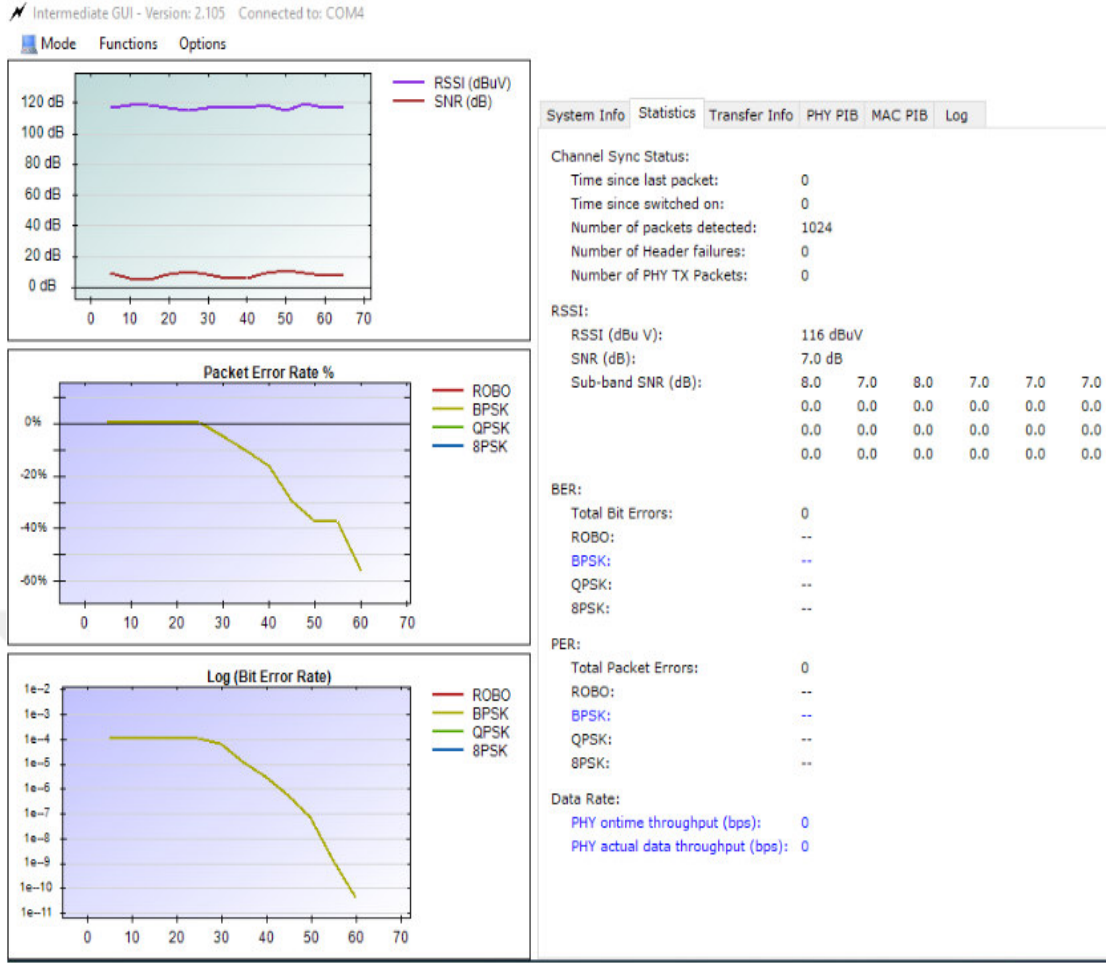
ZCG kullanılarak veri dosyası iletimi deneyi sonuçları Şekil 4.3'de görülmektedir. Bu deneyde 4 kB boyutunda bir veri dosyası, Tx ve Rx arası 25 m ve 1500W omik yükte ROBO modülasyon türünde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3. ZCG ile Veri Dosyası İletimi

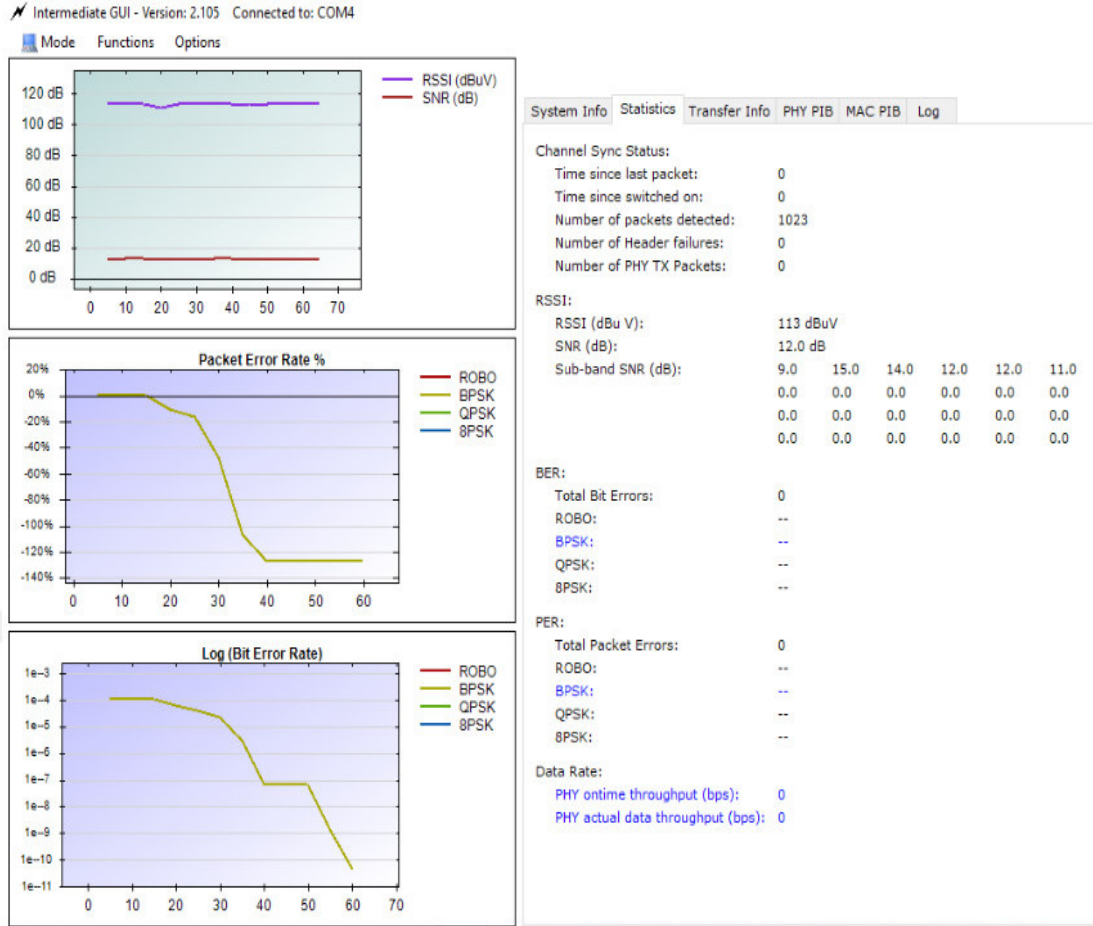
RSSI değeri 117 dBuV, SNR değeri 13 dB olacak şekilde yaklaşık 4 kB büyüklüğündeki veri dosyası başarılı bir şekilde sıfır hata kaydı ile Rx tarafına iletilmiştir. Burada gönderilen 4 kB'lık veri dosyası dağıtım şirketinin gerçek zamanlı sayaç okumada kullandığı “monofaze sayaç uzun okuma” paketidir. Uzun okuma paketinin içerisinde sayaç flag kodu, seri no gibi kimlik bilgileri ve sayaç okuma sonuçlarıyla beraber, sayaç klemens kapağı açılma, sayaç enerji kesintisi, akım-gerilim ölçümleri gibi bilgiler de mevcuttur. Bunun dışında kısa okuma paketi ve yük profili veri paketi de sayaçlar üzerinden alınabilecek sonuçlardır. Bu deneyde 25 m mesafede Tx ve Rx tarafında konumlanmış, PLC modem görevi gören, TMDSPCKITV4 bordlarla PLC haberleşme yöntemi kullanılarak gerçek sayaç verilerini içeren ve gerçek sayaç verisi boyutunda bir veri paketi başarılı şekilde iletilmiştir.

Bu noktadan sonra tüm deneyler IM ara yüzü PHY test modu kullanılarak, girişte verilmiş PPDU parametreleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden ilki, yüksüz durumda 5m ve 25m mesafelerde BPSK modülasyon türünde yapılmış deneylerdir. Şekil 4.4'te 5m yüksüz durumdaki deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.4. Yüksüz, BPSK, 5m

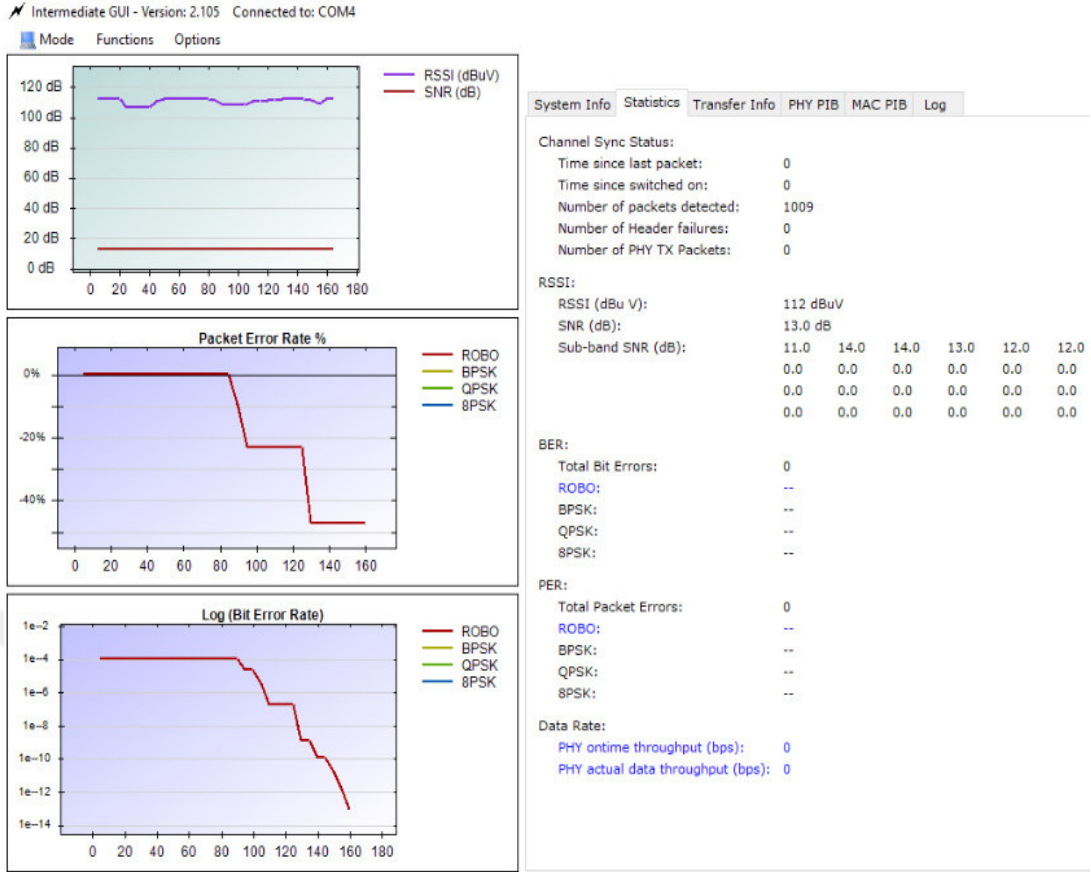
BPSK modülasyon türünde, Tx ve Rx arası 5m mesafede ve yüksüz durumda, alınan sinyal gücünü gösteren RSSI değerinin 116 dB μ V olduğu ve herhangi bir hatalı bit değerine rastlanmadığı görülmektedir. Şekil 4.5'te ise aynı modülasyon türü ve yüksüz durum kullanılıp, mesafe 25m'ye çıkarıldığında elde edilen sonuçlar görülmektedir.



