

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİNİN YAPAY ARI
KOLONİSİ ALGORİTMASIYLA KESTİRİMİ**

HAZIRLAYAN

İSMAİL MERT BÜTÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2021

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİNİN YAPAY ARI
KOLONİSİ ALGORİTMASIYLA KESTİRİMİ**

HAZIRLAYAN

İSMAİL MERT BÜTÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. HAMİT ERDEM

ANKARA - 2021

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde İsmail Mert BÜTÜN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 11 / 01 / 2021

Tez Adı: Elektrik Güç Sistemi Harmoniklerinin Yapay Arı Kolonisi Algoritmasıyla Kestirimi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. İbrahim SEFA (Başkan), Gazi Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Hamit ERDEM (Danışman), Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Selda GÜNEY, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı : İsmail Mert BÜTÜN

Öğrencinin Numarası : 21710294

Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Programı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Prof. Dr. Hamit ERDEM

Tez Başlığı : Elektrik Güç Sistemi Harmoniklerinin Yapay Arı Kolonisi Algoritmasıyla
Kestirimi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 67 sayfalık kısmına ilişkin, / 01 / 2021 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %’dır. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı Unvan, Adı, Soyadı, İmza:

.....

İTHAF

Tamamladığım tezimi yıllar boyu süre gelen elektrik mühendisliği mezunlarına ve gönül vererek içerisinde bulunduğum, canla başla çalıştığım savunma sanayii sektörünün her kademesindeki çalışanlarına ithaf ediyorum.

İsmail Mert BÜTÜN

Ankara – 2021

TEŞEKKÜR

Başta annem Binnaz BÜTÜN ve babam Müfit BÜTÜN olmak üzere, yüksek lisans bitirme tezimde desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Hamit ERDEM'e, projem hakkında beni sürekli cesaretlendiren müdürüm Sayın Tolga COŞKUNFIRAT'a ve şefim Sayın Fatih ŞENER'e, teknik konularda bana destek olan Emre Öner TARTAN'a, çalışmalarımda yanımda olup beni destekleyen müstakbel eşim Hilal YILDIZ'a ve yüksek lisans için destek olan Türk Havacılık ve Uzay Sanayii Anonim Şirketi'ne çok teşekkür ederim.

ÖZET

İsmail Mert BÜTÜN

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİNİN YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASIYLA KESTİRİMİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2021

Elektrik enerjisi talebi gün geçtikçe artmaktadır. Kullanılan doğrusal olmayan yüklerden dolayı güç kalitesi problemleri oluşmaktadır. Güç kalitesi problemlerinden en önemlisi harmoniklerin oluşmasıdır. Harmoniklerin genlik, frekans ve faz açısından doğru tahmini ve engellenmesi, güç kalitesini ve verimi artırır. Yapay zeka ve akıllı sistemlerin gelişmesiyle harmoniklerin tahmini için Fourier dönüşümü temelli algoritmaların yanısıra akıllı yöntemler de kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında harmoniklerin genlik ve faz kestirimi için küçük kareler yöntemi ile yapay arı kolonisi algoritmasından oluşan hibrit bir algoritma geliştirilmiştir. Harmoniklerin genliği en küçük kareler yöntemiyle hesaplanırken faz açıları global optimizasyon algoritması olan yapay arı kolonisi algoritması ile tahmin edilmiştir. Önerilen algoritmanın başarısını benzetim ortamında test etmek için literatürde önerilen iki farklı harmonikli sinyal kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma python yazılımı ortamında denenmiş ve sonuçlar, standart ölçütlere göre, benzer çalışmalarla karşılaştırılarak tartışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Güç Kalitesi, Harmonik, Harmonik Tahmini, Yapay Arı Kolonisi, En Küçük Kareler Yöntemi.

ABSTRACT

İsmail Mert BÜTÜN

ESTIMATION OF ELECTRIC POWER SYSTEM HARMONICS WITH ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Electrical and Electronics Engineering

2021

The demand for electrical energy increases by time. Power quality problems occur due to the non-linear loads used. The most important of the power quality problems is the occurrence of harmonics. The correct estimation and prevention of harmonics in terms of amplitude, frequency and phase improves power quality and efficiency. With the development of artificial intelligence and smart systems, intelligent methods are used to estimate harmonics as well as Fourier transform based algorithms. In this thesis, a hybrid algorithm was developed for amplitude and phase estimation of harmonics. While the amplitude of the harmonics was calculated by the least squares method, the phase angles were estimated by the artificial bee colony algorithm which is a global optimization algorithm. Two different harmonic signals proposed in the literature were used to test the success of the proposed algorithm in the simulation environment. The developed algorithm was tested in the Python software environment and the results were discussed according to standard measures by comparing with similar studies.

KEY WORDS: Power Quality, Harmonic, Harmonic Estimation, Artificial Bee Colony, Least Squares Method.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜÇ KALİTESİ	4
2.1. Geçici Olaylar	6
2.1.1. Darbeli geçici olaylar.....	6
2.1.2. Titreşimli geçici olaylar.....	7
2.2. Kısa Süreli Değişimler	7
2.2.1. Kesinti.....	8
2.2.2. Azalma ve salınma.....	9
2.2.3. Artma.....	9
2.3. Uzun Süreli Değişimler	10
2.3.1. Gerilim yükselmesi	10
2.3.2. Gerilim düşmesi.....	10
2.3.3. Sürekli kesinti.....	11
2.4. Gerilim Dengesizliği.....	11
2.5. Dalga Biçimi Bozulmaları.....	12
2.5.1. DC ofset	12
2.5.2. Harmonikler	12
2.5.3. Ara harmonikler.....	13
2.5.4. Çentik.....	13
2.5.5. Gürültü	14
2.6. Gerilim Dalgalanmaları.....	15

2.7. Güç Frekansı Değişimleri	15
3. HARMONİKLER	16
4. HARMONİK KAYNAKLARI VE HARMONİKLERİN ETKİLERİ	18
4.1. Ark Fırınları	18
4.2. Döner Elektrik Makinaları.....	19
4.3. Transformatörler	21
4.4. Çeviriciler.....	22
4.5. Gaz Deşarj Lambaları	22
4.6. Diğer Harmonik Kaynakları	23
4.7. Harmoniklerin Etkileri.....	24
5. HARMONİK ANALİZİ.....	26
5.1. Fourier Katsayılarının Belirlenmesi	26
5.1.1. Analitik yöntem	26
5.1.2. Grafik yöntemi	27
5.2. Ayırık Fourier Dönüşümü	27
5.3. Hızlı Fourier Dönüşümü.....	28
5.4. Ölçme Yöntemi	29
6. EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ VE YAK TEMELLİ HİBRİT ALGORİTMA İLE HARMONİK KESTİRİMİ.....	30
6.1. En Küçük Kareler Yöntemi	30
6.2. Maliyet Fonksiyonları.....	31
6.2.1. Ortalama hata	32
6.2.2. Ortalama yüzdesel hata.....	32
6.2.3. Ortalama mutlak hata.....	32
6.2.4. Ortalama karesel hata.....	33
6.2.5. Kök ortalama karesel hata.....	33
6.2.6. Ortalama mutlak yüzdesel hata.....	33
6.3. Yapay Arı Kolonisi	33
7. UYGULAMALAR	37
7.1. En Küçük Kareler Yöntemi ve YAK Temelli Hibrit Algoritma Kullanılarak Harmonik Tahmini Uygulaması-1	37

7.2. En Küçük Kareler Yöntemi ve YAK Temelli Hibrit Algoritma Kullanılarak Harmonik Tahmini Uygulaması-2	51
8. SONUÇLAR.....	65
KAYNAKLAR.....	68

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Frekans, gerilim ve harmonik dereceleri	16
Tablo 4.1. Dağıtım transformatörüne ait harmonik spektrum.....	22
Tablo 4.2. Fluoresant lambaya ait harmonik spektrum.....	23
Tablo 7.1. 6 darbeli tam dalga köprü doğrultucu harmonik ölçüm sonuçları	37
Tablo 7.2. İşçi ve gözcü arı yüzdelerinin değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $z=100$, $m=NO$ koşulunda)	39
Tablo 7.3. İterasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	40
Tablo 7.4. Popülasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	41
Tablo 7.5. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_1	42
Tablo 7.6. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_2	42
Tablo 7.7. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_20_1	42
Tablo 7.8. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_20_2	42
Tablo 7.9. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_10_1	43
Tablo 7.10. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_10_2	43
Tablo 7.11. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_0_1	43
Tablo 7.12. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_0_2	43
Tablo 7.13. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$ koşulunda).....	44
Tablo 7.14. DC bileşen içeren sistemin harmonik ölçüm sonuçları	51
Tablo 7.15. İterasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=100$, $y=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	52
Tablo 7.16. Popülasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=100$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	53
Tablo 7.17. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_1	54
Tablo 7.18. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_2	54
Tablo 7.19. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_40_1	54
Tablo 7.20. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_40_2	54
Tablo 7.21. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_20_1	55

Tablo 7.22. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_20_2	55
Tablo 7.23. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_10_1	55
Tablo 7.24. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_10_2	55
Tablo 7.25. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=100$, $y=100$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$ koşulunda).....	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrik güç sistemindeki güç kalitesini belirleyen kriterler	5
Şekil 2.2. Yıldırım darbe akımına ait geçici olay davranışı	6
Şekil 2.3. Sırayla anahtarlanan kondansatörlerin oluşturduğu geçici olay	7
Şekil 2.4. Kısa süreli değişimler	8
Şekil 2.5. Geçici olarak meydana gelen kesinti	8
Şekil 2.6. Gerilim azalması ve salınması	9
Şekil 2.7. Gerilim artışı	10
Şekil 2.8. Sürekli kesinti	11
Şekil 2.9. Üç fazlı doğrultucuya ait %5 ve %15 gerilim dengesizliği durumunda hattın çekilen akımı	12
Şekil 2.10. Çeşitli lineer olmayan yüklere bağlı oluşan harmonik akımları ve bunların frekans spektrumundaki karşılıkları	13
Şekil 2.11. Üç fazlı bir doğrultucuda meydana gelen çentik etkisi	14
Şekil 2.12. Sinüs dalgasında meydana gelen gürültü	14
Şekil 2.13. Ark fırınına ait gerilim dalgalanması	15
Şekil 3.1. Temel bileşen, harmonik bileşenleri ve harmonikli sinyal	17
Şekil 4.1. Ark fırınının eritme ve saflaştırma sırasında oluşturduğu akımlarının harmonik spektrumu	18
Şekil 4.2. Elektrik makinası SEY modeli	19
Şekil 4.3. Elektrik makinası örnek oluk biçimleri	20
Şekil 4.4. Elektrik makinalarındaki örnek rotor topolojileri	21
Şekil 6.1. YAK akış diyagramı	36
Şekil 7.1. 6 darbeli tam dalga köprü doğrultucu içeren elektrik sistemi	37
Şekil 7.2. İşçi ve gözcü arı yüzdelerinin değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $z=100$, $m=NO$ koşulunda)	39
Şekil 7.3. İterasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	40
Şekil 7.4. Popülasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	41

Şekil 7.5. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$ koşulunda)	44
Şekil 7.6. Oluşturulan $X(t)$ sinyali	45
Şekil 7.7. Gürültüsüz $X(t)$ sinyali	45
Şekil 7.8. SNR=20dB gürültülü $X(t)$ sinyali	46
Şekil 7.9. SNR=10dB gürültülü $X(t)$ sinyali	46
Şekil 7.10. SNR=0dB gürültülü $X(t)$ sinyali	47
Şekil 7.11. Gürültüsüz koşulda tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açış değerleri	47
Şekil 7.12. SNR=20dB gürültüde tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açış değerleri	48
Şekil 7.13. SNR=10dB gürültüde tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açış değerleri	48
Şekil 7.14. SNR=0dB gürültüde tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açış değerleri	49
Şekil 7.15. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X(t)$ ve $X_e(t)$	49
Şekil 7.16. 10000_20_20_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X(t)$ ve $X_e(t)$	50
Şekil 7.17. 10000_5_5_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X(t)$ ve $X_e(t)$	50
Şekil 7.18. İterasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=100$, $y=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	52
Şekil 7.19. Popölasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=100$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)	53
Şekil 7.20. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=100$, $y=100$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$ koşulunda)	56
Şekil 7.21. Oluşturulan $X_2(t)$ sinyali	57
Şekil 7.22. Gürültüsüz $X_2(t)$ sinyali	57
Şekil 7.23. SNR=40dB gürültülü $X_2(t)$ sinyali	58
Şekil 7.24. SNR=20dB gürültülü $X_2(t)$ sinyali	58
Şekil 7.25. SNR=10dB gürültülü $X_2(t)$ sinyali	59
Şekil 7.26. Gürültüsüz koşulda tahmin edilen $X_{2e}(t)$ sinyalinin açış değerleri	59
Şekil 7.27. SNR=40dB gürültüde tahmin edilen $X_{2e}(t)$ sinyalinin açış değerleri	60
Şekil 7.28. SNR=20dB gürültüde tahmin edilen $X_{2e}(t)$ sinyalinin açış değerleri	60
Şekil 7.29. SNR=10dB gürültüde tahmin edilen $X_{2e}(t)$ sinyalinin açış değerleri	61
Şekil 7.30. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_40 koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$	61
Şekil 7.31. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_20 koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$	62
Şekil 7.32. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_10 koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$	62