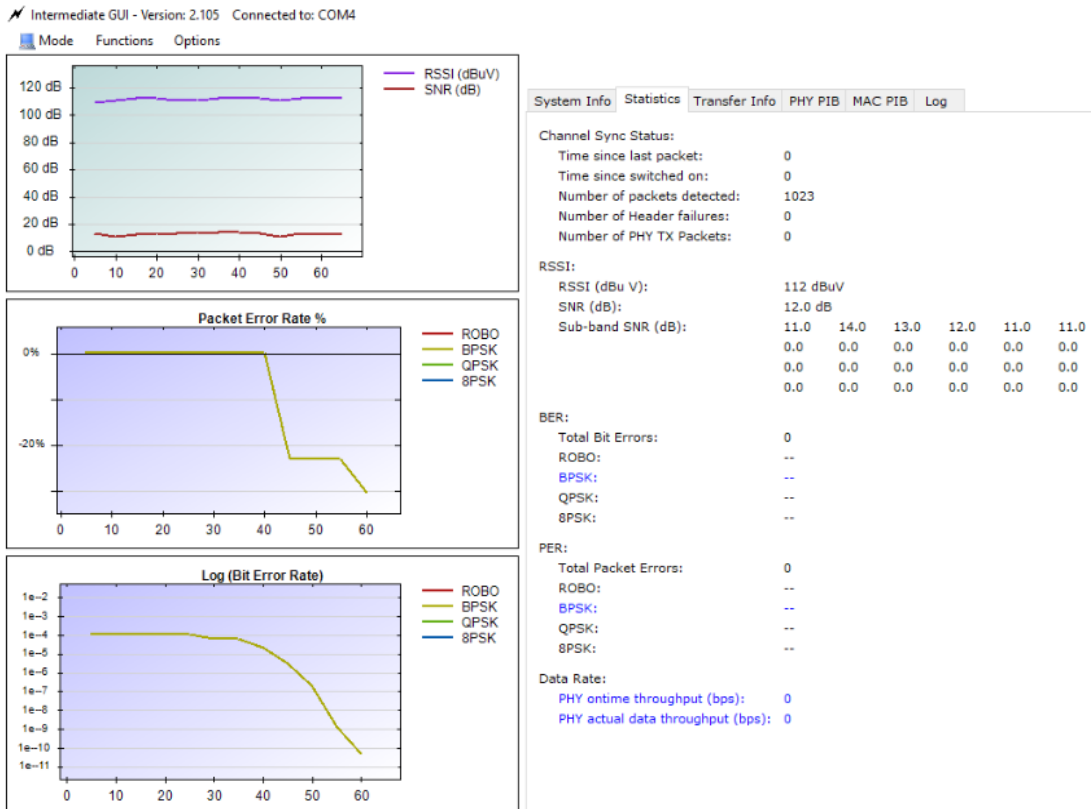
Şekil 4.5. Yüksüz, BPSK, 25m

25 m mesafede, aynı deney şartlarında RSSI değerinin 113 dB μ V olarak ölçüldüğü görülmektedir. Şekil 4.4'teki 5m mesafede yapılan deneyle karşılaştırma yapıldığında mesafe artışından dolayı 3 dB μ V kadar sinyal zayıflaması olduğu görülmektedir fakat bu sinyal zayıflamasının PDU parametreleriyle yapılan test süresi boyunca herhangi bir hatalı bit oluşumuna sebep olmadığı görülmektedir. Her iki deneyde de benzer şekilde BER değerlerinin test boyunca başlangıç değerinden daha da küçük değerlere doğru azalarak ilerlemektedir.

Tx ve Rx noktaları arası 25m mesafe ve 3300W sabit omik yük bulundurularak kurulan deney düzeneğinde sırasıyla ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK modülasyon türlerinde yapılan testlerle elde edilen sonuçlar Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

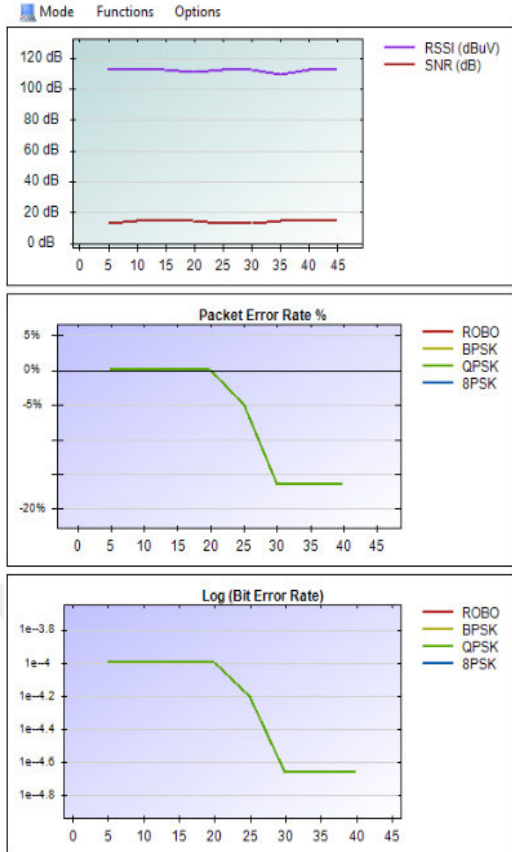


Şekil 4.6. 3300W Sabit Yük, ROBO, 25m



Şekil 4.7. 3300W Sabit Yük, BPSK, 25m

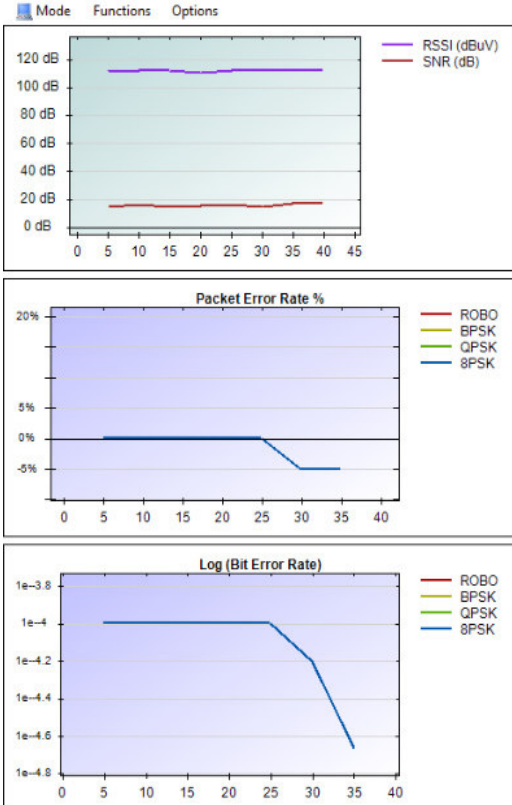
Intermediate GUI - Version: 2.105 Connected to: COM4



System Info	Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
Channel Sync Status:					
Time since last packet:	0				
Time since switched on:	0				
Number of packets detected:	1032				
Number of Header failures:	0				
Number of PHY TX Packets:	0				
RSSI:					
RSSI (dBu V):	112 dBuV				
SNR (dB):	14.0 dB				
Sub-band SNR (dB):	14.0	15.0	16.0	13.0	14.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BER:					
Total Bit Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
PER:					
Total Packet Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
Data Rate:					
PHY ontime throughput (bps):	0				
PHY actual data throughput (bps):	0				

Şekil 4.8. 3300W Sabit Yük, QPSK, 25m

Intermediate GUI - Version: 2.105 Connected to: COM4

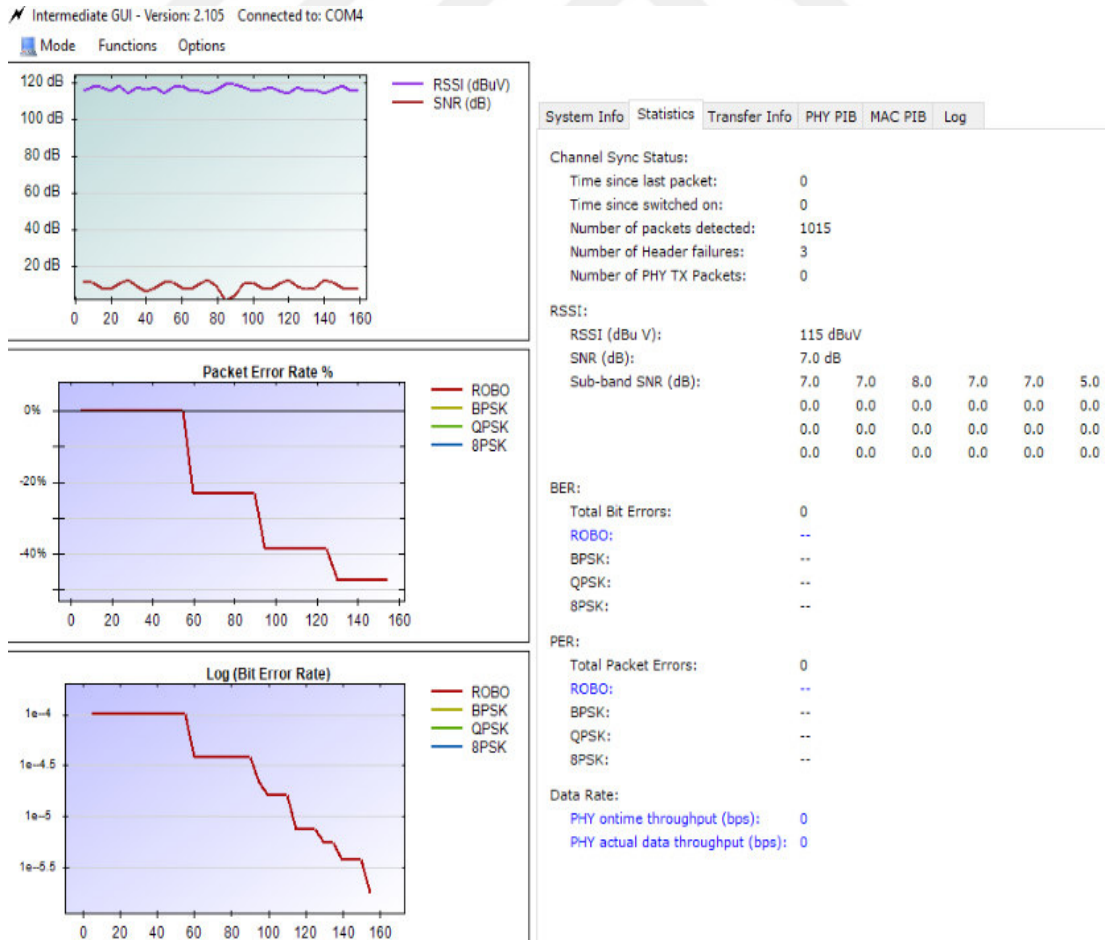


System Info	Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
Channel Sync Status:					
Time since last packet:	0				
Time since switched on:	0				
Number of packets detected:	1039				
Number of Header failures:	0				
Number of PHY TX Packets:	0				
RSSI:					
RSSI (dBu V):	112 dBuV				
SNR (dB):	17.0 dB				
Sub-band SNR (dB):	14.0	18.0	19.0	16.0	15.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BER:					
Total Bit Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
PER:					
Total Packet Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
Data Rate:					
PHY ontime throughput (bps):	0				
PHY actual data throughput (bps):	0				

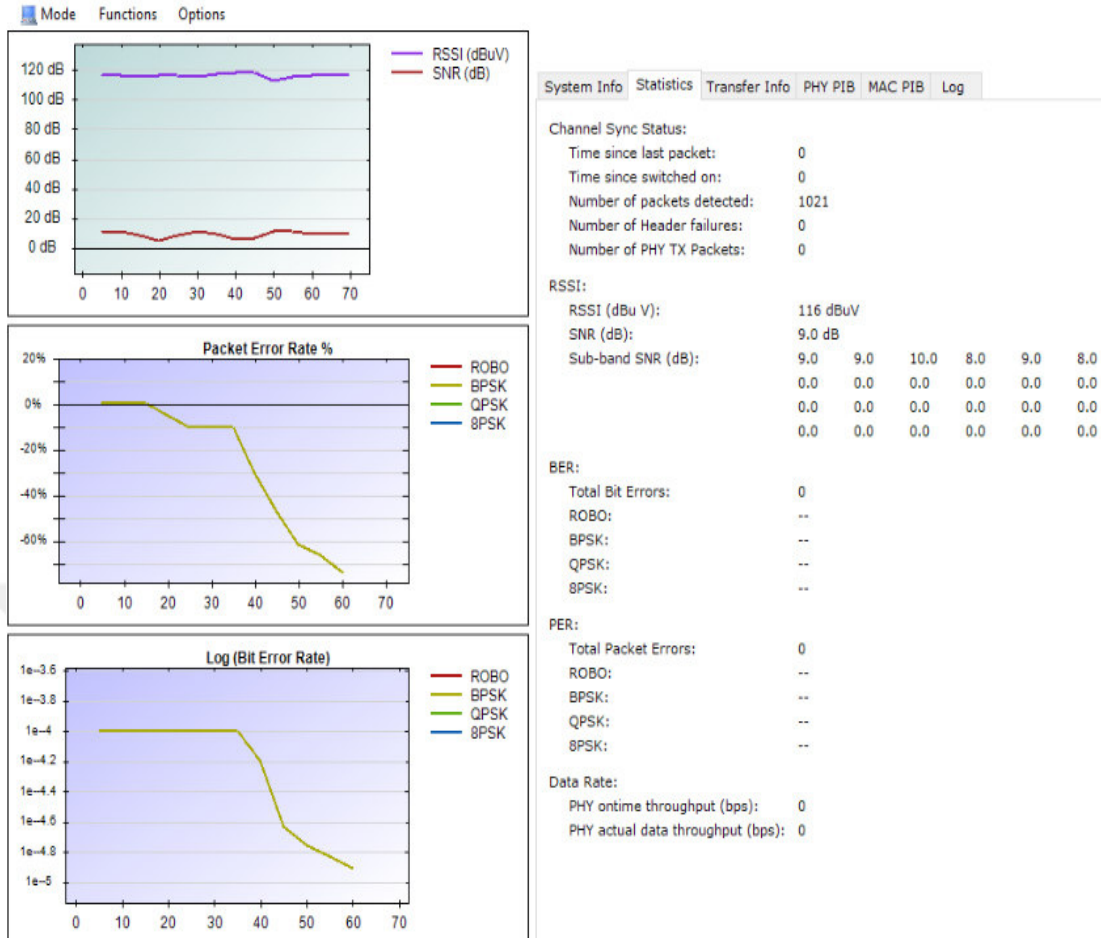
Şekil 4.9. 3300W Sabit Yük, 8PSK, 25m

25m mesafede, 3300W sabit omik yükte, dört farklı modülasyon türünde yapılan deneylerde hatalı bit ve hatalı veri paketi oluşturacak BER ve PER değerlerine ulaşılmamıştır. Bu durumla beraber QPSK ve 8PSK modülasyon türlerindeki deneylerde elde edilen BER değerlerinin hata biti oluşturma sınır değeri olan “1e-4” değerine yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. ROBO ve BPSK modülasyon türlerindeki deneylerde BER değerleri hata sınırından oldukça uzak değerde zamanla azalan şekilde seyrettiği görülmektedir. RSSI değerleri ise 25m mesafeli tüm modülasyon türlerinde aynı olacak şekilde 112 dB μ V olarak ölçülmüştür. Belirtilen deney şartlarında, tüm modülasyon türleri için SNR değerlerinin hata biti oluşturacak kadar kötü seviyede olmadığı görülmektedir.

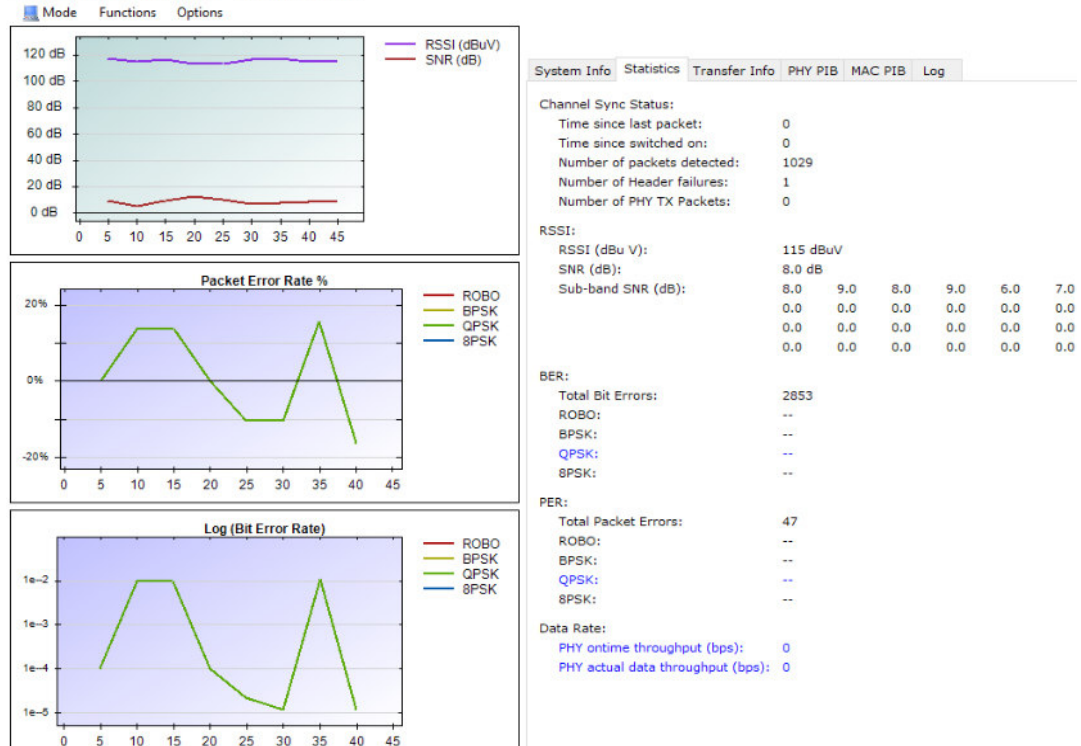
Tx ve Rx noktaları arası 5m mesafe, 1500W sabit omik yük ve ilave olarak 1500W darbeleri değişken yük olmak üzere toplam 3000W yük tesis edilerek kurulan deney düzeneğinde sırasıyla, ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK modülasyon türlerinde yapılan testlerle elde edilen sonuçlar Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te gösterilmektedir.



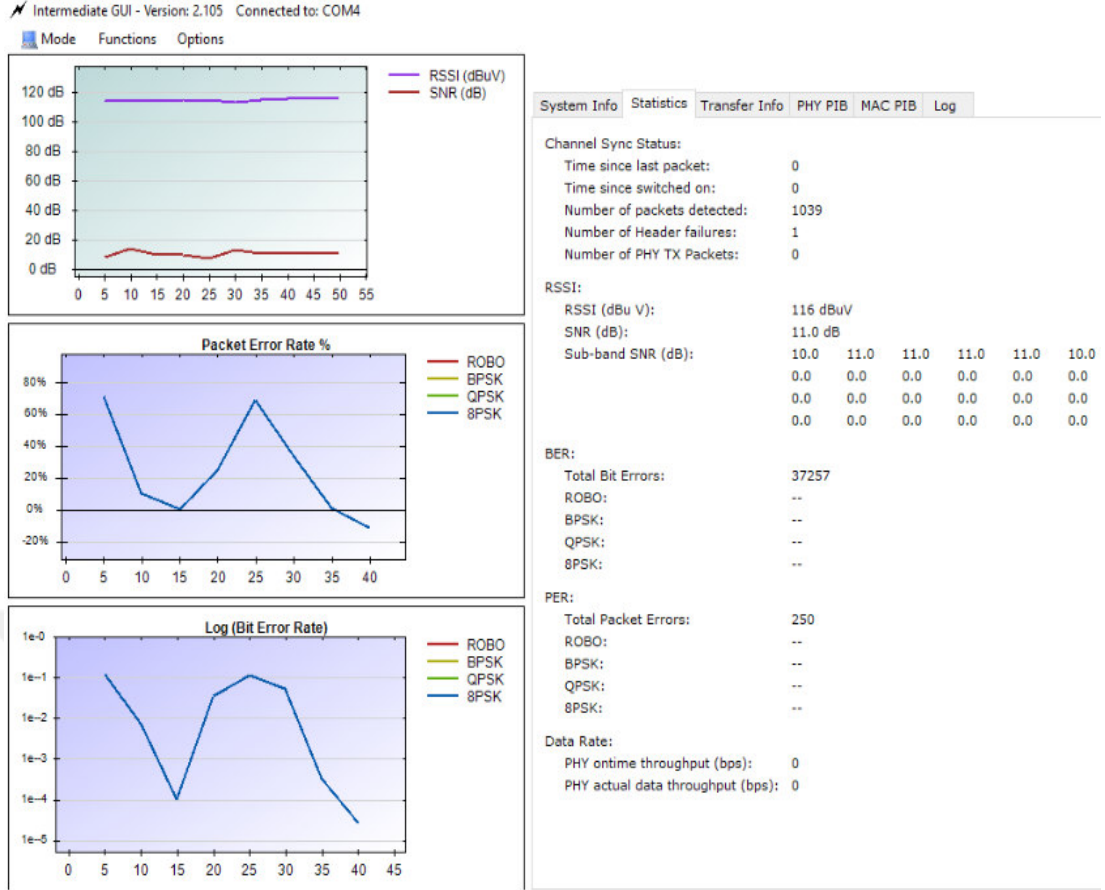
Şekil 4.10. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, ROBO, 5m



Şekil 4.11. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, BPSK, 5m



Şekil 4.12. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, QPSK, 5m



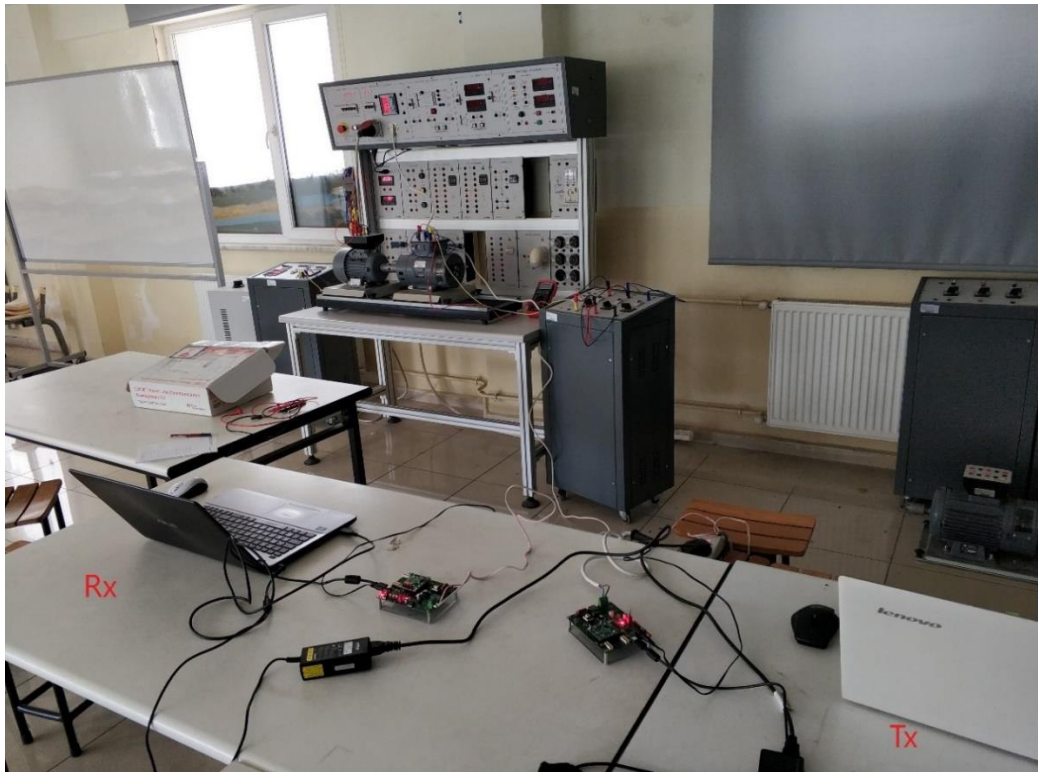
Şekil 4.13. 1500W Sabit Yük + 1500W Ddy, 8PSK, 5m

5m mesafe, 1500W sabit omik yük ve ilave olarak 1500W darbeleri değişken yük olmak üzere toplam 3000W yük tesis edilerek kurulan deney düzeneğinde dört modülasyon türünde elde edilen sonuçlara göre 8PSK modülasyon türünde toplam 37257 bit hatası, 250 paket hatası görülmüştür. QPSK modülasyon türünde toplam 2853 bit hatası, 47 paket hatası görülmüştür. ROBO ve BPSK modülasyon türlerinde hatalı veri paketi oluşturacak PER değeri ve hatalı veri biti oluşturacak BER değeri görülmese de özellikle BPSK modülasyonunda hata biti oluşturacak BER sınır değerlerine yaklaşıldığı görülmektedir. Bu deneylerle, yaklaşık deney parametrelerine sahip, daha önce Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 olarak verilmiş 3300W sabit omik yüklü deneyler karşılaştırıldığında; 1500W darbeleri değişken yükün tüm modülasyon türleri için SNR değerlerini düşürdüğü, QPSK ve 8PSK modülasyon türlerinde BER ve PER değerini hata eşik değerinin üstüne çıkarıp, hatalı bitler ve hatalı veri paketleri oluşmasına sebep olarak bu iki modülasyon türünü veri iletimi için uygun olmayan hale getirdiği görülmektedir. ROBO ve BPSK modülasyon türlerinde ise darbeleri yükün sabit yük durumuna göre BER değerini yükselttiği fakat herhangi bir hatalı bit oluşumuna sebep olmadığı görülmektedir. Bunun yanı sıra tüm deneylerde

elde edilen grafiklerde BER ve PER değerlerinin birbiriyle paralel seyrettiği görülmektedir.

4.2. Endüktif Karakteristikli Laboratuvar Deneyleri

Bu deney türünde üç fazlı asenkron motor ve Doğru Akım (DA) kompund makina generatör çalışma şekli kullanılarak kurulan deney düzeneğiyle endüktif yapı sağlanmıştır. 3 fazlı asenkron motorun etiket değerleri; giriş gerilimi 380 V, gücü 1,1 kW, güç faktörü 0,80, devir sayısı 1380 d/dk şeklindeyken, DA kompund makine etiket değerleri; gerilim değeri 200 V, gücü 1 kW, devir sayısı 1500 d/dk şeklindedir. Asenkron motorun çıkışındaki mekanik döndürme kuvveti, DA kompund makinanın girişiyle bağlantılanarak, DA kompund makinanın girişinde mekanik kuvvet ve yük bağlantı noktasında elektriksel çıkış oluşturularak DA kompund makinanın generatör çalışma durumu oluşturulmuştur. Kullanılan deney masasının sadece kendine ait üç fazlı besleme hattı olmakla beraber, deney masasının aktif güç, reaktif güç, güç faktörü, akım değeri gibi parametreleri masa girişindeki enerji analizöründen ölçülmüştür. DA kompund generatör çıkış akım değeri ayrı bir ölçü aleti bağlanarak okunmuştur. Şekil 4.14'te TMDSPCKITV4 bordlarla beraber kurulan deney düzeneğinin genel görünümü gösterilmektedir.