Şekil 7.33. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$	63
Şekil 7.34. 100_20_20_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$	63
Şekil 7.35. 100_5_5_emp0.5_look0.5_noise_NO koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$	64

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

EKKY	En Küçük Kareler Yöntemi
YAK	Yapay Arı Kolonisi
Hz	Hertz
ANSI	American National Standards Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
IEC	International Electrotechnical Commission
pu	per unit
s	saniye
ns	nano saniye
µs	mikro saniye
ms	mili saniye
kHz	kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
kA	kilo amper
VAR	Volt Amper Reaktif
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
BLDC	Brushless DC
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
S	Görünür güç
EMI/EMC	Electromagnetic Interference/ Electromagnetic Compatibility
AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü
FFT	Fast Fourier Transform
MW	Mega Watt
GHz	Giga Hertz
RAM	Random Access Memory
SNR	Signal to Noise Ratio
MF	Maliyet Fonksiyonu
OH	Ortalama Hata
OYH	Ortalama Yüzdesel Hata
OMH	Ortalama Mutlak Hata
OKH	Ortalama Karesel Hata
KOKH	Kök Ortalama Karesel Hata
OMYH	Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata
PS	Popülasyon Sayısı
İS	İterasyon Sayısı
B	Boyut
GA	Genetik Algoritma
PSO	Particle Swarm Optimization
BFO	Bacterial Foraging Optimization
F-BFO	Fuzzy BFO
RLS-BFO	Recursive Least Square BFO
D-YAK-EKKY	Değiştirilmiş Yapay Arı Kolonisi En Küçük Kareler Yöntemi
CPU	Central Processing Unit

GPU	Graphics Processing Unit
RMS	Root Mean Square
V	Volt
T	Tesla
dB	desibel
THD	Total Harmonic Distortion

1. GİRİŞ

TDK sözlüğüne [1] göre elektrik şu şekilde belirtilmiştir:

“Maddenin elektron, pozitron, proton vb. parçacıklarının hareketleriyle ortaya çıkan enerji türüdür.” Özellikle nüfus artışı ve teknolojideki ilerlemeler kaynaklı insanoğlunun elektrik enerjisine ihtiyacı giderek artmaktadır. Bu sebepten elektrik enerjisi talebi günümüzde oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Giderek artan elektrik enerjisi talebiyle birlikte güç kalitesi problemleri ortaya çıkmaktadır. Güç kalitesindeki temel esas, üreticilerden başlayıp iletim ve dağıtım hatlarıyla birlikte tüketicilere kadar uzanan elektrik enerjisi talebinin bozucu etkilerinin incelenmesi ve giderilmesi işlemidir. Bu süreçlerde standartlar bulunmaktadır ve bunlara bağlı olarak belirli sınırlamalar içerisinde elektrik güç ihtiyacının karşılanması talep edilmektedir.

Güç kalitesi bir diğer yandan ekonomik sonuçları da olan bir konudur. Tüketici tarafında elektrik ile çalışan bir cihazın ömrünü doğrudan etkilemektedir. Üreticiler kısmında ise kullanılan generatörlerin yapısı oldukça önemlidir. İletim ve dağıtımda ise hat kayıpları esas konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şehir şebekesi incelendiğinde normal şartlar altında elektrik sinyali sinüzoidal 50 Hz olmalıdır. Bu durum Türkiye’de geçerlidir, başka ülkelerde 60 Hz kullanıldığı durumlar da mevcuttur. Güç kalitesinin temel problemlerinden biri harmoniklerdir. Harmonikler nedeniyle sinüzoidal olan 50 ya da 60 Hz’lik elektrik sinyalinde bozulmalar meydana gelmektedir. Bu da üretimden tüketime olan süreçte bir takım sorunlara yol açmaktadır.

Harmonik kavramında temel bileşen olarak 50 ve 60 Hz’lik sinyallerden bahsedilmektedir. 50 ve 60 Hz’lik sinyallerin tek katları harmoniklerin frekanslarını tanımlamaktadır. Burada 1. kat için temel frekans kavramı kullanılmaktadır. Anlaşılacağı gibi örneğin 3. kat için 150 ve 180 Hz, 5. kat için ise 250 ve 300 Hz olmaktadır. Ayrıca harmoniklerde gerilim genliği mevcuttur. Tüketici tarafında kullanılan elemana bağlı olarak faz farkı da göz önünde bulundurulmaktadır.

Harmoniklerin tahmini güç kalitesinin istenilen seviyede sağlanması bakımından önemlidir. Tahmin için geleneksel ve akıllı yöntemler kullanılabilir. Geleneksel olarak kullanılan yöntemlere Fourier dönüşümü ve Kalman filtre temelli yaklaşımlar örnek verilebilir [2,3,4]. Literatürde ise akıllı yöntemler olarak kullanılan bir çok yöntem

bulunmaktadır. Bu yöntemlerdeki temel esas yapay zeka tekniklerinin sistemdeki verilere uygulanıp, uygun şekilde gerçekleştirilmesidir.

Bir modelde birden çok yerel optimum noktaları bulunabilir. Global optimizasyon olarak tanımlanan kavramda, belirli olan yerel optimumların globalde en iyi çözümün bulunması hedeflenir. Ekonomi, sosyoloji, mühendislik gibi bir çok alanda lineer olmayan problemlerle karşılaşılabilir. Global optimizasyon yaklaşımı çözüm için kolaylık sağlamaktadır.

Global optimizasyon algoritmalarında işlemler stokastik ve deterministik olmak üzere iki çeşittir.

Deterministik yöntemlerde global çözümün bulunması hedeflenir ve olasılıksal kavram içermediklerinden çözüm doğrulanmaktadır. Deterministik algoritmalar,

- Durum yüzey araması,
- Dal ve sinir algoritması,
- Cebirsel geometri

örnek verilebilir.

Stokastik algoritmalar ise,

- Monte Carlo algoritmaları,
- Evrimsel algoritmalar,
- Sürü zekası

gibi yaklaşımlar mevcuttur.

Sinyaller gürültü içerdiklerinde bozulurlar ve uygunluk fonksiyonları ile ilişkilidir. Bu koşullardaki ve boyutların büyüdüğü fonksiyonlarda stokastik algoritmalar avantajlıdır. Çözümler arasındaki ilişki doğrudan olmadığı zaman, uygunluk fonksiyonlarına bağlı oluşan problemlerin deterministik metodlarla çözümü zor olmaktadır [5].

Charles Darwin'in ortaya koyduğu evrim teorisine bağlı olarak, en iyinin yaşaması prensibine dayalı bir şekilde evrimsel algoritmalar oluşturulmuştur. Bir veri setine göre en uygun çözüm bulunmaya çalışılır. Evrim teorisinde en iyiler yaşar. Zayıf olanlar ise ekosistemden elemine olurlar [6].

Geleneksel hesaplama teknikleriyle çözümü zor olan problemler evrimsel algoritmalar kullanılarak daha kolay şekilde çözülmektedir. Bir ekosistemdeki koşullara bağlı olarak çevreye uyum sağlama esası vardır. Evrimsel algoritmalar da belirli bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu sistem çözülecek problem ve sınır koşullardır. Ekosistemdeki gibi evrimsel

algoritmaların sistemlerinde de ihtimaller ve kurallar bulunur. Evrim teorisinde üreme temel amaçlardandır ve mutasyonlar ile doğal seleksiyon ile desteklenir. Evrimsel algoritmalarda da bunlar matematikselleştirilmiştir [7].

Sürü zekası optimizasyon tekniklerinde ise sosyal sistemler temel alınmıştır. Biyolojik bireylerin kendi özelliklerine, çevre koşullarıyla olan ilişkisine ve başka bireylerle olan davranışlarına bağlı olarak sürü zekası sistemleri geliştirilip matematikselleştirilmiştir [8].

Sürü zekası algoritmalarından bir kısmı aşağıdaki gibidir [9]:

- Ateş böceği algoritması,
- Ateş böceği sürü optimizasyonu
- Karınca kolonisi optimizasyonu
- Parçacık sürü optimizasyonu
- Yapay balık sürüsü algoritması
- Yapay arı kolonisi algoritması
- Kurt kolonisi algoritması
- Kedi sürüsü algoritması

Tezde literatürdeki çalışmalar incelenerek yeni yöntemler kullanılması hedeflenmiştir. Yapay arı kolonisi yöntemi harmonikli sinyaldeki faz açılarının kestimi için kullanılmıştır.

İkinci bölümde güç kalitesinin ne olduğu tanımlanmıştır. Güç kalitesini belirleyen kriterler sınıflandırılıp detaylı şekilde açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde harmonik tanımlanmıştır.

Dördüncü bölümde harmonik kaynakları ve etkileri incelenmiştir.

Beşinci bölümde harmonik analizi yöntemleri belirtilmiştir.

Altıncı bölümde en küçük kareler yöntemi ve yapay arı kolonisi algoritması tanıtılmıştır.

Yedinci bölümde literatürdeki koşullarla beraber yazılım çalıştırılıp, sonuçlar kaydedilmiştir.

Sekizinci bölümde ise elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. GÜÇ KALİTESİ

Elektrik sistemleri temelde üretim, iletim, dağıtım ve tüketim disiplinlerini içermektedir. Elektrik enerjisinin kalitesinin belirlenmesinde bu disiplinlerdeki her adımda bir çok etken rol oynamaktadır. Elektrik enerjisinin sürekli olarak enterkonnekte sisteme verilmesi, oluşan gerilimin, frekansın ve harmoniklerin standartlara bağlı olarak sınıflandırılması, faz-faz ya da faz-nötr gerilimlerindeki dengelilik güç kalitesinin belirlenmesindeki çalışma alanlarından [10].

Standardizasyon kurumları, araştırma kurumları, mimar ve mühendisler, gözlemleme araçları üreticileri, güç kontrolü araçları üreticileri, danışmanlar ve tüketiciler güç kalitesinin istenilen seviyede olması için birbirleriyle ilişkili olan paydaşlardır [11]. Standardizasyon kurumları güç kalitesi standartlarını belirlemekle görevlidir. “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” [12], “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği” [13] ve “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliği” [14], ANSI C84.1 [15], IEEE 519-2014 [16], IEC 61000-3-2:2018 [17], IEEE 1159-2019 [18] güç kalitesi ile alakalı standartlardan bazılarıdır. Araştırma kurumları, örneğin üniversiteler, danışmanlar ile birlikte bilimsel temelli yaklaşımlarla literatüre yön verme çalışmasını üstlenirler. Mimar ve mühendisler sistemi kurup, işletmekle sorumludurlar. Gözleme ve güç kontrolü araçlarının üreticileri, ürettikleri sistemlerle mühendislerle işletimde destek olmaktadır. Tüketiciler ise kullandıkları alet ve cihazlarla enterkonnekte sistemin bir parçası olmaktadır.

Bir elektrik güç sistemindeki güç kalitesini belirleyen kriterler geçici olaylar, kısa süreli değişimler, uzun süreli değişimler, gerilim dengesizliği, dalga biçimi bozulmaları, gerilim dalgalanmaları ve güç frekansındaki değişimler olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.1.’de kriterler belirtilmiştir [19].