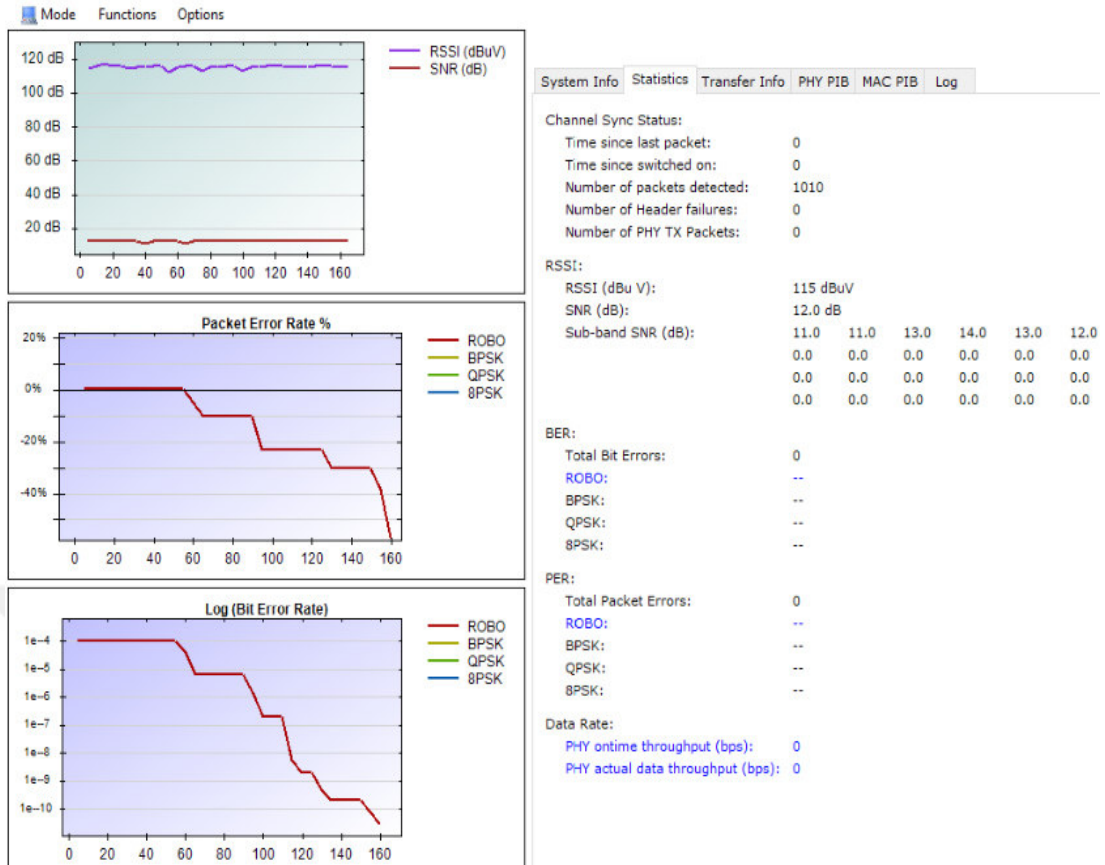


Şekil 4.14. Endüktif Deney Düzeneği Genel Görünüş

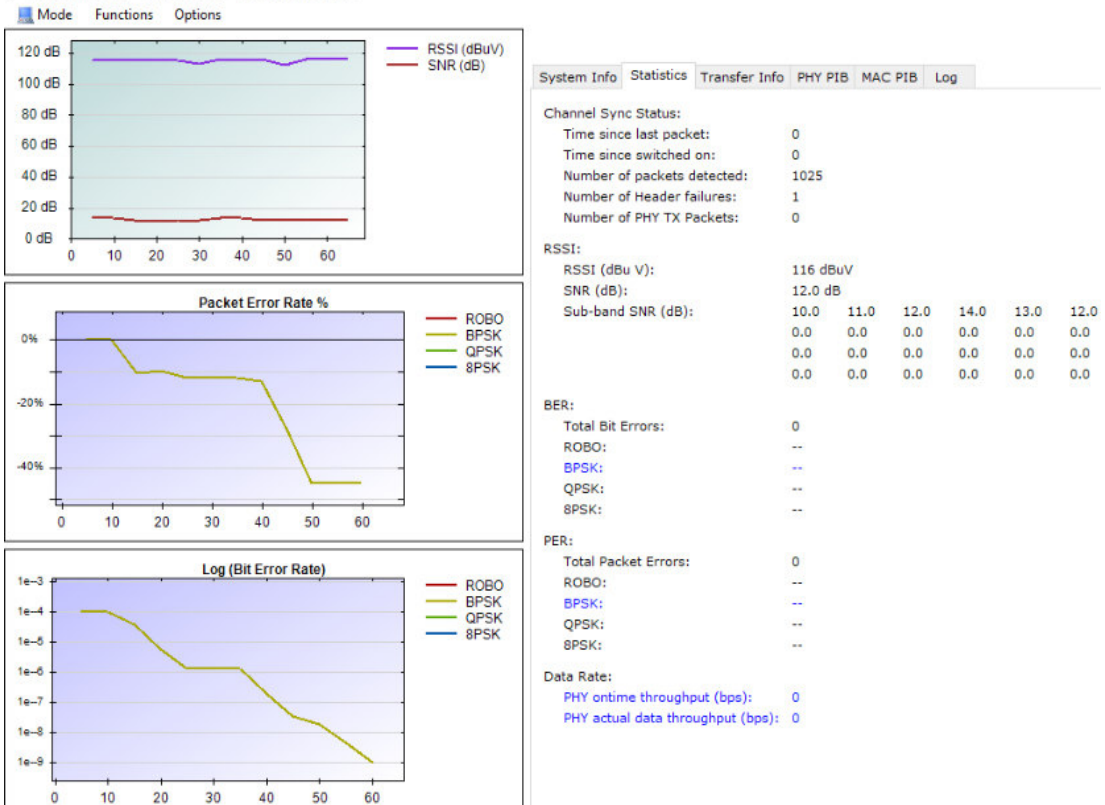
Deney düzeneğinde görüldüğü üzere Tx ve Rx taraflarda PLC modem görevi gören, TMDSPLCKITV4 bordların 220 V şebeke bağlantıları deney masası üzerinde bulunan tek fazlı çıkıştan sağlanmıştır.

Endüktif yapıli deneyler, bordların Tx ve Rx olarak bağlı olduğu güç hattında DA kompund generatör çıkışları yüksüz, 500W, 1000W, 1500w darbeli yük durumları için 5m, 25m ve 55m mesafeleri için G3-PLC standardının dört modülasyon türünde yürütülmüştür. Tüm deneylerde Tx ve Rx arası mesafe artırımı için 3x2,5mm² kesitli iletken kullanılmıştır. IM programı PHY test bölümünden TMDSPLCKITV4 bordların, Tx ve Rx seçimleri yapılarak PPDU parametreleri ayarlanmıştır. Tüm deneylerde PPDU parametreleri olan, veri paketi gönderme zaman aralığı 1000 (bu değer programda 0,01 s zamanına denk gelmektedir), her test için gönderilecek toplam veri paketi sayısı 1000, bir veri paketi boyutu ise 100 byte olacak şekilde Tx tarafında konfigürasyonlar yapılmıştır. Rx tarafında ise IM programı üzerinden RSSI, SNR, BER ve PER grafikleri ve değerleri değişimi test süresi boyunca 3 sn aralıklarla güncellenmiş verilerle takip edilmiştir.

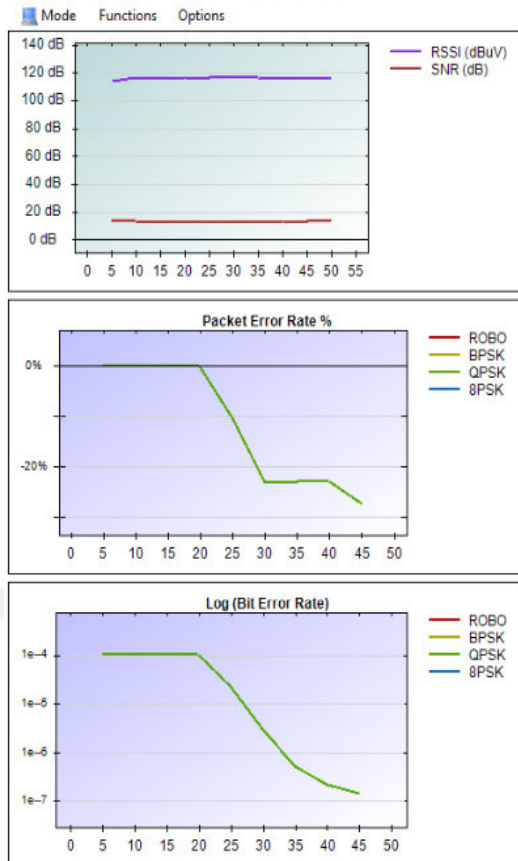
Tx ve Rx noktaları arası 55m mesafe, DA kompund generatör çıkışında omik yük bankası yardımıyla 1000W sabit yük tesis edilerek kurulan deney düzeneğinde sırasıyla, ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK modülasyon türlerinde yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. 1000W Sabit Yük, ROBO, 55m

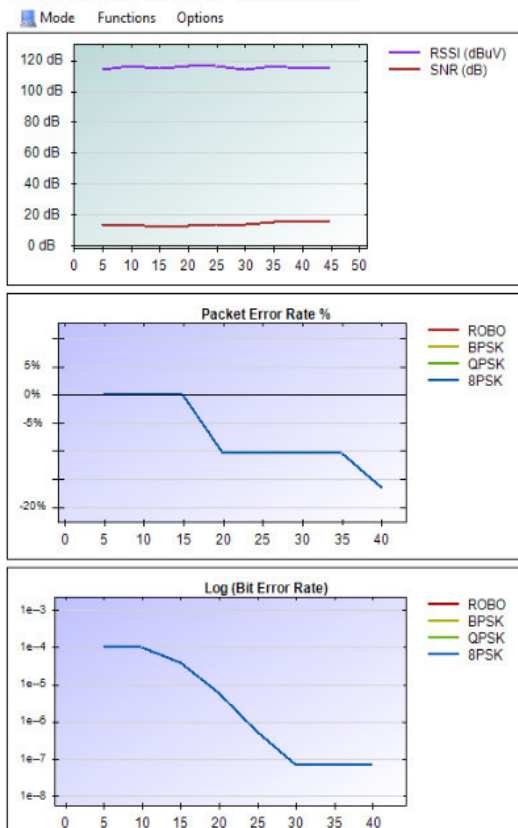


Şekil 4.16. 1000W Sabit Yük, BPSK, 55m



System Info	Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
Channel Sync Status:					
Time since last packet:	0				
Time since switched on:	0				
Number of packets detected:	1047				
Number of Header failures:	0				
Number of PHY TX Packets:	0				
RSSI:					
RSSI (dBu V):	115 dBuV				
SNR (dB):	13.0 dB				
Sub-band SNR (dB):	12.0	12.0	12.0	15.0	14.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BER:					
Total Bit Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
PER:					
Total Packet Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
Data Rate:					
PHY ontime throughput (bps):	0				
PHY actual data throughput (bps):	0				

Şekil 4.17. 1000W Sabit Yük, QPSK, 55m

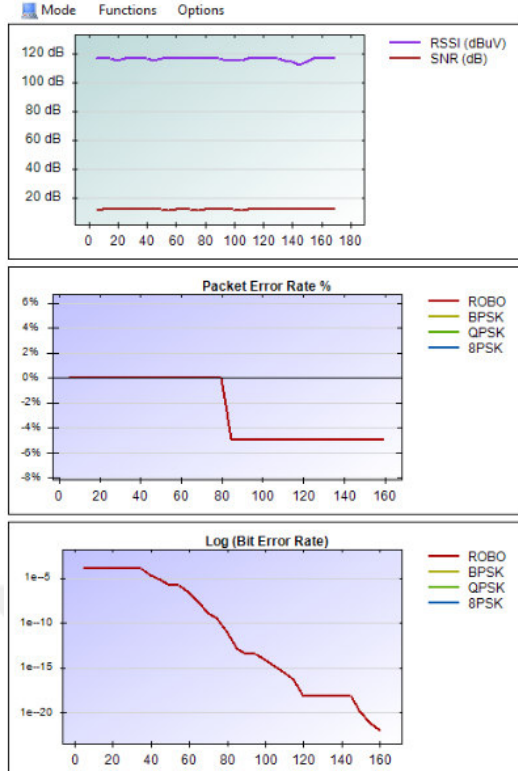


System Info	Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
Channel Sync Status:					
Time since last packet:	0				
Time since switched on:	0				
Number of packets detected:	1076				
Number of Header failures:	0				
Number of PHY TX Packets:	2				
RSSI:					
RSSI (dBu V):	115 dBuV				
SNR (dB):	15.0 dB				
Sub-band SNR (dB):	13.0	16.0	14.0	15.0	16.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BER:					
Total Bit Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
PER:					
Total Packet Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
Data Rate:					
PHY ontime throughput (bps):	0				
PHY actual data throughput (bps):	0				

Şekil 4.18. 1000W Sabit Yük, 8PSK, 55m

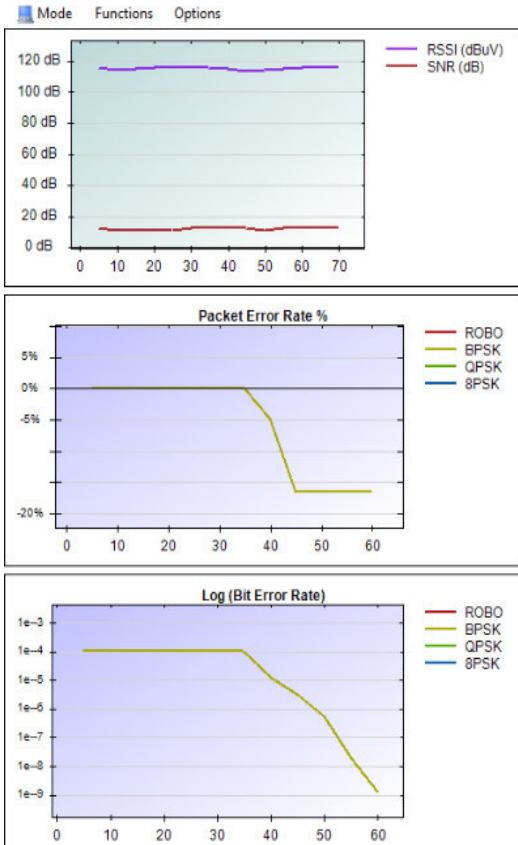
DA kompund generatör çıkışında 1000W sabit yük, Tx ve Rx arası 55m mesafe olan endüktif deney düzeneğinde enerji analizöründen ölçülen değerler, asenkron motor akımı 1,41A, aktif güç 885W, reaktif güç 895Var, güç faktörü 0,7 şeklindedir. DA kompund generatör çıkış akımı 3,44A değerindedir. DA kompund generatör çıkışının etiket değerine göre tam yüklenmiş oldu bu durumda dört modülasyon türünde yapılan deneylerde SNR değerlerinin 12-15 dB arası olduğu ve bu iyi değerlerle test esnasında hatalı veri biti ve hatalı veri paketi oluşmadığı görülmüştür. RSSI değerleri ise bu dört modülasyon türünde 115-116 dB μ V değerlerinde olup sinyal zayıflaması sebebiyle test verilerinin iletiminde hata biti oluşturan bir durum gözlemlenmemiştir. ROBO modülasyon türünün diğer modülasyon türlerine göre en düşük BER grafiğine sahip olduğu ve test süresi boyunca BER grafiğinin çok küçük bir değer olan “1e-10” değerine kadar azalarak ilerlediği görülmektedir. BPSK modülasyon türünün de ROBO modda elde edilen BER eğrisine benzer bir BER grafiği çizdiği görülmektedir. QPSK ve 8PSK modülasyon türlerinde hata biti oluşmasa da ROBO ve BPSK modülasyon türlerine kıyasla daha yüksek değerli BER grafikleri oluşturduğu görülmektedir.

Tx ve Rx noktaları arası 5m mesafe, DA kompund generatör çıkışı yüksüz olacak şekilde kurulan deney düzeneğinde sırasıyla, ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK modülasyon türlerinde yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’te gösterilmektedir.



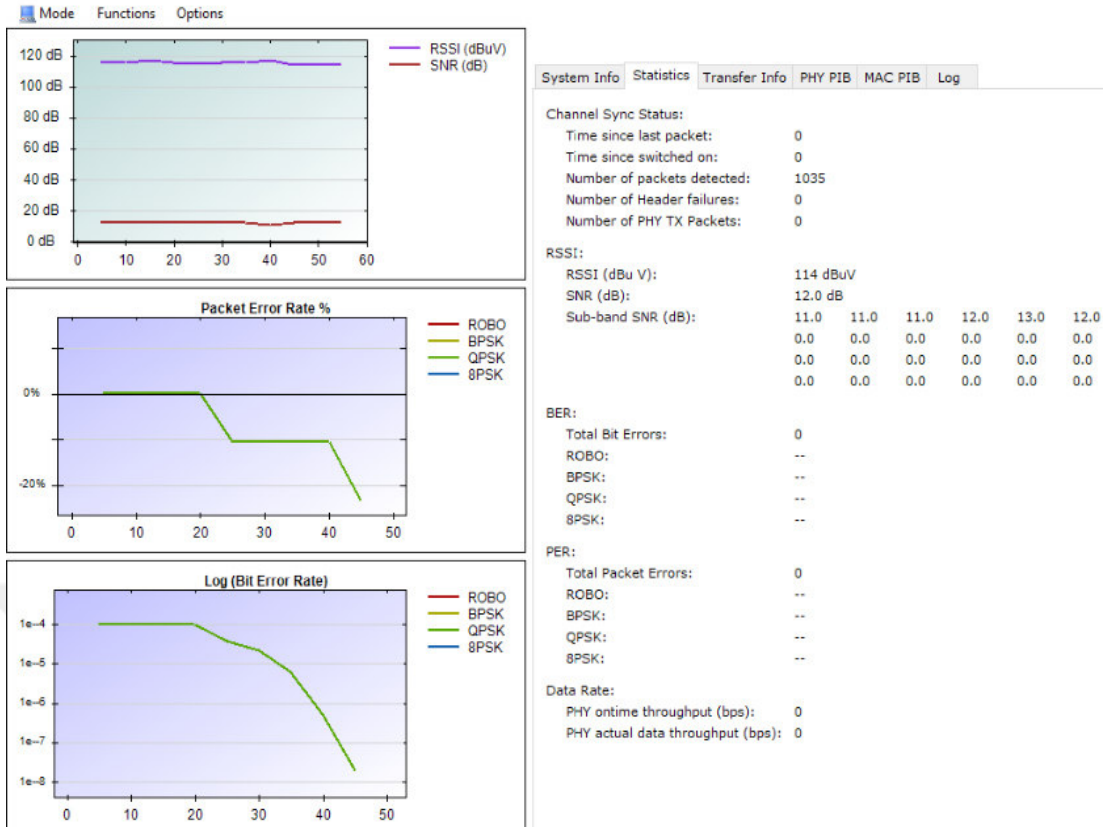
System Info	Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
Channel Sync Status:					
Time since last packet:	0				
Time since switched on:	0				
Number of packets detected:	1009				
Number of Header failures:	0				
Number of PHY TX Packets:	0				
RSSI:					
RSSI (dBu V):	116 dBuV				
SNR (dB):	12.0 dB				
Sub-band SNR (dB):	12.0	9.0	12.0	13.0	13.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BER:					
Total Bit Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
PER:					
Total Packet Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
Data Rate:					
PHY ontime throughput (bps):	0				
PHY actual data throughput (bps):	0				

Şekil 4.19. Yüksüz, ROBO, 5m

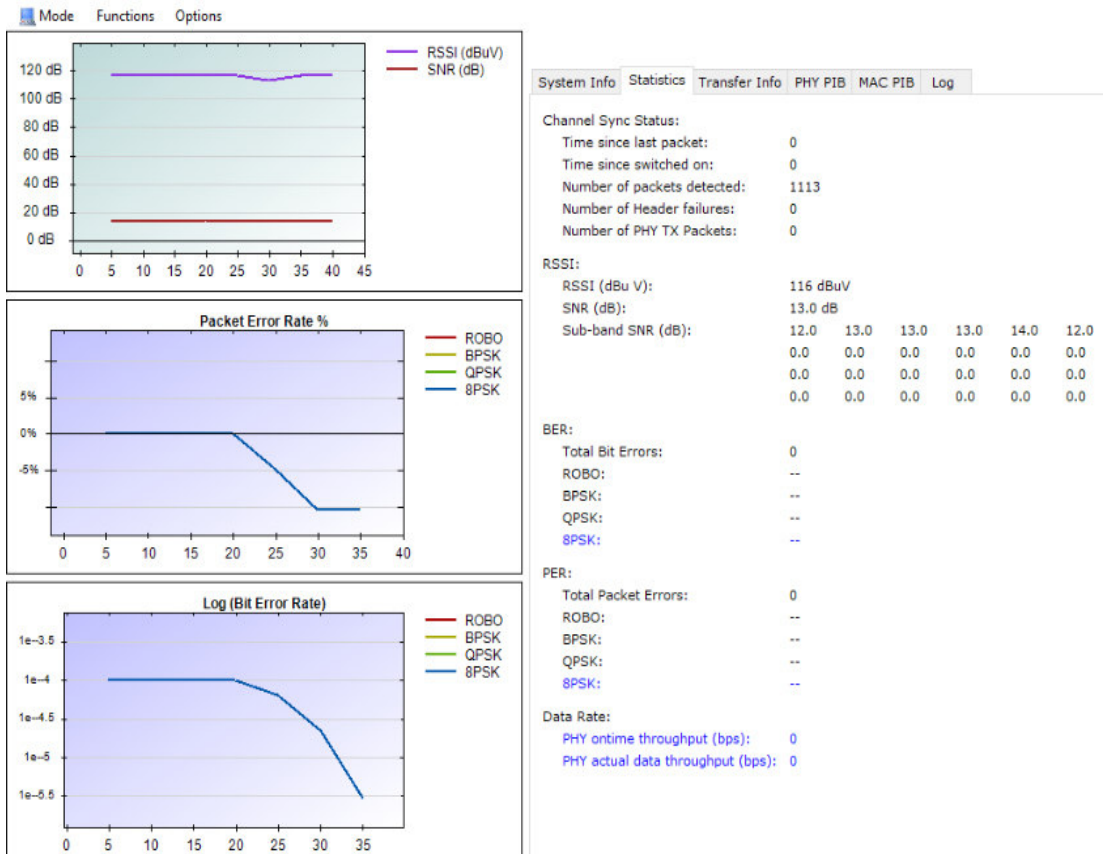


System Info	Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
Channel Sync Status:					
Time since last packet:	0				
Time since switched on:	0				
Number of packets detected:	1047				
Number of Header failures:	0				
Number of PHY TX Packets:	0				
RSSI:					
RSSI (dBu V):	116 dBuV				
SNR (dB):	12.0 dB				
Sub-band SNR (dB):	10.0	11.0	12.0	14.0	13.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BER:					
Total Bit Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
PER:					
Total Packet Errors:	0				
ROBO:	--				
BPSK:	--				
QPSK:	--				
8PSK:	--				
Data Rate:					
PHY ontime throughput (bps):	0				
PHY actual data throughput (bps):	0				

Şekil 4.20. Yüksüz, BPSK, 5m



Şekil 4.21. Yüksüz, QPSK, 5m



Şekil 4.22. Yüksüz, 8PSK, 5m

DA kompund generatör çıkışının yüksüz, Tx ve Rx arası 5m mesafe olan endüktif deney düzeneğinde enerji analizöründen ölçülen değerler, asenkron motor akımı 1,41A, aktif güç 430W, reaktif güç 840Var, güç faktörü 0,45 şeklindedir. DA kompund generatör çıkış akımı, boşa çalışma durumu söz konusu olduğundan dolayı sıfırdır. Bu deney düzeneğinde, dört modülasyon türünde elde edilen grafikler incelendiğinde modülasyon türlerinin, SNR değerinin 12-13 dB seviyesinde olduğu ve herhangi bir hata biti oluşturmadığı görülmektedir. 55m 1000W sabit yüklü deneyle karşılaştırıldığında SNR değerinin 2 dB kadar, az da olsa düştüğü görülmektedir. Bu durumun sebebi 5m yüksüz durumdaki deneyde boşa çalışmayla beraber güç faktörü değerinin 0,45 değerine düşmesidir. Bu durum dışında ROBO modülasyonun diğer modülasyonlara göre en düşük değerli BER grafiğine sahip olduğu görülmektedir. 5m yüksüz ve 55m 1000W sabit yük endüktif karakteristikli deney düzeneklerinden elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır ki çekilen akımın test boyunca aynı olduğu, reaktif güç değerinin test boyunca aynı olduğu ya da çok az değiştiği stabil, düzenli deney şartlarında hatalı veri biti ve hatalı veri paketi oluşma ihtimali düşüktür.

TMDSPLCKITV4 bordlarla gerçekleştirilen omik ve endüktif karakteristikli laboratuvar deneylerinde IM programı istatistik sekmesinden veri iletimi hızı değerleri bps cinsinden test süresi boyunca görülebilmektedir. Testler sonlanıp nihai grafikler oluştuğunda bu veri hızı değerleri sıfırlanmaktadır. Tablo 4.1’de CENELEC-A bandı 36 kHz – 91 kHz frekans aralığında G3-PLC standardı modülasyon türleri için deney açıklamalarındaki PPDU parametrelerinde yapılan testlerdeki veri iletim hızları görülmektedir.

Tablo 4.1. G3-PLC Standardı PHY Katmanı Veri Hızları

Hız Ölçüm Parametresi	ROBO	BPSK	QPSK	SPSK
PHY Zamanında Çıktı Hızı (bps)	6475	25899	51799	77697
PHY Gerçek Veri Çıktı Hızı (bps)	5009	12960	19358	22278
PHY Ortalama Çıktı Hızı (bps)	5742	19430	35579	49988

Veri hızları IM programında zamanında çıktı hızı ve gerçek veri çıktı hızı olmak üzere iki farklı şekilde gösterilmektedir. Veri hızları en yüksekte düşüğe doğru 8PSK, QPSK, BPSK, ROBO şeklinde sıralanmaktadır. En düşük veri hızına sahip ROBO mod, laboratuvar deneylerinde en düşük BER grafiklerine sahip en sağlam ve hatasız modülasyon türü olarak tespit edilmiştir. En yüksek veri hızına sahip 8PSK modülasyon

türü ise en fazla hatalı veri biti ve veri paketi oluşumu gerçekleştiren en yüksek BER grafiklerine sahip modülasyon türü olarak tespit edilmişti.