Kategoriler	Spektral İçerik	Süre	Gerilim Genliği
1. Geçici Olaylar			
1.1 Darbeli			
• Nanosaniye	5-ns yükseliş	<50 ns	
• Mikrosaniye	1-µs yükseliş	50 ns-1 ms	
• Milisaniye	0.1-ms yükseliş	>1 ms	
1.2 Titreşimli			
• Alçak frekans	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
• Orta frekans	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
• Yüksek frekans	0.5-5 MHz	5 µs	0-4 pu
2. Kısa süreli değişimler			
2.1 Ani			
• Kesinti (interruption)		0.5-30 çevrim	<0.1 pu
• Azalma (sag-dip)		0.5-30 çevrim	0.1-0.9 pu
• Artma (swell)		0.5-30 çevrim	1.1-1.8 pu
2.2 Anlık			
• Kesinti (interruption)		30 çevrim-3 s	<0.1 pu
• Azalma (sag-dip)		30 çevrim-3 s	0.1-0.9 pu
• Artma (swell)		30 çevrim-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Geçici			
• Kesinti (interruption)		3 s-1 dakika	<0.1 pu
• Azalma (sag-dip)		3 s-1 dakika	0.1-0.9 pu
• Artma (swell)		3 s-1 dakika	1.1-1.4 pu
3. Uzun süreli değişimler			
3.1 Kesinti		>1 dakika	0.0 pu
3.2 Gerilim düşmesi		>1 dakika	0.1-0.9 pu
3.3 Gerilim artması		>1 dakika	1.1-1.2 pu
4. Gerilim dengesizliği		Sürekli hal	0.5-2 %
5. Dalga biçimi bozulmaları			
5.1 dc ofset		Sürekli hal	0.5-0.1 %
5.2 Harmonikler	0-100. harmonik	Sürekli hal	0.5-20 %
5.3 Araharmikler	0-6 kHz	Sürekli hal	0-20 %
5.4 Çentik			
5.5 Gürültü	Geniş bant	Sürekli hal	0-1 %
6. Gerilim dalgalanmaları	<25 Hz	Süreksiz	0.5-7 %
7. Güç frekansı değişimleri		<10 s	

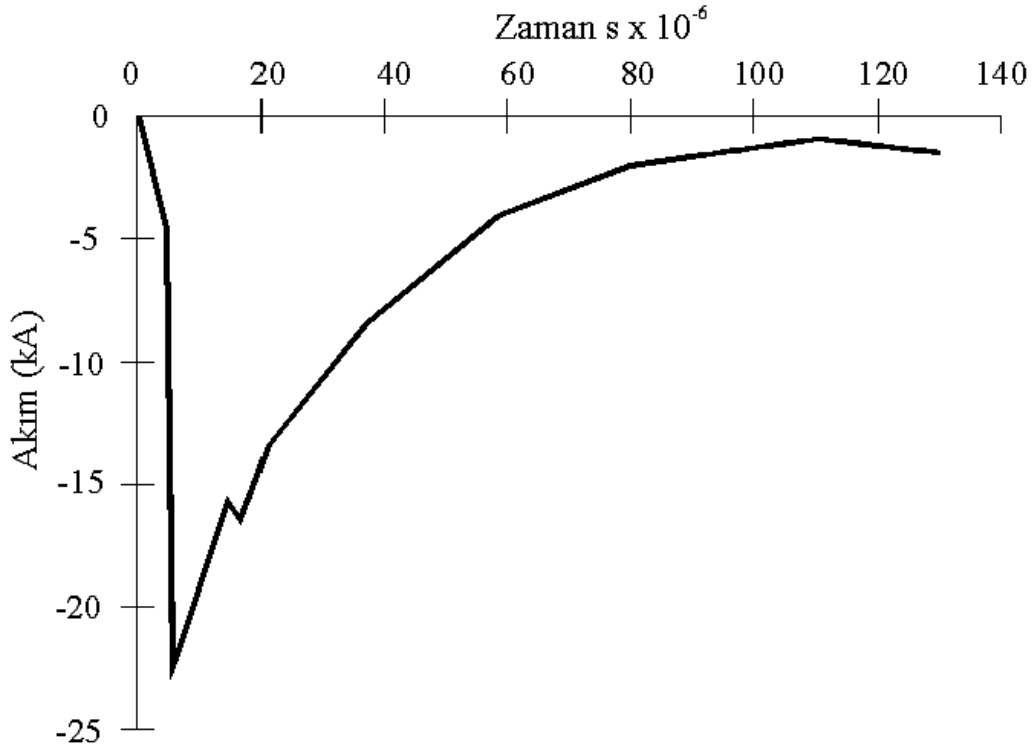
Şekil 2.1. Elektrik güç sistemindeki güç kalitesini belirleyen kriterler [19]

2.1. Geçici Olaylar

Geçici olaylar elektrik güç sistemindeki akım ve gerilim dalga şekillerinde meydana gelmektedirler. Etkileri çok büyüktür. İletim hatlarında ve yük tarafında geri dönülemez sonuçlara yol açabilirler. Örneğin iletim hatlarındaki kablolarda delinme ve yük tarafındaki cihazlarda veri kaybı veya bozulmalara neden olabilirler. Darbesel ve titreşimli geçici olaylar olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

2.1.1. Darbeli geçici olaylar

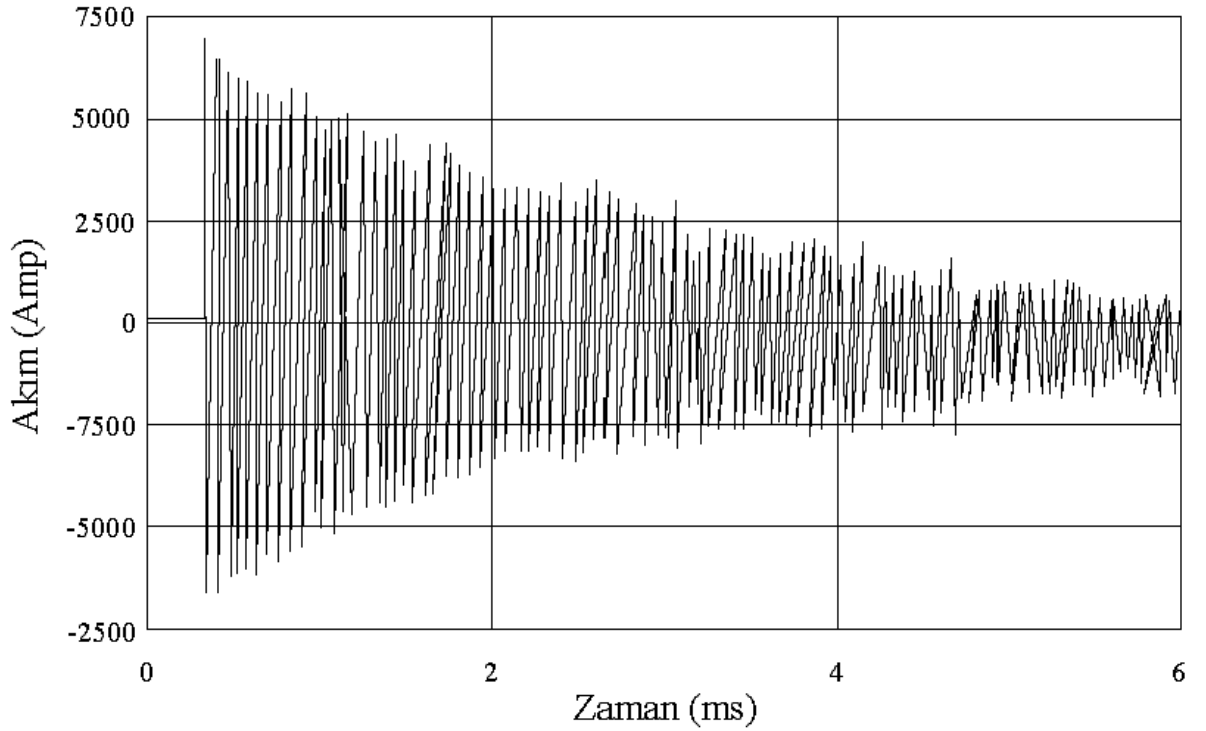
Tek yönlü polarizasyonlu gerilim, akım veya her ikisinin geçici hal durumundaki ani değişimlerdir. Gecikme ve yükselme süreleri ile ifade edilirler. Yıldırım darbe gerilimleri ve akımları, kondansatörün boşalma eğrisi bu durumlara örnek verilebilirler. Şekil 2.2.'de örnek bir yıldırım darbe akımına ait geçici olay davranışı grafiği verilmiştir [19].



Şekil 2.2. Yıldırım darbe akımına ait geçici olay davranışı [19]

2.1.2. Titreşimli geçici olaylar

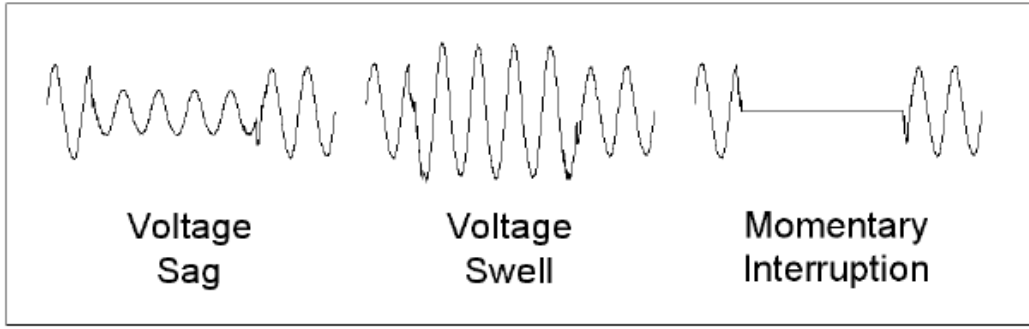
Geçici olaylardan bir diğeri ise titreşimli geçici olaylardır. Tek yönlü değildirler. Negatif ve pozitif polarizasyonda gözlemlenebilmektedirler. Darbeli geçici olaylarda olduğu gibi ani değişimlerdir. Titreşimdeki geçici hal davranışları akım veya gerilimde görülebilmektedirler. Örneğin kondansatörlerin anahtarlanıp, sırayla devreye alınmalarıyla birlikte titreşimli geçici olaylar gözlemlenir. Şekil 2.3.'te sırayla anahtarlanan kondansatörlerin oluşturduğu geçici olayın grafiği verilmiştir [10,19].



Şekil 2.3. Sırayla anahtarlanan kondansatörlerin oluşturduğu geçici olay [19]

2.2. Kısa Süreli Değişimler

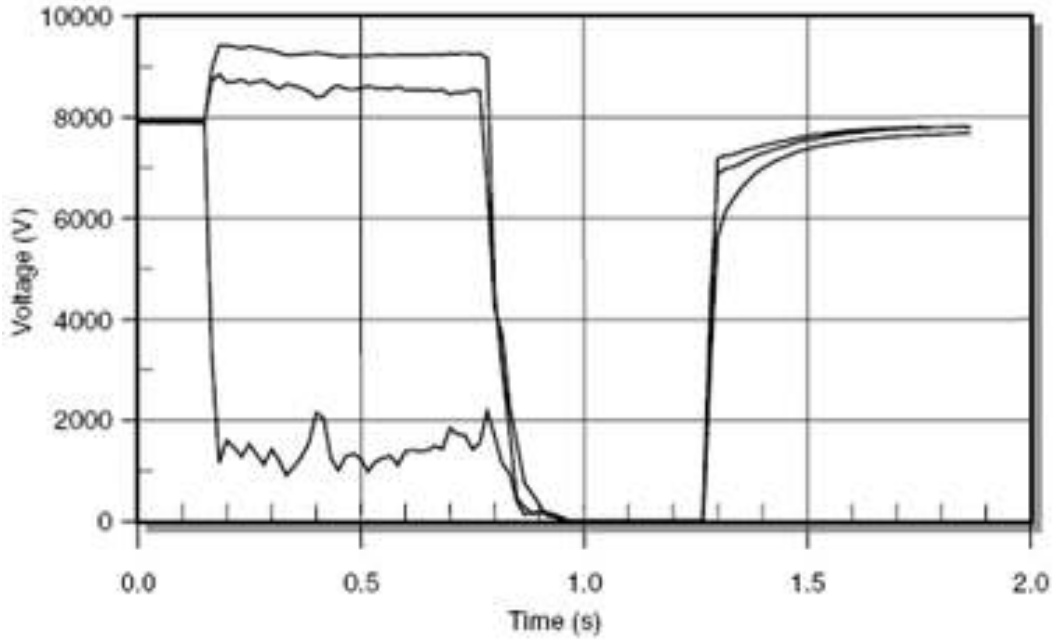
Kısa süreli değişimler ani, anlık ve geçici biçimde meydana gelmektedirler. Hata şartlarına bağlı olarak gerilim ve akımda kesintilere veya artmalara sebep olabilirler. Şekil 2.4.'te kısa süreli değişimler verilmiştir [10].