4.3. Sahada Uzaktan Sayaç Okuma Uygulaması

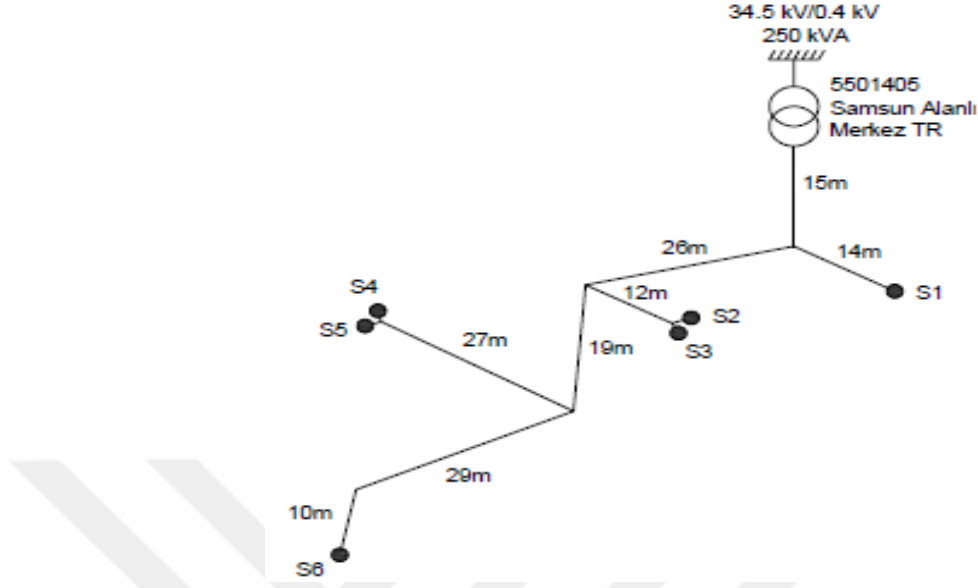
Haberleşme yöntemi PLC kullanılarak gerçek zamanlı uzaktan sayaç okuma saha uygulaması, Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Şirketi mesken tarife türündeki tüketicilerin ağırlıklı olduğu, şehir merkezi dışında, havai dağıtım hattına sahip, 250 kVA dağıtım trafosu bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Uygulamaya dahil edilen tüketim noktalarındaki elektrik sayaçları, PLC modemler, DC ve merkezi yazılım bileşenleriyle AMR sistemi kurgusu oluşturulmuştur. Şekil 4.23'te PLC ile uzaktan sayaç okuma uygulaması yapılan sahanın genel görünümü gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Uzaktan Sayaç Okuma Uygulama Sahası Genel Görünüm

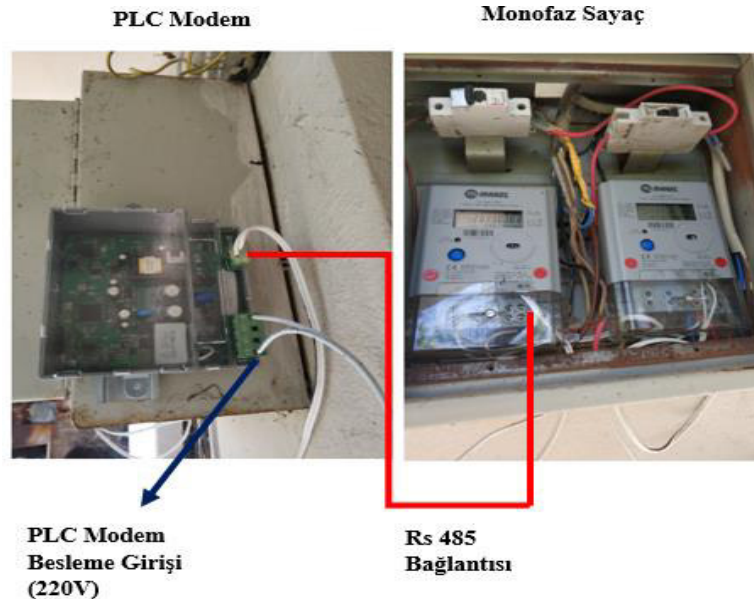
250 kVA dağıtım trafosu dört adet AG çıkışa sahiptir. Uygulama için dağıtım trafosunun bir adet AG çıkışı seçilmiş olup, PLC modem montajı, seçilen çıkıştan beslenen mesken tarife grubundaki tüketim noktalarındaki sayaçlara yapılmıştır. DC montajı ise dağıtım trafosu AG panosu içerisine yapılmıştır. PLC modem bağlantısıyla akıllı yapıya sahip olan sayaçlar, mevcut AG dağıtım hattını kullanarak verici ve alıcı şeklinde çalışan bir ağ oluşturarak noktadan noktaya sayaç okuma verilerinin iletimini sağlayarak, verileri toplama görevi yapan DC'ye taşımaktadırlar. Bu saha uygulamasında PLC modemler, NB-PLC CENELEC-A bandı 36 kHz – 91 kHz frekans aralığında, OFDM tabanlı G3-PLC standardı ROBO modülasyon türü

parametrelerinde çalıştırılmıştır. Şekil 4.24'te AG dağıtım şebekesinde uygulama yapılan trafo ve akıllı sayaçların bulunduğu tek hat şeması gösterilmektedir.



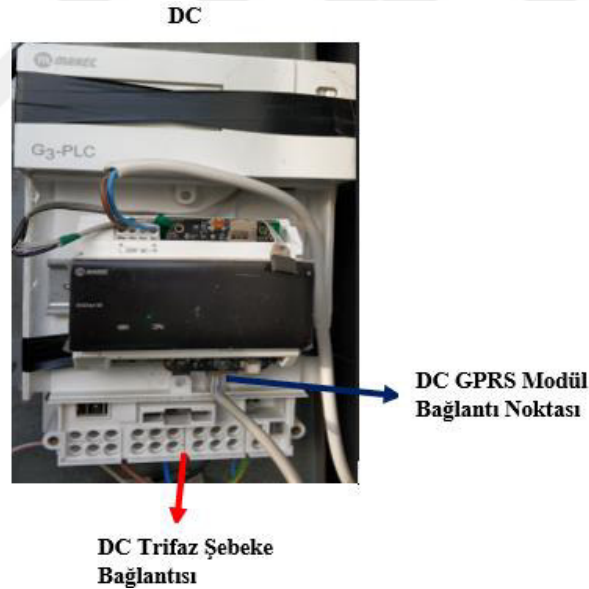
Şekil 4.24. AG Dağıtım Şebekesinde Akıllı Sayaçların Konumu

Bu uygulamada harici iki donanım olarak kullanılan PLC modemler ve monofaz elektrik sayaçları, birbirine Rs 485 port üzerinden bağlanarak haberleşmeleri sağlanmış ve akıllı hale getirilmiştir. Bu bağlantı tipinin dışında PLC modemin, sayacın klemens kapağı üstünde ya da gövdesinde tek donanım olarak bütünleşik şekilde bulunduğu bağlantı şekilleri de mevcuttur. Şekil 4.25'de PLC modem ve monofaz sayacın uygulama yapılan sahadaki bağlantıları görülmektedir.



Şekil 4.25. PLC Modem ve Sayaç Bağlantısı

DC, dağıtım trafosu sekonder tarafında bulunan AG dağıtım panosu içerisine üç faz bağlantı yapılarak monte edilmiştir. Üç fazlı bağlantı sayesinde akıllı sayaçlar hangi fazdan veri iletişimi yaparsa o fazı tespit edebilmekte ve sayaçları seri numarasına göre kimliklendirebilmektedir. DC üzerinde bulunan tek bir GPRS modülle sadece tek bir sim kart kullanılarak, PLC teknolojisi sayesinde dağıtım hizmet sağlayıcıya ait mevcut AG dağıtım hattı kullanılarak DC cihazına kadar taşınmış akıllı sayaçların okuma sonuçları verileri, AMR yazılımına sahadan gönderilmektedir. Eğer PLC teknolojisi kullanılsaydı, akıllı sayaçları uzaktan okumak için her bir akıllı sayaçta ayrı bir GPRS veri hattı tesis edilecek ve ortaya sim kart bedeli, telsiz kullanım bedeli, telsiz ruhsat bedeli, veri hattı havuzu kullanım gibi maliyetler ortaya çıkmış olacaktı. Saha uygulamasındaki dağıtım trafosunun başka AG çıkışındaki o anki saha şartlarına göre bir denemede, DC'ye en yakın konumdaki akıllı sayacın, DC'ye olan mesafesinin 35m'den fazla olduğu durumda DC cihazına sayaç okuma verilerinin iletiminin gerçekleştirmediği gözlemlenmiştir. Bu durum sinyal zayıflaması ile açıklanabilmektedir. Şekil 4.26'da DC yapısı ve bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 4.26. DC Yapısı ve Bağlantısı

PLC modemle beraber oluşturulan akıllı sayaç ve DC ünitesiyle beraber AMR sisteminin temel bileşenlerinden bir tanesi de AMR yazılımıdır. AMR yazılımı iki bölümden oluşmaktadır. Bunlardan bir tanesi merkezi yazılım diğeri ise kullanıcı ön yüzüdür. DC tarafından ham veri olarak AMR merkezi yazılımına gönderilen sayaç okuma sonuçları merkezi yazılım veri tabanında oluşturulan kurallara göre işlenerek kullanıcı ön yüzü bölümüne aktarılmaktadır. Bu saha çalışmasında başarılı şekilde

PLC modemlerle dağıtım trafosu AG panosunda bulunan DC ünitesine taşınan tek fazlı aktif enerji ölçümü yapılan sayaç okuma sonuçları, sayaç seri numarasında DC ünitesinden AMR merkezi yazılımına gerçek zamanlı olarak başarılı bir şekilde gönderilmiş ve bu durum kullanıcı ön yüzünden sayaç seri numarası bazında zaman damgasıyla görüntülenmiştir. Şekil 4.27’de AMR yazılımı kullanıcı ön yüzünde G3-PLC standardında çalışan PLC modemlerle uzaktan sahadan elde edilen gerçek zamanlı akıllı sayaç okuma sonuçları, uygulamada kullanılan akıllı sayaçların seri numarası bazında görülmektedir.

MAKEL OTOMATİK SAYAÇ OKUMA SİSTEMİ

AnaSayfa | Kullanıcı | Tesisat Şeması | Okumalar | Raporlar | Uyarı Mesajları | Modem İşlemleri | Hesabım

Sütunları Gizle | Çıkart | Filtre

Bu ayın başından itibaren okunan son endeksler

Okunan Son Endeks Bilgileri (Bu ayın başından itibaren)

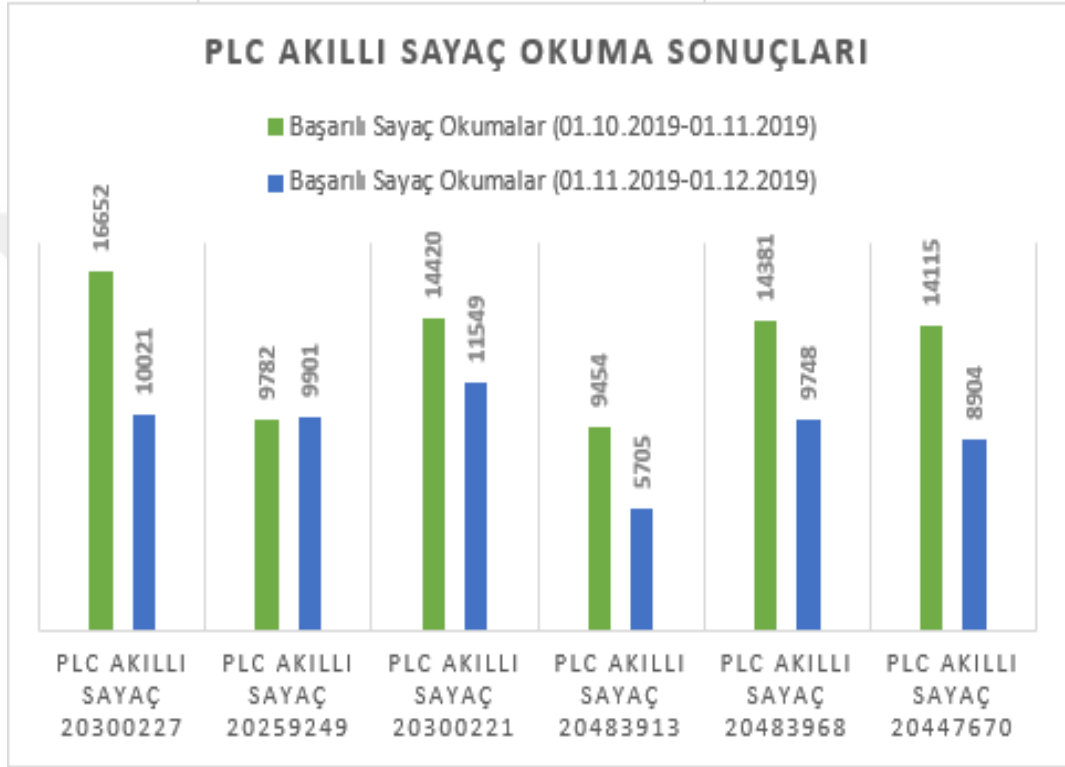
Sütun başlığını o sütuna göre gruplamak için buraya sürükleyin

Tesisat No	Seri No	Sayaç Adı	Tarih	Aktif(kWh)	Tarife 1(kWh)	Tarife 2(kWh)	Tarife 3(kWh)	Demand(kW)	Demand Tarihi
	20300227	YEDAŞ PLC Sayaç 20300227	26.11.2019 02:28:45	5.998,125	2.672,209	1.304,361	2.021,555	8,480	06.11.2019 07:45:00
	20300221	YEDAŞ PLC Sayaç 20300221	26.11.2019 02:27:40	2.566,886	1.174,099	655,304	737,483	5,828	01.11.2019 21:45:00
	20259249	YEDAŞ PLC Sayaç 20259249	26.11.2019 02:25:04	3.490,013	1.631,226	913,076	945,711	3,756	03.11.2019 13:45:00
	20447670	YEDAŞ PLC Sayaç 20447670	25.11.2019 19:22:46	191,058	24,302	49,474	117,282	0,500	11.11.2019 21:45:00
	20483968	YEDAŞ PLC Sayaç 20483968	25.11.2019 19:20:01	1.441,614	524,836	378,206	538,572	0,336	01.11.2019 20:30:00
	20483913	YEDAŞ PLC Sayaç 20483913	24.11.2019 15:31:08	4.580,772	2.446,134	944,395	1.190,243	7,036	10.10.2019 19:00:00

Şekil 4.27. AMR Sonuçları Görüntüsü

Sayaç üzerinde bulunan üç zamanlı tarife türüne göre aktif enerji ölçüm endeksleri T_0 (Toplam endeks - 1.8.0 obis kodu), T_1 (06:00-17:00 zaman aralığı endeksi - 1.8.1 obis kodu), T_2 (17:00-22:00 zaman aralığı endeksi - 1.8.2 obis kodu), T_3 (22:00-06:00 zaman aralığı - 1.8.3 obis kodu), Demand (Maksimum güç endeksi - 1.6.0 obis kodu) sayaç okuma sonuçları gösterilmektedir. Bu endeksler dışında sayacın özelliğine göre farklı obis kodlarıyla klemens kapağı açılma, faz kesinti bilgileri, akım-gerilim ölçümleri gibi verilerin bulunabileceği, kısa okuma paketi, uzun okuma paketi ve yük profili şeklinde sayaç okuma paketleri okuma zaman aralıkları belirlenerek AMR yazılımı marifetiyle oluşturulabilmektedir.