Şekil 2.4. Kısa süreli değişimler [10]

2.2.1.Kesinti

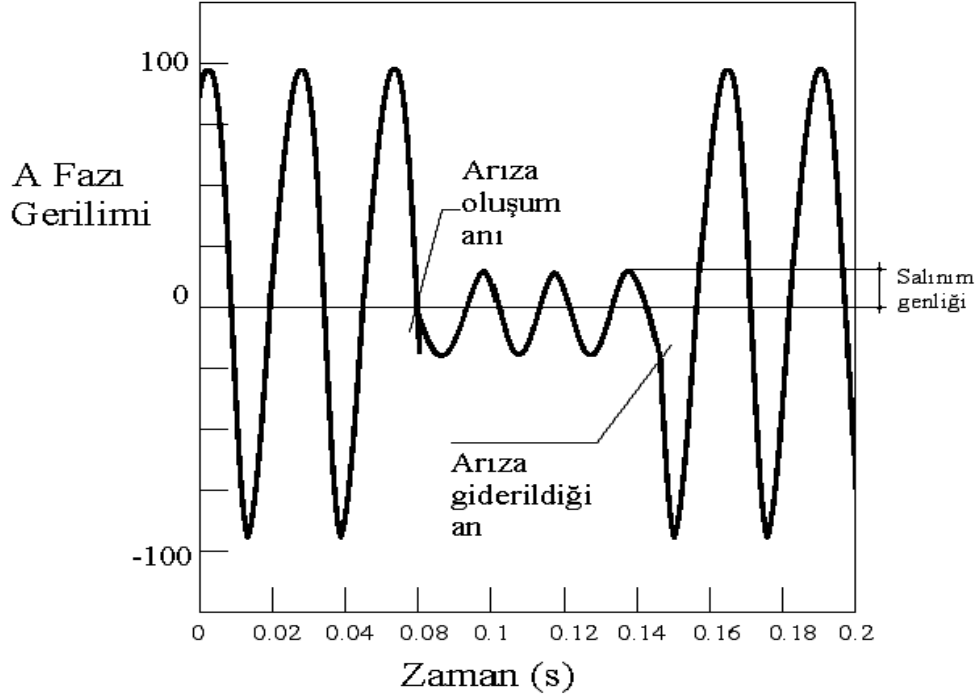
Nominal gerilimin 0,1 katına düşmesi ile gerilimde meydana gelen kayıp, kesinti olarak belirtilir. 1 dakikayı geçmeyecek şekilde olan kesintilerdir. Ani, anlık veya geçici süreyle gerilimde kesintiler meydana gelebilmektedir. Ekipmanların yanlış çalışmasına ve kontrol sistemlerinde hatalara neden olmaktadır. Şekil 2.5.'te geçici olarak meydana gelen kesintinin görseli verilmiştir [2,10].



Şekil 2.5. Geçici olarak meydana gelen kesinti [2]

2.2.2. Azalma ve salınma

Nominal gerilimin 0,1 ile 0,9 katları arasında ve frekansta olan 0,5 çevrimde 1 dakikaya kadar meydana gelen gerilim değişiklikleri azalmalar ve salınmalar olarak ifade edilir. Kalkış akımı yüksek olan makinaların şebekede devreye girmesiyle gerilimde bu şekilde azalmalar meydana gelebilmektedir. Şekil 2.6.'da örnek bir gerilim azalması ve salınması durumunun görseli verilmiştir [19].

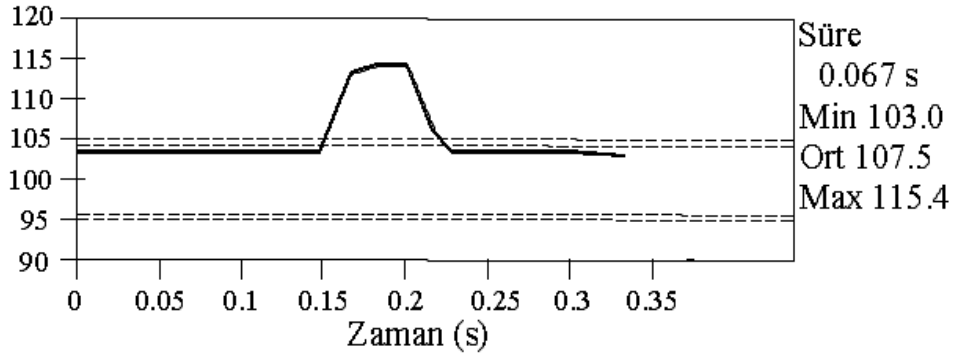


Şekil 2.6. Gerilim azalması ve salınması [19]

2.2.3. Artma

Nominal gerilimin 1,1 ile 1,8 katları arasında ve frekansta olan 0,5 çevrimde 1 dakikaya kadar meydana gelen gerilim değişiklikleri artma olarak ifade edilir. Gerilim kaynağı tarafındaki ani yük artışları ve dağıtım tarafında gerilimlerin yanlış düzenlenmesinden dolayı gerilimde artışlar meydana gelebilmektedir. Örneğin büyük bir kondansatör grubunun enerjilendirilmesi gerilim artışına sebep olur. Şekil 2.7.'de örnek bir gerilim artışı durumunun görseli verilmiştir [19].

Faz Gerilimi RMS Değişimi



Şekil 2.7. Gerilim artışı [19]

2.3. Uzun Süreli Değişimler

Uzun süreli değişimler güç frekanslarının temel değerlerden sapıp üretim tarafında gerilimlerin yükselmesi, düşmesi ve sürekli biçimde elde edilememesi durumlarını belirtir.

2.3.1. Gerilim yükselmesi

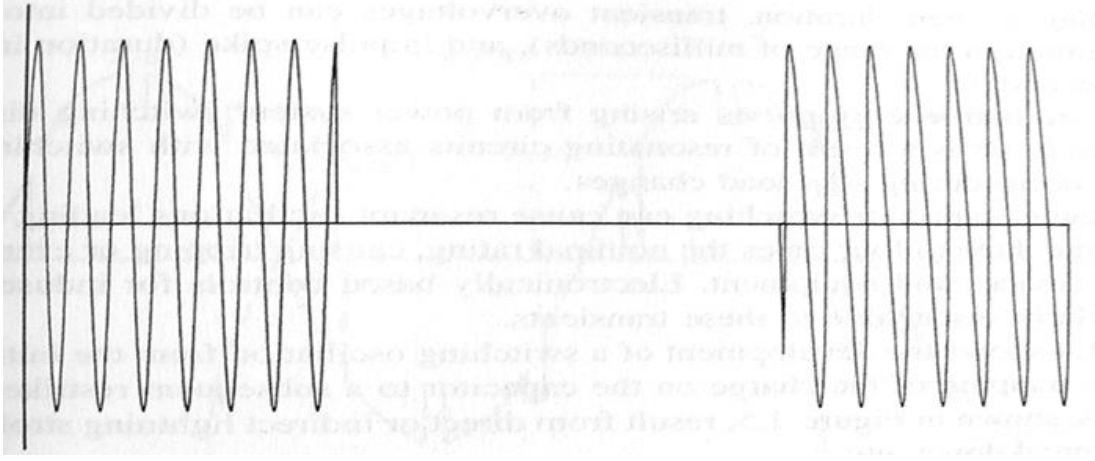
Bir dakika veya daha uzun süreler boyunca nominal gerilimin üzerine çıkılması durumudur. Üretim tarafında gerilim regülatörlerindeki frekansların düzgün biçimde ayarlanamamasından meydana gelmektedir. Gerilim yükselmesi nominal gerilimin 1,1 ya da 1,2 katına çıkması ile ifade edilir. Güç frekansındaki geçici değişimler, anahtarlama ve yıldırım sırasında gerilim yükselmeleri meydana gelmektedir [19].

2.3.2. Gerilim düşmesi

Kaynak geriliminin bir dakikayı aşacak şekilde meydana gelen azalma eğilimindeki değişimlerdir. Tüketici tarafında yüklerin artması veya üretim tarafında gerilim arzının azalması sebebiyle oluşmaktadır. Örneğin çamaşır makinalarında motorun standart dışı yavaş dönmesi ve kullanılan lambalardaki sönükleşme kısa süreli gerilim düşmeleri sonucu oluşurlar [19].

2.3.3. Sürekli kesinti

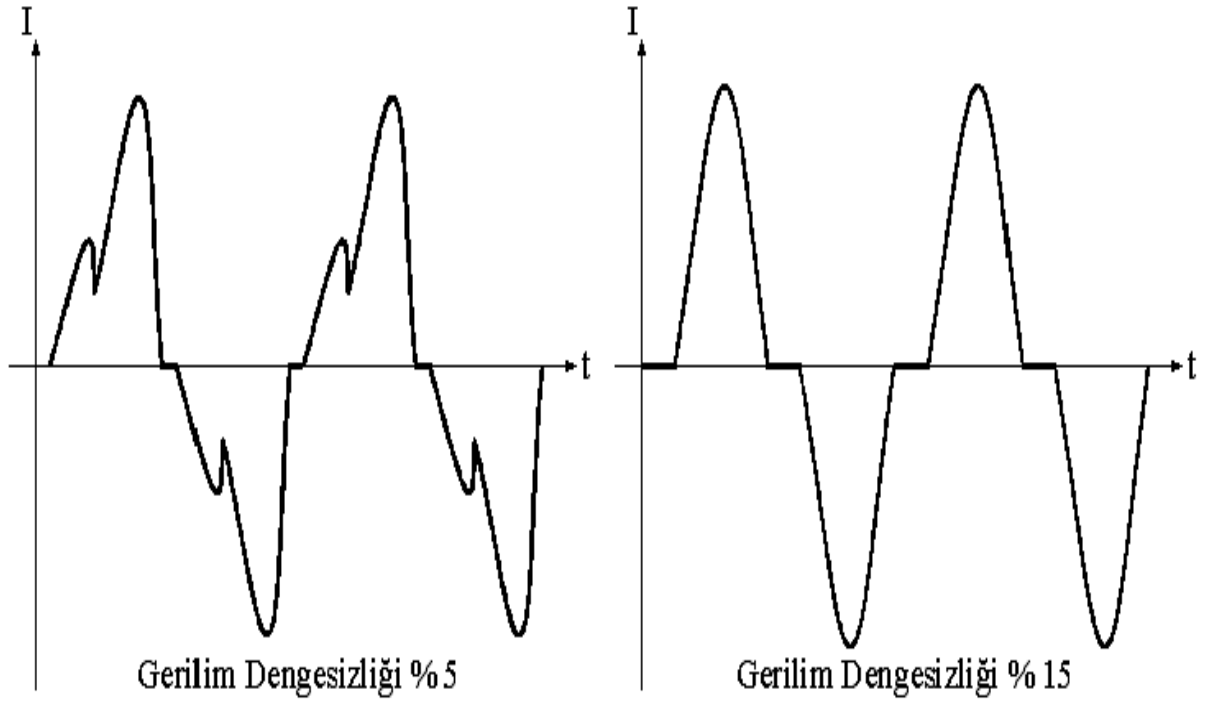
Gerilim uzunca bir süre elde edilememesi ve yüke aktarılamaması durumudur. Sürekli kesinti zamanlarında tüketici tarafındaki gerilim bir kaç çevrim ya da saatler süreler boyunca kullanılamaz durumdadır. İletim tarafında ekiplerin müdahalesi ile giderilirler. Sürekli bir kesintiye ait görsel Şekil 2.8.'de verilmiştir [10].



Şekil 2.8. Sürekli kesinti [10]

2.4. Gerilim Dengesizliği

Simetrik bileşenler teorisine göre dengeli bir sistem sıfır, pozitif ve negatif bileşenler ile ifade edilir. Üç fazlı güç sistemlerinde faz gerilimlerinin ve akımların her biri eşit büyüklükte olurlarsa ve faz açılarının aralarında da 120 derece fark varsa sistem dengeli olmaktadır. Üç fazlı sistemlerde fazların hepsinde veya bir kısmında gerilim değerlerindeki sapmalar ve faz farklarının 120 dereceden farklı olması sistemi dengesizleştirir. Gerilimdeki sapmalar, artış ya da azalış şeklinde meydana gelir. Güç sistemlerindeki gerilim dengesizlikleri genellikle tüketici tarafından kaynaklıdır. Ekipmanların sisteme yanlış ya da dengeli bağlanmamaları sistemi dengesizleştirir. Güç elektroniği devrelerinden olan statik VAR kompanzatörleri kullanılarak, tüketici tarafındaki yüklerin her birinin çektiği akım ve gerilim izlenebilir. Ayrıca kompanzasyon işlemini gerçekleştirdikleri için sistemde dengesizlik önüne geçilir. Şekil 2.9.'da üç fazlı doğrultucuya ait %5 ve %15 gerilim dengesizliği durumunda hattan çekilen akımın görseli verilmiştir [19].



Şekil 2.9. Üç fazlı doğrultucuya ait %5 ve %15 gerilim dengesizliği durumunda hattın çekilen akımı [19]

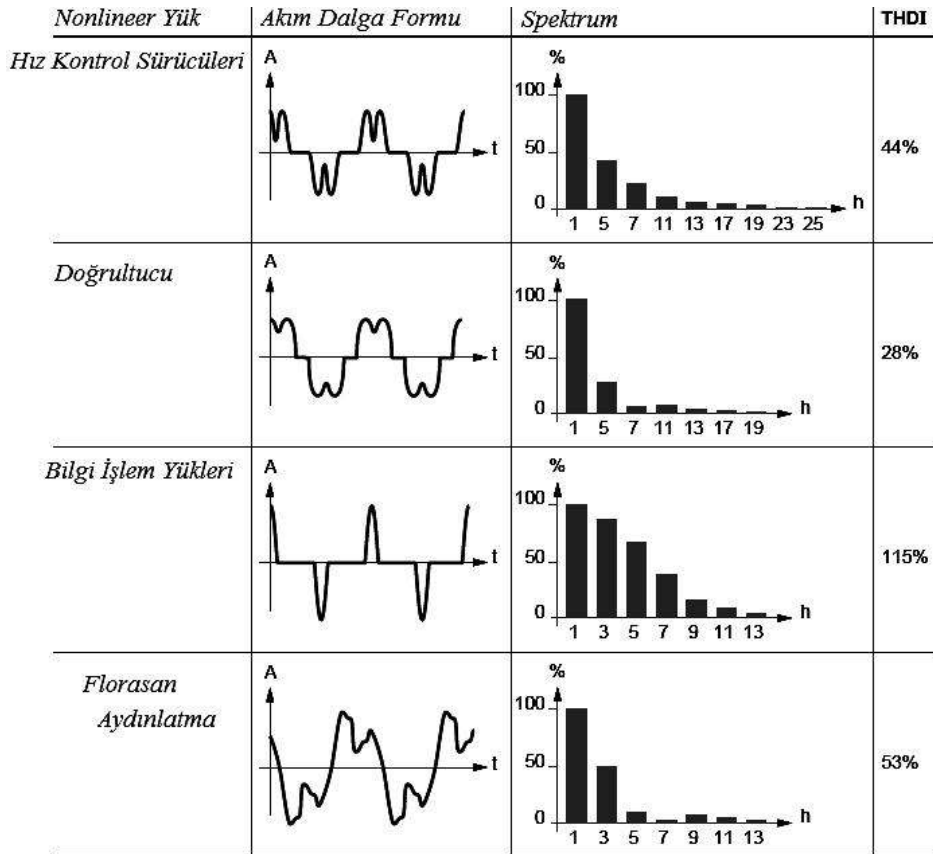
2.5. Dalga Biçimi Bozulmaları

2.5.1. DC ofset

DC ofset oluşumu, AC akım veya gerilimin içerisinde DC akım veya gerilim bileşenlerinin bulunması durumudur. Yarım dalga doğrultuculardan dolayı oluşabilirler. Transformatörlerin doymaya girip, ısınmasına neden olurlar [19].

2.5.2. Harmonikler

Lineer olmayan yüklerin güç sistemine bağlanması sonucunda sistemde temel frekans dışında frekanslar meydana gelir. Buna bağlı olarak akım ve gerilim sinyallerinde bozulmalar meydana gelir. Harmonikler ifade edilirken faz açısı ve frekans cinsinden ifade edilirler. Şekil 2.10.'da çeşitli lineer olmayan yüklere bağlı oluşan harmonik akımları ve bunların frekans spektrumundaki karşılıkları verilmiştir [19].



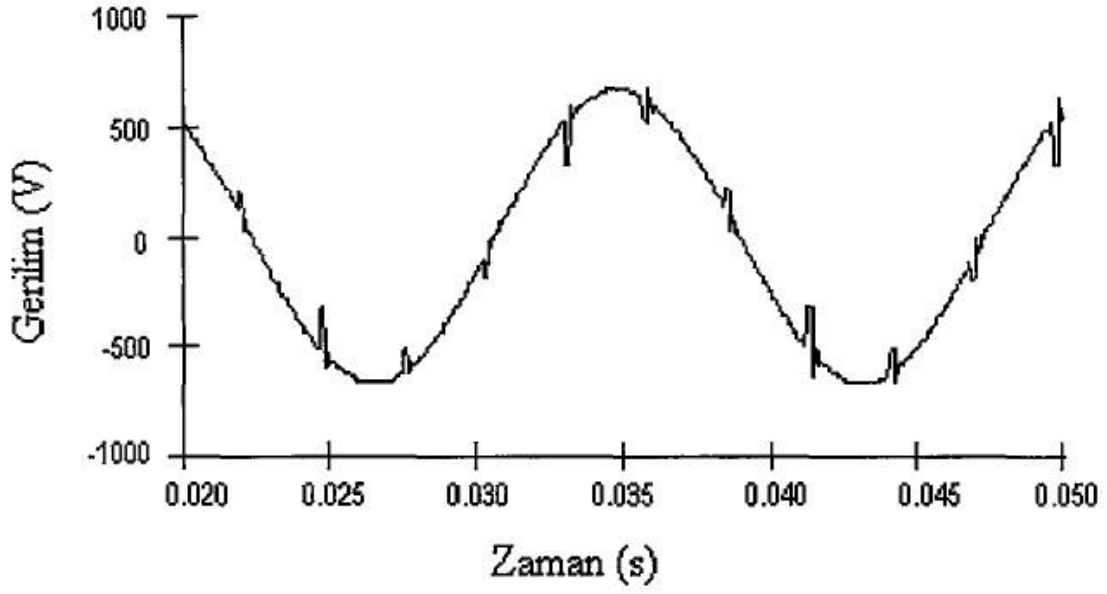
Şekil 2.10. Çeşitli lineer olmayan yüklere bağlı oluşan harmonik akımları ve bunların frekans spektrumundaki karşılıkları [19]

2.5.3. Ara harmonikler

Harmonikler her zaman temel frekansın tam katları şeklinde oluşmaz. Tam katlar şeklinde oluşmayan harmoniklere ara harmonikler denmektedir. Örneğin şebeke frekansı 50 Hz olan bir elektrik güç sistemi için 1,8. harmonik 90 Hz olacaktır. Frekans çeviriciler, ark fırınları ve çeviriciler ara harmonik kaynaklarıdır.

2.5.4. Çentik

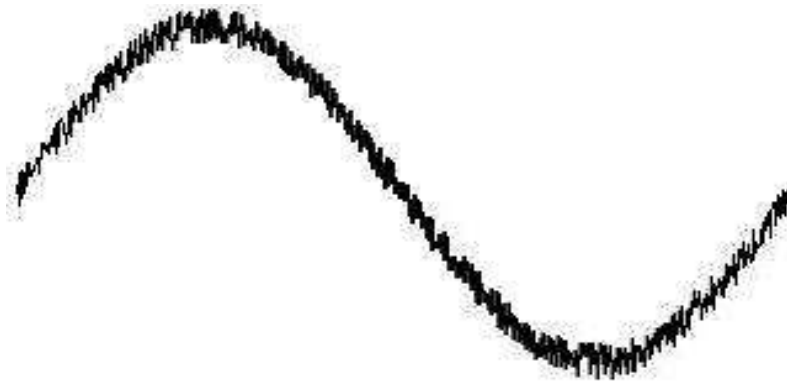
Güç elektroniği çeviricileri istenilen performans ve talebe uygun olacak şekilde katlı biçimde tasarlanırlar. Kat sayısı arttıkça faz sayısı da artmaktadır. Devrelerdeki anahtarlama elemanlarının anahtarlama sırasında da meydana gelen çökmeler çentik olarak belirtilir. Gerilim ve akımda dalga biçimi bozulmalarına sebep olurlar. Bu bozulmalar kısa süreli azalmalar şeklinde meydana gelirler. Şekil 2.11.'de üç fazlı bir doğrultucuda meydana gelen çentik etkisi verilmiştir [11].



Şekil 2.11. Üç fazlı bir doğrultucuda meydana gelen çentik etkisi [11]

2.5.5. Gürültü

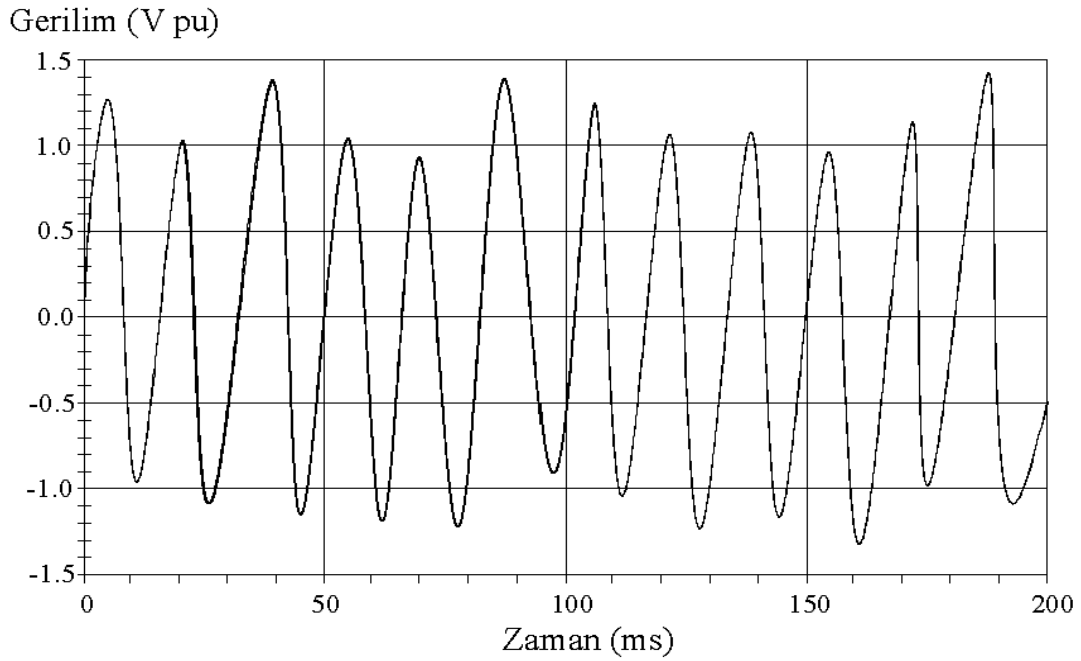
Akım veya gerilim sinyallerinde meydana gelen 200 kHz'den daha küçük frekanslı işaretleridir. Güç elektroniği devreleri ve ilgili kontrolcileri ile meydana gelirler. Arzu edilmeyen durumlardır. Ekipmanların istenilen şekilde çalışmamasına neden olurlar. Uygun topraklama yapılarak ve filtreler kullanılarak giderilirler. Şekil 2.12.'de bir sinüs dalgasında meydana gelen gürültü belirtilmiştir [19].



Şekil 2.12. Sinüs dalgasında meydana gelen gürültü [19]

2.6. Gerilim Dalgalanmaları

Rastgele ya da sistemli biçimde 0,9 pu ile 1,1 pu arasında meydana gelen gerilim değişiklikleri gerilim dalgalanmaları olarak açıklanmaktadır. Özellikle ark fırınları ve kaynak makinalarında ani yük değişimi görülür. Bu ani akım ihtiyacını oluşturur ve gerilim dalgalanmalarına sebep olur. Şekil 2.13.'te örnek bir ark fırınına ait gerilim dalgalanması verilmiştir. Aydınlatma konularından olan fliker da gerilim dalgalanması problemlerindendir [2,11,19].



Şekil 2.13. Ark fırınına ait gerilim dalgalanması [19]

2.7. Güç Frekansı Değişimleri

Güç frekansındaki değişimler temel frekanslar olan 50 ya da 60 Hz'den sapma şeklinde açıklanmaktadır. Güç sistemlerinin üretim kısmındaki eleman olan generatörlerin devir hızlarına bağlı olarak üretim tarafında frekansta değişimler meydana gelmektedir. Hatta bağlı yüklerin karakteristikleri ve yüklerin devreye alınması sırasında kontrol devrelerinin tepkilere bağlı olarak frekansta kaymalar gerçekleşmektedir. Kaymalar ve ilgili frekansın genliği bunlara bağlıdır. Ayrıca birbirine bağlı olan üretim tesislerinden kapasitesine göre bir ya da bir kaçının devreden çıkması, önemli büyüklükteki yükün devreden çıkması da temel frekans değerlerinde değişimlere neden olmaktadır [2,19].

3. HARMONİKLER

İdealde, yük tarafındaki tüketicide sabit gerilim ve frekans izlenmelidir. Yüklere bağlı olarak şebekeden çekilen akımın veya okunan gerilimin grafiği çizdirilecek olursa saf sinüzoidal dalga olarak karşımıza çıkmayacaktır. Güç kalitesi problemlerinden olan harmoniklerde kaynaklı bu sinüzoidallikten sapmalar meydana gelmektedir. Anahtarlama güç kaynakları farklı frekanslı akımlar üreterek, elektrik motorları ve ark fırınları gibi yükler ise gerilim çökmelerine neden olarak dalga şeklinin bozulmasına sebep olmaktadır.

Matematiksel olarak 50 ve 60 Hz için dalga şekilleri temel bileşen olarak adlandırılır. Harmonikler frekansları bakımından Tablo 3.1.'deki gibidir. Burada Türkiye için 13. harmoniğe kadar frekans değerleri ve gerilim ifadeleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Frekans, gerilim ve harmonik dereceleri

Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (V)	Harmonik Derecesi
50	$V_{\text{temel}}(t)=V_1(t)$	Temel Bileşen
150	$V_3(t)$	3
250	$V_5(t)$	5
350	$V_7(t)$	7
450	$V_9(t)$	9
550	$V_{11}(t)$	11
650	$V_{13}(t)$	13

Harmonikler matematiksel olarak, Fransız matematikçi Fourier tarafından bir tane temel frekanslı bileşen ve harmonik derecelerine bağlı olarak elde edilen bileşenlerin toplamı şeklinde ifade edilmiştir. Toplam ifadesi $f(x)$ olarak gösterilecek olursa,

$$f(x) = z_0 + z_1 \sin(x + \varphi_1) + z_2 \sin(2x + \varphi_2) + \dots + z_n \sin(nx + \varphi_n) \quad (3.1)$$

şeklindeki gibidir.