NB-PLC türünde, CENELEC-A bandı 36 kHz – 91 kHz frekans aralığı G3-PLC standardı ROBO modülasyonu kullanılarak oluşturulan PLC modemlerle iki ay boyunca sahadan başarılı şekilde elde edilen, anlık sayaç okuma, kısa okuma paketi okumaları, uzun okuma paketi okumaları, yük profili okumaları olmak üzere tüm akıllı sayaç okuma verileri AMR yazılımından çekilerek Şekil 4.28’de gösterilen PLC özellikli akıllı sayaç okuma sayıları toplamını gösteren grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.28. PLC Akıllı Sayaç Okuma Sonuçları Toplam Sayısı

Grafikte Ekim ve Kasım aylarına ait AMR yazılımına ulaşan başarılı sayaç okuma adetleri sayaç seri numarası bazında görülmektedir. PLC sayaçların çoğunda başarılı okuma sonuçlarının kasım ayında ekim ayına kıyasla kayda değer şekilde düştüğü görülmektedir. Sayaç bazında stabil olmayan bu durum, dağıtım şebekesinin dinamik, değişken yapısı ile açıklanabilmektedir. Bu düşüşe rağmen başarılı okuma sayıları yüksektir. Her ne kadar düzenli bir sayaç okuma süreci oluşmasa da mesken tarifeli tüketicilerin faturalama süreçleri için ayda bir kez okunmasının yeterli olduğu dikkate alındığında, PLC teknolojisiyle, uzaktan sayaç okuma süreci için gerekli olan sayaç okuma sonuçlarının, bu saha şartları ve mesken tüketici grubu için yeterli olabilecek şekilde elde edildiği yorumu ortaya çıkmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında PLC yöntemiyle veri iletimi, laboratuvar ortamında oluşturulan farklı deney düzenekleri ve AG dağıtım şebekesinde oluşturulan akıllı sayaç okuma modeliyle araştırılmıştır.

Laboratuvar ortamı deneylerinde, Tx ve Rx olarak konumlandırılan, TI TMDSPCKITV4 geliştirme bordları, NB-PLC türü, CENELEC-A bandı 36 kHz – 91 kHz frekans aralığında, OFDM tabanlı, G3-PLC standardı ile programlanmıştır. Bu standarda ait ROBO, BPSK, QPSK ve 8PSK faz kaydırmalı modülasyon türleri, 5m, 25m, 55m mesafelerde, yüksüz, 1000W sabit yük, 3300W sabit yük ve 1500W darbeli değişken yük, omik ve endüktif düzeneklerde test edilmiştir. ZCG programıyla veri dosyası iletimi deneyinde, 4 kB boyutunda monofaz sayaç uzun okuma paketi verilerini içeren dosya Tx noktasından Rx noktasına başarılı şekilde iletilmiştir. Yapılan deneylerde RSSI değerlerinin 112-116 dB μ V aralığında ölçülmüştür ve bu küçük sinyal değişimleri laboratuvar ortamında sinyal zayıflaması sebebiyle veri iletiminde hataya sebep olmamıştır. IM programı PYH test modu, PPDU parametreleriyle yapılan deneylerde elde edilen modülasyon türleri BER grafikleri, en düşük hata oranından en yüksek hata oranına doğru sıralandığında modülasyon türleri arasında ROBO, BPSK, QPSK, 8PSK şeklinde bir sıralama oluşmuştur. En düşük bit hata oranları ROBO modülasyonunda görülürken en yüksek hata bit hata oranları 8PSK modülasyon türünde görülmüştür. BPSK modülasyonu ile elde edilen BER ve PER değerlerinin ROBO modülasyonu kadar düşük olmasa da ROBO modülasyonuna yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi ROBO modülasyon türünün, BPSK modülasyon şemasının aynısını kullanarak ikili faz kaydırmalı anahtarlama yapısına sahip olmasıdır. ROBO modülasyonunda en düşük BER değerleri görülmesinin nedeni ise, Şekil 3.14'te verilmiş G3-PLC standardı blok diyagramındaki serpiştirici bloğundaki "RC4 Sağlamlık" bölümüdür. ROBO modülasyonu, BPSK modülasyon şeması ve ek olarak "RC4 Sağlamlık" yapısını beraber kullanarak, her bir veri giriş bitini dört kez tekrarlayarak çıkış veri bitlerini oluşturmakta ve böylece hata oluşma ihtimalini düşürmektedir. 1500W darbeli değişken yüklerde yapılan deneylerde tüm modülasyon türleri için, SNR değerlerin düştüğü, dalgalanarak düzensiz seyrettiği SNR grafikleri ve en yüksek bit hata oranının olduğu BER grafikleri elde edilmiştir. QPSK ve 8PSK modülasyonlarında düşük seviyede seyreden SNR değerleri ve çok yüksek çıkan BER ve PER değerleri hatalı

veri bit sayıları ve hatalı veri paketi sayıları oluşumuna sebep olmuştur. ROBO ve BPSK modülasyonlarında SNR değerleri düşmüş ve BER değerleri sabit yük ve yüksüz durumlardaki sonuçlara göre ciddi oranda artış göstererek hata biti sınırına yaklaşmış olsa da herhangi bir hatalı veri biti sayısı ve veri paketi sayısı oluşmamıştır. Değişken darbeli yük deneyleriyle beraber azalarak kötüleşen SNR değerleri ve yükselen BER değerleriyle, PLC ile veri iletimini bozan en önemli faktörün PLC haberleşme kanalındaki anlık darbeli değişken yük durumu olduğu tespit edilmiştir. Deneyler sırasında gözlemlenen modülasyon türleri veri iletim hızlarının “bps” cinsinden en yüksekten en düşüğe göre sıralanışı 8PSK, QPSK, BPSK, ROBO şeklindedir. En yüksek BER değerine sahip 8PSK modülasyonun en yüksek veri iletimi hızına, en düşük BER değerine sahip ROBO modülasyonun en düşük veri iletim hızına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durumla beraber uzaktan akıllı sayaç okuma süreci göz önüne alındığında, okuma hızından ziyade önemli olan hatasız okuma sonuçlarını elde etmek olduğu için veri biti hatası oluşturmayacak sağlam modülasyon türleri tercih edilmelidir. Bu sebepten G3-PLC standardı ile yapılacak uzaktan sayaç okumalardaki kullanılacak PLC modem ROBO modülasyon türünde çalıştırılmalıdır.

Saha uygulamasında, PLC modemlerle beraber oluşturulan akıllı sayaç yapısı, DC ve AMR yazılımı kullanılarak, PLC yöntemiyle haberleşmenin sağlandığı AMR modeli oluşturulmuştur. Mesken ağırlıklı tüketicilerin bulunduğu şehir merkezinden uzak AG dağıtım şebekesi sahasında PLC modemler, NB-PLC türünde CENELEC-A bandı 36 kHz – 91 kHz frekans aralığında, OFDM tabanlı G3-PLC standardı ROBO modülasyon türünde çalıştırılmışlardır. PLC modemlerle, sayaç okuma türleri anlık okuma, kısa okuma, uzun okuma ve yük profili sonuçları başarılı şekilde dağıtım trafosu AG panosundaki DC ünitesine aktarılmıştır. DC ünitesi vasıtasıyla uzaktan AMR yazılımına aktarılan başarılı PLC akıllı sayaç okuma sonuçları AMR kullanıcı ön yüzünden görüntülenmiştir. İki ay boyunca elde edilen tüm başarılı okuma sonuçları incelendiğinde, zaman aralığı ve okuma adedi açısından belirli bir düzen içerisinde okuma sonuçlarının elde edilmediği görülmüştür. Bu durumun temel sebebi ise dağıtım şebekesinin dinamik değişken yapısı sebebiyle anlık anahtarlamalar oluşması, şebeke yük durumunun değişmesi nedeniyle empedans değişikliği ve gürültü oluşumlarıdır. Bu duruma rağmen başarılı okuma sayıları adedi oldukça fazladır. Bu sebepten özellikle daha az değişken şebeke karakteristiği ortaya

koyabilecek, şehir merkezi dışındaki coğrafyalarda, dağıtım trafosu ile tüketim noktalarındaki sayaçlar arası mesafenin fazla olmadığı mesken tüketici ağırlıklı noktalarda PLC yöntemiyle sayaç okuma işlemlerinin yürütülmesi mümkündür. Mesken tarife grubu tüketicilerin mevcut süreçte ayda sadece bir kez sayaç okuma yapılarak faturalama süreçlerinin yürütülmesi bu durumu desteklemektedir. Saha uygulamasında tüm sayaçların mevcut AG dağıtım şebekesi kullanılarak okunması ve sadece DC ünitesinde bir adet GPRS veri hattı kullanılması haberleşme maliyetlerini düşürmektedir. PLC yönteminde sayaçlar bağlı oldukları dağıtım trafosu bazında okunmak zorunda oldukları için dağıtım trafosu AG dağıtım panosuna tesis edilecek toplan tüketim ölçüm sayacı ile PLC akıllı sayaç okuma sonuçları karşılaştırılarak kayıp kaçak takibinin daha etkin şekilde yapılması sağlanmış olacaktır.

Dağıtık üretim tesislerinin yaygınlaşması, elektrikli araçlar kullanımı ve şarj istasyonları ihtiyacının artması, enerji depolama sistemlerinin dağıtım şebekelerine entegre olması ve dinamik tarifeye fiyatlandırma gibi tarife yapılarının ortaya çıkmasıyla tüketicilerin ve hizmet sağlayıcıların uzaktan veri takip gereksinimleri artacak ve böylece AMR ve AMI yapıları önemi daha da çok ön plana çıkacaktır. Bu durumla beraber AMR ve AMI sistemlerinin temel bileşeni olan haberleşme metotları çok daha fazla önem kazanacaktır. Bu sebepten mevcut haberleşme yöntemlerinden en yüksek verimle faydalanılmalıdır. PLC yöntemi AMR ve AMI uygulamaları için kullanılabilir bir haberleşme yöntemidir. PLC yöntemi kullanılarak transformatörlerin sekonder noktasından primer noktasına veri iletimini sağlayabilmek ve OG şebekeyi kullanarak trafodan trafoya veri iletiminin geliştirilmesi gelecekte yapılabilecek çalışmalardandır.