Buradan yararlanılarak zaman domeninde harmonikli bir yükün akımı,

$$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + I_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.2)$$

Zaman domeninde harmonikli bir yükün gerilimi ise,

$$V(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + V_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir [20,21].

“ I_0 ” ve “ V_0 ” sırasıyla akımın ve gerilimin doğru bileşenleridir. “ ω ” açısal frekanstır ve “ $2\pi f$ ” olarak ifade edilir. Burada “ f ” temel bileşenin frekansıdır.

Eşitlik 3.1 kullanılarak Fourier serisi elde edilir ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

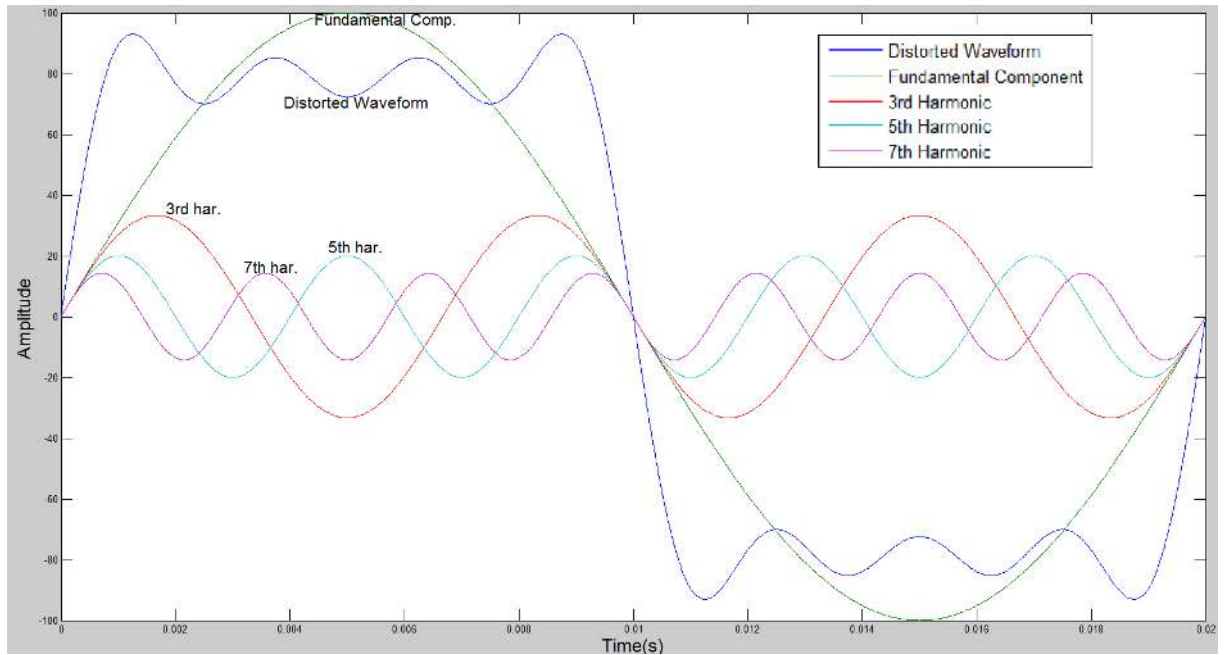
$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (3.4)$$

Fourier serisinden yararlanarak içerisinde harmonikler bulunduran gerilim eşitliği yazılırsa,

$$V(t) = V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (V_h \sin(2\pi f t h + \varphi_h)) \quad (3.5)$$

elde edilir. Burada “ V_h ” harmonik gerilim seviyesi, “ f ” temel frekans, “ φ_h ” faz açısıdır [2].

Harmonikli bir sinyale ait örnek Şekil 3.1.’de verilmiştir. Burada temel bileşen, 3., 5., 7. harmonik bileşenleri ile harmonikli oluşan sinyalin kendisi verilmiştir [2].



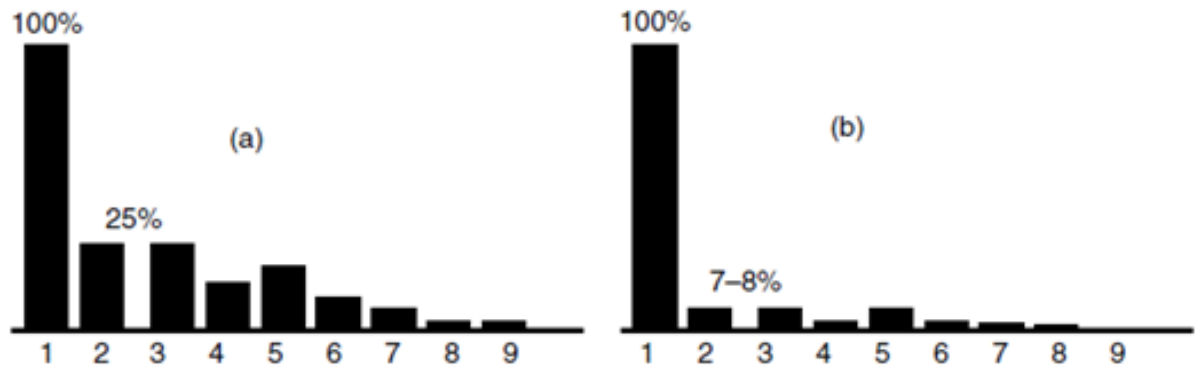
Şekil 3.1. Temel bileşen, harmonik bileşenleri ve harmonikli sinyal [2]

4. HARMONİK KAYNAKLARI VE HARMONİKLERİN ETKİLERİ

Elektrik enerjisinin kaliteli olması üretim, iletim, dağıtım ve tüketici tarafından bozucu etkilerinin olmaması bakımında oldukça önemlidir. Akım ve gerilimlerde özellikle de yüklerde kaynaklı tüketici tarafından harmonikler gözlemlenir. Yüklerin yapısı kaynaklı şebeke tarafındaki akım ve gerilimi bozabilirler. Temelde harmonik kaynakları ark fırınlar, yüksek basınçlı gaz deşarj lambaları, kaynak makinaları, indüksiyon ocakları, manyetik çekirdekli sargılı makinalar/generatörler, frekans dönüştürücüler. Yarı iletken kullanışa elektronik ve güç elektroniği içeren ekipmanlardır [2,20]. Bunların yanı sıra, elektrik makinalarındaki diş ve oluklar, elektrik makinalarındaki hava aralığı ve döner alan, transformatörlerdeki ilk enerjilendirme akımları ve motorların kalkış akımları da harmonik kaynaklarıdır [2,20,22].

4.1. Ark Fırınları

Fransa'da 1909'da ilk defa kullanılmıştır. Ham demir ve düşük karbonlu demir üretimi için kullanılırlar [23]. Elektrikle çalışan ark fırınları, kullanıldıkları elektrik şebekelerinde güç kalitesini etkilemektedirler. Bunlar arasında harmonik oluşturmaları da vardır [24]. Bu fırınlar yüksek gerilim şebekelerine doğrudan bağlanmaktadır ve MW seviyesinde elektriksel ark oluştururlar. Oluşan elektriksel arkta akım ile gerilim arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Bu da ark fırınlarında harmonik oluşumuna sebep olmaktadır [20]. Şekil 4.1.'de örnek bir ark fırınının eritme ve saflaştırma sırasında oluşturduğu akımlarının harmonik spektrumu verilmiştir [2].



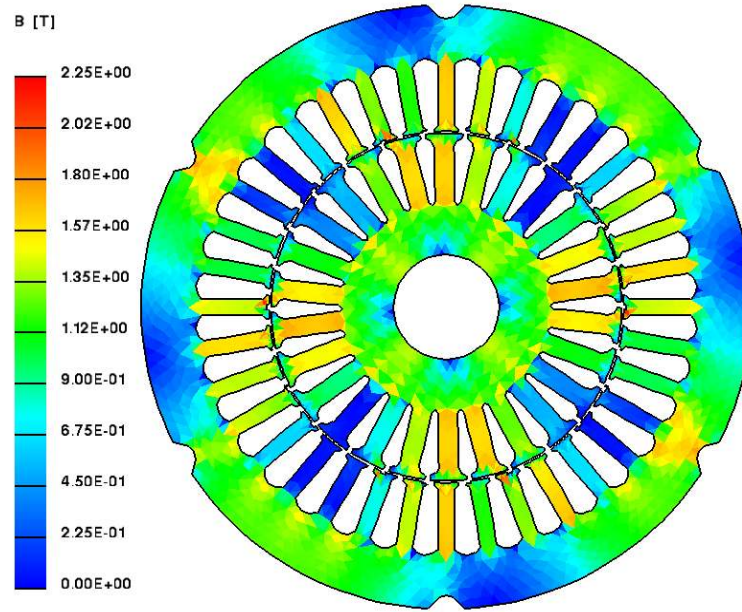
Şekil 4.1. Ark fırınının eritme ve saflaştırma sırasında oluşturduğu akımlarının harmonik spektrumu [2]

4.2. Döner Elektrik Makinaları

Döner elektrik makinaları, generatörler ve motorlar olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. Generatörler ve motorlar kendi arasında AC ve DC olarak sınıflandırılmaktadırlar.

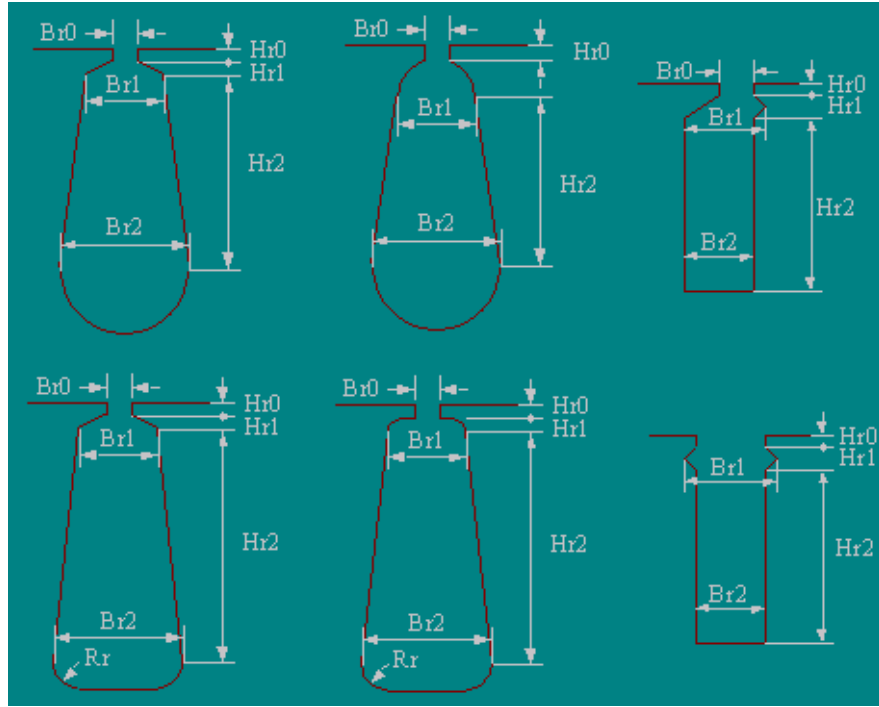
Makinalarda kullanılan demir çekirdek, stator ve rotordaki oluk sayıları, olukların biçimleri, stator ve rotor arasındaki hava aralığı, motor sargılarındaki bağlantılar ve sargı tipleri harmonik oluşumunu etkileyen faktörlerdendir.

Şekil 4.2.'de örnek bir makinanın SEY modeli verilmiştir [25]. Burada hava aralığı ve oluk yapısı gözlemlenebilir. Buna bağlı olarak manyetik akının izlediği yollar yorumlanabilir. Hava aralığının alanının mümkün olduğunca küçük olması istenir ve bu sayede kayıplar azaltılmış olur. Kayıpların azaltılması harmoniklerin oluşumunu azaltarak meydana gelecek harmonik akımının azaltılmasına yardımcı olur.