KAYNAKLAR

- Adami, J.F., Silveira, P.M., Martinez, M.L.B., Perez, R.C. and Dallbello, A.C. (2009). New approach to improve high-voltage transmission line reliability. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 24(3). 1515-1520. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2013669>
- Arechalde, I., Castro, M., Borreguero, I.G., Sendín, A., Urrutia, I. and Fernandez, A. (2017). Performance of PLC communications in frequency bands from 150 kHz to 500 kHz. *2017 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)*. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2017.7897123>
- Avancini, D.B., Rodrigues, J.J.P.C., Martins, S.G.B., Rabelo, R.A.L., Al-Muhtadi, J. and Solic, P. (2019). Energy meters evolution in smart grids: A review. *Journal of Cleaner Production*. 217(2019). 702-715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.229>
- Avram, S. (2016). Power line communication channel noise source detection using smart meters. *12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISETC.2016.7781067>
- Ayan, A. (2017). *Akıllı şebekeler kapsamında meskenlerde talep tarafı yönetimi ve enerji verimliliği*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Başayar, T. (2019). *Alçak gerilim güç hattı haberleşmesinde kablo uzunluğu ve hattaki empedans değerlerine göre BER/SNR analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Berger, L.A., Schwager, A. and Garzas, J.J.E. (2013). Power line communications for smart grid applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2013. 1-16. <https://doi.org/10.1155/2013/712376>
- Borovina, D., Zajc, M., Mujcic, A., Tonello, A. and Suljanovic, N. (2020). Error performance analysis and modeling of narrow-band PLC technology enabling smart metering systems. *International Journal of Electrical Power & Energy System*. 116(2020). 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105536>
- Bouassam, H., Rifi, M. and Degardin, V. (2015). Impact of loads on insertion gain and capacity for MIMO PLC channels. *International Conference on Electrical and Information Technologies*. 150-153. <https://doi.org/10.1109/EITech.2015.7163002>
- Carvalho, R.S., Sen, P.K., Ramos, L.K. and Canha L.N. (2018). Communication system design for an advanced metering infrastructure. *2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. 62-67. <https://doi.org/10.1109/SEGE.2018.8499505>
- Cataliotti, A. and Tine, G. (2009). On the model of MV power line communication system in the case of line-to-line transmission. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*. 892-895.
- Cavdar, I.H. and Karadeniz, E. (2008). Measurements of impedance and attenuation at CENELEC bands for power line communications systems. *Sensors* 2008. 8(12). 8027-8036. <https://dx.doi.org/10.3390%2Fs8128027>
- CENELEC (2011). Physical layer specification. *PLC G3 Physical Layer Specification and PLC G3 MAC Layer Specification*. (s. 14-35). Retrieved January 13, 2020, from <http://www.cenelec.eu>
- Choi, S., Lee, W., Yun, S. and Rhee, Y. (2008). SoC design and implementation for high reliable narrow-band power-line communications. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. 399-403. <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2008.4510462>

- Piante, M. and Tonello, A. (2015). Transmitter front-end for impulsive broad band power line communications. *IEEE 5th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*. 195-199. <https://doi.org/10.1109/ICCE-Berlin.2015.7391232>
- Depuru, S.S.S.R., Wang, L. and Devabhaktuni, V. (2011). Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(6). 2736-2742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.039>
- EPDK (2018). Kurul tarafından onaylanan, Dağıtım Şirketlerinin OSOS'ları kapsamında yer alması zorunlu olan aktif elektrik enerjisi tüketim limiti değerleri. *Elektrik Piyasası Yönetmelikleri*. Erişim: 25 Ağustos 2020, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/SiteSearch?st=osos&psId=&srcType=>
- Ercan, S.U., Ozgonenel, O. and Thomas, D.W.P. (2018). Power line communication channel for smart grid. *2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)*. 208-212. <https://doi.org/10.1109/SGCF.2018.8408974>
- Ercan, S.U., Ozgonenel, O., Haj, Y.E., Christopoulos, C. and Thomas, D.W.P. (2017). Power line communication design and implementation over distribution transformers. *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. 190-194.
- Erlinghagen, S., Lichtensteiger, B. and Markard, J. (2015). Smart meter communication standards in Europe – a comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 43(2015). 1249-1262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.065>
- Fernandez, I., Vega, D.D.L., Roggo, D., Stiegler, R., Capponi, L., Angulo, I., Meyer, J. and Arrinda, A. (2019). Comparison of measurement methods of LV grid access impedance in the frequency range assigned to Nb-Plc technologies. *Electronics* 2019. 8(10). 1-21. <https://doi.org/10.3390/electronics8101155>
- Foudeh, H. and Mokhtar, A. (2015). Automated meter reading and advanced metering infrastructure projects. *9th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference*. 1-6. <https://doi.org/10.1109/JIEEEEC.2015.7470753>
- Galli, S., Scaglione, A. and Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *Proceedings of the IEEE*. 99(6). 998-1027. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2109670>
- Garrab, A., Bouallegue, A. and Abdallah, F.B. (2012). A new AMR approach for energy saving in smart grids using smart meter and partial power line communication. *First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*. 263-269. <https://doi.org/10.1109/REJET.2012.6195281>
- Gotz, M., Rapp, M. and Dostert, K. (2004). Power line channel characteristics and their effect on communication system design. *IEEE Communications Magazine*. 42(4). 78-86. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2004.1284933>
- Goyal, A. (2013). *Performance enhancement of power line communication using OFDM and CDMA*. Master thesis, Department of Electronics and Communication Engineering National Institute of Technology Rourkela, Odisha.
- Hadlach, H., Touijer, H., Zahri, M., Alami, M.E. and Habibi, M. (2017). Modeling of a smart grid monitoring system using power line communication. *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. 1-4. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477312>
- Hoch, M. (2011). Comparison of PLC G3 and PRIME. *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. 165-169. <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2011.5764384>

- İrgan, H. (2019). *Enerji hattı iletimiyle akıllı şebekeler için uzaktan izleme sistemi tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Nevşehir.
- ITU-T (2017). Physical layer specification. *Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks*. (s. 8-40). Retrieved December 21, 2020, from <http://handle.itu.int/11.1002/1000/13333>
- Kabalci, E. and Kabalci, Y. (2013). A measurement and power line communication system design for renewable smart grids. *Measurement Science Review*. 13(5). 248-252. <https://doi.org/10.2478/msr-2013-0037>
- Kabalci, Y. (2016). A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57(2016). 302-318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.114>
- Khazaei, M., Safa, M.M., Ghasempour, M. and Delavari, H. (2017). Distribution loss reduction in residential and commercial pilots by using AMI system. *24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*. 1711-1714. <http://dx.doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0500>
- Lampe, L. et al. (2016). *Power line communications principles, standards and applications from multimedia to smart grid*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Lee, J., Lee, E. and Park, S. (2012). Coexisting V2G PLC between G3 and HomePlug GP using dual PHY. *International Conference on ICT Convergence (ICTC)*, 620-621. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2012.6387127>
- Li, P.H., Tsai, C.H., Chen, C.H. and Chen, P.C. (2018). High connectivity, low power, low cost advanced metering infrastructure. *2018 3rd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*. 1-3. <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2018.8393554>
- Lisowski, M., Masnicki, R. and Mindykowski, J. (2017). Preliminary research on predictive sparse reporting in low-voltage network PLC-based metering. *2017 3rd International Conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing (EBCCSP)*. 1-5. <https://doi.org/10.1109/EBCCSP.2017.8022806>
- Llano, A., Angulo, I., Vega, D.L.L. and Marron, L. (2020). Virtual PLC lab enabled physical layer improvement proposals for PRIME and G3-PLC standards. *Applied Sciences*. 10(5). 1-21. <https://doi.org/10.3390/app10051777>
- Long, X., Parent, W. and Staff, E. (2015). Influence of power quality on Fortis Alberta's PLC based automatic meter reading system. *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. 164-168. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2015.7379944>
- Lopez, G., Matanza, J., Vega, D.D.L., Castro, M., Arrinda, A., Moreno, J.I. and Sendin, A. (2019). The role of power line communications in the smart grid revisited: applications, challenges, and research initiatives. *IEEE Access*. 7. 117346-117368. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928391>
- Malek, M., Ketel, D., Hirsch, H. and Trautmann, M. (2016). Immunity of smart meters against communication signals. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. 1-6. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2016.7778785>
- Masood, B. and Baig, S. (2016). Standardization and deployment scenario of next generation NB-PLC technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 65(2016). 1033-1047. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.060>
- Masood, B., Nazar, W. and Masood, R. (2018). Channel modeling of low voltage NB-PLC network using statistical and deterministic channel modeling approaches. *2018 7th*

- International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 693-696. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566732>
- Masood, B., Usman, M., Gul, M.U. and Khan, W.A. (2017). Measurements and characterization of power transformer and low voltage access network for NB-PLC. *International Journal of Communication Systems*. 30(2). 1-17. <https://doi.org/10.1002/dac.3344>
- Mello, R.S. and Grivet, M.A. (2006). Modeling, simulation and estimation of PLC channels. *International Telecommunications Symposium*. 201-206. <https://doi.org/10.1109/ITS.2006.4433270>
- Merkulov, A.G. and Shuvalov, S.V.P. (2018). The method of narrow band PLC channels throughput increase. *2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2018.8398810>
- Mlynek, P., Koutny, M., Misurec, J. and Kolka, Z. (2014). Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for street lighting control. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. 238-243. <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2014.6812318>
- Mlynek, P., Misurec, J., Kolka, Z., Slacik, J. and Fujdiak, R. (2015). Narrowband power line communication for smart metering and street lighting control. *IFAC-Papers On Line*. 48(4). 215-219. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.035>
- Mlynek, P., Misurec, J., Koutny, M. and Fujdiak, R. (2014). Transfer function of power line channel influence of topology parameters and power line topology estimation. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2014.7028845>
- Moaveninejad, S., Kumar, A., Scazzoli, D. and Pit, A. (2017). BER evaluation of post-meter PLC services in CENELEC-C band. *IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*. 1-6. <https://doi.org/10.1109/LATINCOM.2017.8240160>
- Moeneclaey, M., Van Bladel, M. and Sari, H. (2001). sensitivity of multiple-access techniques to narrow-band interference. *IEEE Transactions on Communications*. 49(3). 497-505. <https://doi.org/10.1109/26.911457>
- Nazmudeen, M.S.H., Wan, A.T. and Buhari, S.M. (2016). Improved throughput for power line communication (PLC) for smart meters using fog computing based data aggregation approach. *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ISC2.2016.7580841>
- Ndjiongue, A.R. and Ferreira, H.C. (2019). Power line communications (PLC) technology: More than 20 years of intense research. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 30(7). 1-20. <https://doi.org/10.1002/ett.3575>
- Ngcobo, T. and Ghayoor, F. (2019). Study the topology effect on a G3-PLC based AMI network. *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*. 629-633. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704772>
- Oliveira, L.G., Colen, G.R., Ribeiro, M.V. and Vinck, A.J.H. (2016). Narrow-band interference error correction in coded OFDM-based PLC systems. *International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)*. 13-18. <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2016.7476279>
- Ozgonenel, O., Thomas D.W.P. and Ercan, S.U. (2017). Power line communication through distribution transformers in smart grid. *2017 40th International Conference on*

- Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 255-258. <https://doi.org/10.1109/TSP.2017.8075981>
- Pagani, P. and Schwager, A. (2016). A Statistical model of the In-Home MIMO PLC channel based on European field measurements. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*. 34(7). 2033-2044. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2566158>
- Park, B.S., Hyun, D.H. and Cho, S.K. (2002). Implementation of AMR system using power line communication. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. 18-21. <https://doi.org/10.1109/TDC.2002.1178253>
- Pavlidou, N., Vinck, A.J.H., Yazdani, J. and Honary, B. (2003). Power line communications: state of the art and future trends. *IEEE Communications Magazine*. 41(4). 34-40. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1193972>
- Rao, R., Akella, S. and Guley, G. (2011). Power line carrier (PLC) signal analysis of smart meters for outlier detection. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. 291-296. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2011.6102335>
- Sharma, K. and Saini, L.M. (2015). Performance analysis of smart metering for smart grid: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 49(2015). 720-735. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.170>
- Sharma, K. and Saini, L.M. (2017). Power-line communications for smart grid: progress, challenges, opportunities and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 67(2017). 704-751. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.019>
- Shlebik, T., Fadel, A., Mhereeg, M. and Shlebik, M. (2017). The development of a simulation-based smart grid communication management system using MATLAB. *International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*. 1-7. <https://doi.org/10.1109/GECS.2017.8066153>
- Shrestha, M., Johansen, C., Noll, J. and Roverso, D. (2020). A methodology for security classification applied to smart grid infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 28(2020). 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2020.100342>
- Slacik, J., Mlynek, P., Fujdiak, R. and Dobesova, K. (2017). Experimental measurements of multi-carrier power line communication systems. *40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 91-96. <https://doi.org/10.1109/TSP.2017.8075943>
- Sönmez, M.A. (2014). *Alçak gerilim enerji hatlarında darband haberleşme için gürültülerin sınıflandırılması, modellenmesi ve kanal empedans ölçümü*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Tang, L., So, P.L., Gunawan, E., Chen, S., Lie, T. T. and Guan, Y. L. (2000). Characterization of power distribution lines for high-speed data transmission. *International Conference on Power System Technology*. 445-450. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2000.900098>
- TI (2014). System on module for industrial power line communication (CENELEC) design guide. *Technical Document*. (s. 1-53). Retrieved July 19, 2019, from <https://www.ti.com/lit/pdf/tidu501?keyMatch=TIDU501&tisearch=search-everything>
- TI (2015a). TI PLC development kit user guide-General. *Technical Document*. (s. 1-12). Retrieved July 22, 2019, from <https://www.ti.com/>
- TI (2015b). TI PLC development kit user guide-Zero configuration GUI. *Technical Document*. (s. 1-55). Retrieved July 22, 2019, from <https://www.ti.com/>
- TI (2015c). TI PLC development kit user guide- Flashing firmware. *Technical Document*. (s. 1-12). Retrieved July 22, 2019, from <https://www.ti.com/>

- Tran-Anh, T., Auriol, P. and Tran-Quoc, T. (2005). Distribution network modeling for power line communication applications. *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. 361-365. <https://doi.org/10.1109/ISPLC.2005.1430531>
- Turan, M.T. (2014). *Akıllı şebekelerde arıza analizi ve koruma*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Usman, A. and Shami, S.H. (2013). Evolution of communication technologies for smart grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 19(2013). 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.002>
- Villiers, W.D., Cloete, J.H., Wedepohl, L.M. and Burger, A. (2008). Real-time sag monitoring system for high-voltage overhead transmission lines based on power-line carrier signal behavior. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 23(1). 389-395. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905550>
- Yigit, M., Gungor, V.C., Tuna, G., Rangoussi, M. and Fadele, E. (2014). Power line communication technologies for smart grid applications: A review of advances and challenges. *Computer Networks*. 70(2014). 366-383. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.06.005>
- Zheng, J., Gao, D.W. and Lin, L. (2013). Smart meters in smart grid: An overview. *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. 57-64. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2013>