Şekil 4.2. Elektrik makinası SEY modeli [25]

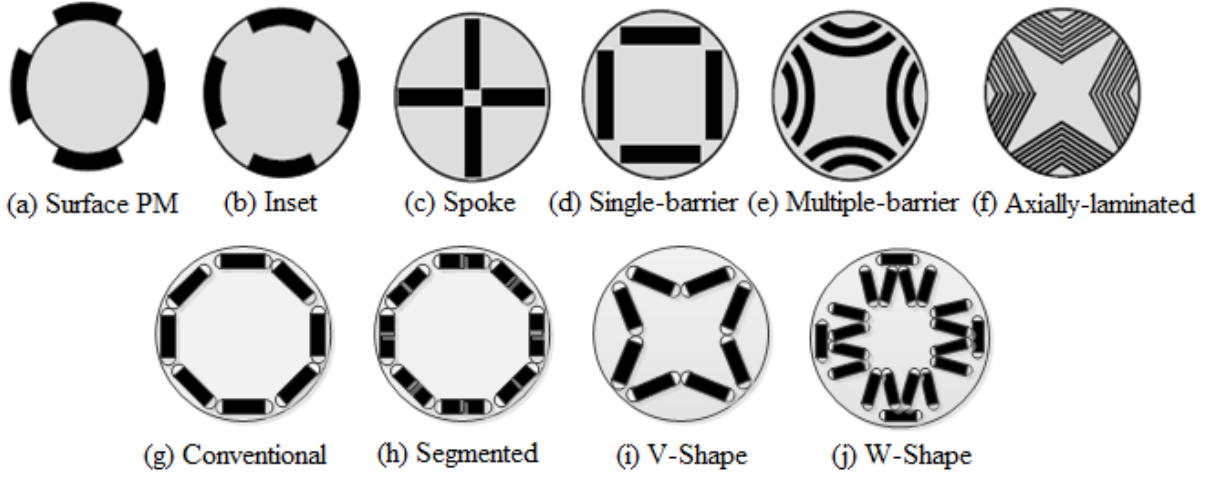
Örnek oluk biçimleri ise Şekil 4.3.'te verilmiştir [25].



Şekil 4.3. Elektrik makinası örnek oluk biçimleri [25]

Oluk açıklığının çok küçük olması durumunda dişten dişe kaçak akılar olmasına sebep olurken, oluk açıklığının çok büyük olması durumunda da vurutu momenti artar. Bunlar harmoniklerin oluşmasına da sebep olurlar ve harmoniklere bağlı kayıplar artar.

Fırçasız doğru akımlı motorların rotorlarında mıknatıslar bulunur. Mıknatısların ne şekilde konumlandırıldığına bağlı olarak belirli bir döner alan oluşturulur. Bu döner alana göre stator tarafında akım harmonikleri oluşmaktadır ve kayıplar meydana gelmektedir. Şekil 4.4.'te örnek rotor topolojileri verilmiştir [25].



Şekil 4.4. Elektrik makinalarındaki örnek rotor topolojileri [25]

Generatörlerde harmonik frekansı ile harmonik derecesi doğru orantılıdır. Harmonik frekansı “ hf ” olarak ifade edilir. Burada “ h ” harmonik derecesidir. “ h ” harmonik dereceli harmonik gerilim ise;

$$U_h = 4,44hfN_s k_n \varphi_n \quad (4.2)$$

olarak ifade edilmektedir [20].

4.3. Transformatörler

Elektrik makinaları temelde döner ve durağan olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Bölüm 4.2.’de bahsedilen döner elektrik makinalarının yanı sıra durağan elektrik makinası olan transformatörler de kullanılmaktadır. Transformatörlerde primer ve sekonder olmak üzere iki kısım bulunmaktadır. Her iki tarafında da sargılar mevcuttur. Demir çekirdeğe sarılan primer ve sekonder sargıları, demir çekirdekte manyetik devre ve mıknatıslanma etkisi oluşturur. Mıknatıslanma etkisine bağlı karakteristiğin doğrusal olmamasından dolayı harmonikler meydana gelmektedir. Tablo 4.1.’de örnek bir dağıtım transformatörüne ait harmonik spektrum verilmiştir [20]. Burada “ I_μ ” mıknatıslanma akımı ve “ I_n ” transformatörde yüke aktarılan n. harmonik akımdır.

Tablo 4.1. Dağıtım transformatörüne ait harmonik spektrum [20]

Harmonik Derecesi (n)	(%) $\frac{I_n}{I_\mu}$
3	50
5	20
7	5
9	2.6

4.4. Çeviriciler

Çeviriciler, temelde gerilim veya akımı AC'den DC'ye çeviren doğrultucular, AC'den AC'ye çeviren kıyıcılar, DC'den AC'ye çeviren eviriciler ve DC'den DC'ye çeviren devreler olmak üzere dörde ayrılırlar. Yarı iletkenlerin anahtarlamaları sırasında frekans kaynaklı harmonikler oluşmaktadır. Çeviriciler de harmonik kaynaklarından biridir. “n” darbeli bir çeviricinin oluşturacağı akım harmoniklerine bağlı seviye,

$$f(x) = (n \sum_{x=1}^{\infty} x) \pm 1 \quad (4.3)$$

olarak ifade edilir. Darbe sayısı n ise 6,12,18 veya 36 olmaktadır. Oluşan harmonik akımı ise (4.3) eşitliğine bağlı olarak,

$$I_h = I_1 \left(\frac{z_h}{h} \right) \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada “ z_h ” 1'den üçüktür. “ z_h ” katsayısı farklı çeviricilere göre farklı değerler almaktadır. Oluşturulan devrenin kaskatlık seviyesine bağlı olarak “h” harmonik seviyesi arttırılabilir. Bunun sayesinde (4.4) eşitliğine bağlı olarak harmonik akımı azaltılabilmektedir [20].

4.5. Gaz Deşarj Lambaları

Yüksek basınçlı civa buharlı lambalar, halojen metal buharlı lambalar, civa buharlı lambalar, sodyum buharlı lambalar, yüksek basınçlı xenon lambalar ve floresant lambalar gaz deşarj lambalarına örnektirler. Gaz bulunduran tüpün içerisinde her iki tarafında bulunan elektrotların enerjilendirilmesi ile birlikte boşalmalar meydana gelir. Bu boşalmalardan kaynaklı ışık oluşur [26].

Gaz deşarj lambaları genellikle çok yüksek ışık kaynağı ihtiyacı olan yerlerden olan yol, stad ve müze aydınlatmaları için kullanılırlar. Yapıları gereği lambalar enerjilendirildikten belli bir süre sonra aydınlatma işlemini gerçekleştirirler. Bu da şebeke ile yük olan gaz deşarj lambaları arasında belirli bir faz farkı oluşturur. Ayrıca ile enerjilendirilmeleri sırasında çok yüksek akım çekmektedirler. Bu çekilen yüksek akımı sınırlandırmak için balast kullanılır. Geleneksel balastlar manyetik devrelerdir ve faz farkı oluşturmasının yanı sıra harmonikleri de oluştururlar. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektronik balastlar da gaz deşarjlı lambalar için kullanılmaya başlanmıştır. Elektronik balastlar anahtarlama elemanları içerirler ve anahtarlama kaynaklı harmonikleri de oluşturmaktadırlar.

Aşağıdaki Tablo 4.2.'de örnek bir manyetik balast içeren floresant bir lambanın akımın 9. harmoniğe kadar olan spektrumu verilmiştir [20,27,28].

Tablo 4.2. Floresant lambaya ait harmonik spektrum [20]

	Harmonik Derecesi				
	1	3	5	7	9
$\frac{I_n}{I_1}$	100	19.9	7.4	3.2	2.4

4.6. Diğer Harmonik Kaynakları

Önceki bölümlerde açıklanan temel harmonik kaynaklarının yanı sıra aşağıda belirtilen harmonik kaynakları da mevcuttur. Bunlar [19,20,21];

- Senkron makinalarda meydana gelen ani yük değişimlerine bağlı olarak manyetik akıdaki bozulmalar,
- Frekans dönüştürücüler,
- İndüksiyon ısıtma sistemlerinin kullanıldığı çelik sanayii, haddehaneler,
- Kaynak makinaları,
- Kesintisiz ve anahtarlama gücü kaynakları,
- Bilgisayarlı network sistemleri,
- Anahtarlama statik VAR kompanzasyonu devreleri,

- Alternatif enerji kaynaklarında kullanılan yarı iletken teknolojili devreler,
- Elektrik güç üretim tesislerindeki pompa, fan ve ateşleyiciler için kullanılan kontrol sistemleri,
- Elektrokimya teknolojisindeki mevcut plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemleri sırasında kullanılan statik dönüştürücüler.

Bahsedilen kaynakların şebekede ürettikleri akım ve gerilim harmonikleri 100 Hz ile 50 kHz arasında değişkenlik göstermektedir. Güç elemanları ve makinalarda frekansı 5 kHz'e kadar olan harmonikler etkilidir. İletişim sistemleri için ise frekansı 5 kHz üzerindeki harmonikler etkilidir [21].

4.7. Harmoniklerin Etkileri

Harmonikler meydana gelirken akım ve gerilim harmonikleri şeklinde ortaya çıkmaktadırlar. Oluşan akım ve gerilim harmonikleri elektrik güç sistemlerinde sinüzoidal dalga biçimi bozmaktadırlar.

Harmonikler, Türkiye için örnek verilecek olursa, 50 Hz olan şebeke frekansından daha yüksek frekanslar üretirler. Bu da sistemde aşırı ısınmalara neden olmaktadır. Harmonikler akım ve gerilim dalga biçimlerini bozmaları ve aşırı ısınmaya bağlı sonuçlara dayalı olarak sistemlerin istenilen dışında çalışmalarına neden olmaktadır. Akım ve gerilim harmoniklerinin oluşturdukları etkiler aşağıdaki biçimde sınıflandırılabilir [19,20,21];

Akım Harmoniklerinin etkileri,

- Görünür güçte (S) azalma ve buna bağlı kayıpların artışı,
- Güç faktörünün ($\cos \varphi$) düşmesi,
- Yıldız-üçgen bağlantılardaki nötr hattında aşırı akımların oluşması,
- Transformatör ve generatörlerin aşırı ısınması,
- İletişim hatlarında EMI/EMC etkilerinin artması,
- Güç sistemlerindeki üretimden tüketime kadar olan gerilim düşümünün artması,
- Ölçme aletlerinde hatalı ölçümdür.

Gerilim harmoniklerinin etkileri,

- İletim hatlarında rezonans oluşumu,
- Kondansatör, motor, transformatör, generatörlerin aşırı ısınması,
- Yüksek gerilime bağlı atlama ve delinme gerilimlerinin oluşması,
- Senkron ve asenkron makinalarda mekanik titreşim,
- Sistemlerde kullanılan kabloların yalıtkanlık özelliklerinin bozulması,
- Ölçme aletlerinde hatalı ölçüm,
- Şebeke geriliminin sinüzoidal şeklinin bozulmasına bağlı tüketici tarafında bağlı bulunan yüklerin çalışma koşullarının değişkenliğidir.

5. HARMONİK ANALİZİ

Sinüzoidal temel bileşen ile bu bileşen frekansının katlarının toplamıyla harmonikli sinyal oluşmaktadır. Harmonikli sinyaller sinüzoidal olmayan sinyallerdir. İçerisinde ilgili harmoniğin frekans katsayısı, genliği ve faz açısı barındırırlar. Harmonik analizinde belirtilen üç eleman bulunmaya çalışılır.

5.1. Fourier Katsayılarının Belirlenmesi

5.1.1. Analitik yöntem

Analitik yöntemde temel amaç sinüzoidal olmayan harmonikli sinyalin Fourier açılımı yapılarak genlik, frekans ve faz açıları cinsinden ifade edilmesidir. Fourier ana denklemine bağlı periyodu 2π olan sinyal için a_0 , a_n ve b_n katsayıları aşağıdaki şekilde bulunabilmektedir [20].

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (5.1)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(nt) dt \quad (5.2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(nt) dt \quad (5.3)$$

Eşitlik 3.4'e göre Fourier serisinde a_0 , z_0 olarak ifade edilirse ve denklem yeniden yazılırsa,

$$f(t) = z_0 + \sum_{n=1}^{\infty} z_n \sin(nt + \varphi_n) \quad (5.4)$$

elde edilir.

Burada z_n ve φ_n aşağıdaki gibidir.

$$z_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5.5)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (5.6)$$

5.1.2. Grafik yöntemi

Periyodik dalga düşünülecek olursa, bu sinyal her zaman fonksiyon olarak belirtilemeyebilir. Bu durumlarda grafik yöntemi Fourier katsayılarının belirlenmesi için kullanılır. Osiloskoptan veya yapılan deneylerden sinüzoidal olmayan dalga elde edilir. Ardından bu dalga bir periyotta k eşit parçaya ayrılır. Eşitlik 3.4'teki a_0 , a_n ve b_n katsayıları aşağıdaki eşitlikler ile bulunabilir. Burada f_m , k eşit parçadaki m . parçadır [20].

$$a_0 = \frac{2}{k} \sum_{m=1}^k f_m \quad (5.7)$$

$$a_n = \frac{2}{k} \sum_{m=1}^k f_m \sin\left(\frac{m2\pi n}{k}\right) \quad (5.8)$$

$$b_n = \frac{2}{k} \sum_{m=1}^k f_m \cos\left(\frac{m2\pi n}{k}\right) \quad (5.9)$$

5.2. Ayrık Fourier Dönüşümü

Frekans ya da zaman domenindeki bir fonksiyondan örneklemeler alındığında ayrık bileşenler içeren Fourier dönüşümü denklemleri elde edilebilir. L uzunluklu bir $x(n)$ dizisi için Fourier dönüşümü eşitlik 5.10'da verilmiştir.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{L-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (5.10)$$

Burada $X(e^{j\omega})$ eşit aralıklı biçimde $\omega = \frac{2\pi k}{N}$ ve ($N \geq L$) olacak şekilde frekanslara bağlı olarak örneklenirse eşitlik 5.11 elde edilir.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{L-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (5.11)$$

Burada $n \geq L$ için $x(n) = 0$ olarak verilir ve ($N \geq L$) uzunluğa sahip bir $X(n)$ dizisindeki N uzunluğa sahip frekans dizisine dönüştürme işlemi yapılır. Eşitlik 5.12’de de ayrık Fourier dönüşümü verilmiştir.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (5.12)$$

Eşitlik 5.12 $x(n)$ fonksiyonunun Ayrık Fourier Dönüşümü’dür [29].

5.3. Hızlı Fourier Dönüşümü

Ayrık Fourier dönüşümünde, her bir $x(n)$ değeri için N tane karmaşık işlem çarpımı ve N tane karmaşık toplama işlemi yapılmalıdır. Buna bağlı olarak N tane AFD değeri elde edilir ve N^2 kadar çarpma-toplama işlemi yapılır [2,20]. N değerinin çok fazla olduğu durumlarda AFD değerinin elde edilmesi için çok sayıda işlem yapılmalıdır ve yavaş olmaktadır.

Cooley ve Tukey [29] yavaş olan işlem süresini kısaltmak ve işlemleri basitleştirmek için yeni bir dönüşüm fikri ortaya atmışlardır. Buna Hızlı Fourier Dönüşümü adı verilmektedir. Zaman ya da frekans domeninde yapılabilir. Zaman domeninde yapılan hızlı Fourier dönüşümünün denklemleri aşağıda verilmiştir [29].

FFT algoritmalarında N sayısının çift olması durumlarda problem çözümü oldukça basitleşmektedir. Bu sayede $W_N = e^{-j(\frac{2\pi}{N})}$ olmak üzere $X(k)$ yeniden yazılacak olursa eşitlik 5.13 elde edilir.

$$X_k = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r) W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r+1) W_N^{(2r+1)k} \quad (5.13)$$

Radix-2 FFT algoritması ($N = 2^R$ olmak üzere) kullanılarak $W_N^2 = W_{N/2}$ yazılabilir ve eşitlik 5.13 yeniden yazılırsa eşitlik 5.14 elde edilir.

$$X_k = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r) W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r+1) W_{N/2}^{rk} \quad (5.14)$$

Eşitlik 5.14 ile $N/2$ uzunluğuna sahip iki DFT ile N uzunluklu olan diziye ait DFT hesaplanmış olur.

$x^{cift}(n) = x(2n)$ ve $x^{tek}(n) = x(2n + 1)$ olmak üzere, eşitlik 5.15'te $X(k + (\frac{N}{2}))$ yerine konursa eşitlik 5.16 elde edilir.

$$X_k = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{cift}(n) W_{N/2}^{nk} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{tek}(n) W_{N/2}^{nk} \quad (5.15)$$

$$X_{(k+(\frac{N}{2}))} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{cift}(n) W_{N/2}^{n(k+(\frac{N}{2}))} + W_N^{k+(\frac{N}{2})} \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{tek}(n) W_{N/2}^{n(k+(\frac{N}{2}))} \quad (5.16)$$

$W_N^{nN/2} = (e^{-j2\pi/(N/2)})^{(nN/2)} = e^{-j2\pi n} = 1$ ve $W_{N/2}^{N/2} = 1$ kullanılarak eşitlik 5.17 elde edilir.

$$X_{(k+(\frac{N}{2}))} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{cift}(n) W_{N/2}^{nk} - W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{tek}(n) W_{N/2}^{nk} \quad (5.17)$$

$$X_k^{cift} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{cift}(n) W_{N/2}^{nk} \quad (5.18)$$

$$X_k^{tek} = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x^{tek}(n) W_{N/2}^{nk} \quad (5.19)$$

5.4. Ölçme Yöntemi

Harmonik analizörü kullanarak gerilim veya akımın harmonik bileşenlerinin elde edilmesidir. Harmonik analizörleri aynı zamanda harmonikler için önemli bir kavram olan THD'yi de ölçerler. Gerilim ve akıma ait THD sırasıyla eşitlik 5.20 ve eşitlik 5.21'de verilmiştir [30,31].

$$THD_V = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} / V_1 \quad (5.20)$$

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_1 \quad (5.21)$$

6. EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ VE YAK TEMELLİ HİBRİT ALGORİTMA İLE HARMONİK KESTİRİMİ

6.1. En Küçük Kareler Yöntemi

Düzgün şekilde dağılmayan verilerin tahmini için Carl Friedrich Gauss tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Yöntemde temel amaç eğri uydurulmasıdır. Bu eğri giriş koşullarındaki verilere bağlı olarak doğrusal olacak şekilde belirlenir. Verileri içeren her bir noktanın belirlenen doğruya minimum uzaklıkta olması istenmektedir. Bu uzaklıklar hata olarak belirtilecek olursa, hataların minimum ulaşması hedeflenmektedir.

Verilerdeki noktalar elde edilen doğrunun üzerinde veya altında kalabilirler. Bu pozitiflik ve negatiflik durumu birbirlerini normal şartlarda yok edebilirler. Uzaklıklar hata olarak nitelendirildiğinden, bu hataların karelerinin toplanması uygun olacaktır. Ardından hataların karelerinin toplamı minimize edilmeye çalışılır [32].

Düzgün şekilde dağılmaya veriler (x_m, y_m) olarak tanımlansın. Burada $m=1,2,\dots,N$ olacaktır. Uydurulacak eğri eşitlik 6.1’de verilmiştir.

$$y(x) = a_0 + a_1x \quad (6.1)$$

Elde edilen hatalar eşitlik 6.2’de verilmiştir.

$$e_m = y_m - x_my \quad (6.2)$$

Hataların kareleri eşitlik 6.3’te verilmiştir.

$$e_m^2 = (y_m - x_my)^2 = (y_m - a_0 - a_1x_m)^2 \quad (6.3)$$

Hataların karelerinin toplamı eşitlik 6.4’te verilmiştir.

$$E = \sum_{m=1}^N (y_m - a_0 - a_1x_m)^2 \quad (6.4)$$

E değerinin minimum olması istenmektedir. Bu sebepten eşitlik 6.4’teki a_0 ve a_1 katsayılarının uygun şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Eşitlik 6.5 ve 6.6 çözdürülerek uygun a_0 ve a_1 katsayıları bulunmaktadır [32].

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = \sum_{m=1}^N 2(y_m - a_0 - a_1x_m)(-1) = 0 \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = \sum_{m=1}^N 2(y_m - a_0 - a_1 x_m)(-x_m) = 0 \quad (6.6)$$

Harmonikli bir sinyalde harmoniklerin genlikleri en küçük kareler yöntemi ile rahatça bulunabilmektedir [2,33]. Eşitlik 6.7’de örnek bir sinyal verilmiştir.

$$z(t) = h_1(t)A_1 + h_2(t)A_2 + \dots + h_n(t)A_n = \varphi^T(t)A \quad (6.7)$$

Burada $z(t)$ sistem matrisi, A genliklerden oluşan matristir. Genliklerden oluşan A matrisi tahmin edilmeye çalışılacaktır.

A_e ’nin bulunabilmesi için maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi gerekir. Maliyet fonksiyonu eşitlik 6.8’de verilmiştir.

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (z(k) - H^T(k)A)^2 \quad (6.8)$$

Optimizasyon algoritmasının uygulanmasından sonra maliyet fonksiyonu minimize edilir ve EKKY ile A_e hesaplanır.

$$J = \frac{1}{N} (Z - HA_e)^T (Z - HA_e) = \frac{1}{N} (Z^T Z - Z^T HA_e - A_e^T H^T Z + A_e^T H^T HA_e) \quad (6.9)$$

$$(Z^T HA_e)^T = A_e H^T Z = Z^T HA_e \quad (6.10)$$

$$J = \frac{1}{N} (Z^T Z - A_e^T H^T Z - A_e H^T Z + A_e^T H^T HA_e) \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial J}{\partial A_e} = -2H^T Z + 2H^T HA_e = 0 \quad (6.12)$$

$$H^T Z = H^T HA_e \quad (6.13)$$

$$A_e = (H^T H)^{-1} H^T Z \quad (6.14)$$

6.2. Maliyet Fonksiyonları

Optimizasyon yöntemlerinde bir maliyet fonksiyonu seçilmelidir. Denklemin yapısına bağlı olarak maksimizasyon ya da minimizasyon problem haline dönüşmektedir.

Harmonik kestirim problemlerinde literatürde kullanılan farklı maliyet fonksiyonları yaklaşımları mevcuttur. Optimizasyonda belirli ve bilinen başlangıç değeri ve tahmin edilen

bir diğerk değerk vardır. Bu iki değerk arasındaki fark hata olarak belirtilir. Yine literatürde farklı şekilde hata bulma yöntemleri vardır [34]. Bunlardan bir kısmı aşağıdaki gibidir.

- Ortalama hata
- Ortalama yüzdesel hata
- Ortalama mutlak hata
- Ortalama karesel hata
- Kök ortalama karesel hata
- Ortalama mutlak yüzdesel hata

6.2.1. Ortalama hata

Bilinen değerklerle oluşturulan $X(k)$ ile tahmin edilen $X_e(k)$ arasındaki ortalama hatadır [34].

$e_i = X(k) - X_e(k)$ için;

$$OH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (6.15)$$

6.2.2. Ortalama yüzdesel hata

$X(k)$ ve $X_e(k)$ arasındaki farkın ortalama yüzdesi olarak verilmektedir. İki değerk arasındaki fark pozitif ya da negatif olabilir. Bu durumda hatalar birbirlerini yok edebilirler. Ayrıca $X(k)$ değerkinin sıfır olması halinde hata tanımlanmamıştır [34].

$$OYH = \frac{100}{n} \sum_i^n e_i / X_i(k) \quad (6.16)$$

6.2.3. Ortalama mutlak hata

$X(k)$ ve $X_e(k)$ arasındaki farkın mutlak değerk içerisinde ortalamasının alınmasıyla elde edilir. Eğriler arasındaki farkın tam ortalarından çizgi çekildiği düşünülecek olursa mutlak değerk sayesinde birbirlerini yok etme durumları ortadan kalkar [34].

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (6.17)$$

6.2.4. Ortalama karesel hata

$X(k)$ 'nin $X_e(k)$ 'ye ne kadar yakın olduğunu belirtir. Değerin sıfıra yakın olması istenmektedir. Bu sebepten minimizasyon problemlerinde kullanılabilir [34].

$$OKH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (6.18)$$

6.2.5. Kök ortalama karesel hata

Tahmin sonucu elde edilen hataların standart sapması olarak belirtilir [34].

$$KOKH = \sqrt{OKH} \quad (6.19)$$

6.2.6. Ortalama mutlak yüzdesel hata

$X(k)$ değerinin sıfır olması halinde hata tanımlanmamıştır. OYH'de olduğu gibi yüzdesel farkın mutlak değerinin alınmasıdır [34].

$$OMYH = \frac{100}{n} \sum_i^n |e_i| / |X_i(k)| \quad (6.20)$$

6.3. Yapay Arı Kolonisi

Derviş Karaboğa ve ekibi tarafından 2005 yılında yapay arı kolonisi algoritması geliştirilmiştir. Sürü optimizasyonu temelli bir yaklaşımdır. Bal arıları doğada yiyecek aramak ve bal yapabilmek için kaynak arayışındadırlar. Bu arayışlar için yaptıkları içgüdüsel olarak dans vardır. Bu dansı temel alarak yapay arı kolonisi optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Yiyeceklerin aranması ve pozisyonları için algorithmada üç çeşit arı tanımlanmıştır. Bunlar kaşif, gözcü ve işçi arılardır. İlk olarak kaşif arılar yiyeceklerin pozisyonları için rastgele biçimde dağılırlar. Kaynak arayışı sırasında kaşif arılar, işçi arılar olarak adlandırılmaktadır. Algoritma gereği belirlenen iterasyon sayısı boyunca işçi arılar, öncekinden daha iyi olan yiyeceklerin kaynaklarını bulmayı denerler. Gözcü arılar ise bu sırada kovanda olacak şekilde simüle edilirler ve işçi arılardan gelecek olan yiyecek

kaynaklarının pozisyonlarının bilgilerini beklerler. İşçi arılar kaynak bilgilerini gözcü arılara verdikten sonra, kaynaklardan elde edilen bilgilerin kalitelerini test ederler. Bu test iyileştirme amaçlı iteratif olarak devam eder. İyileşmenin olmadığı durumlarda işçi arılar kaşif arılar haline dönüşürler. Ardından yeniden kaynak arama süreci devam eder [35].

$$\varphi_{ij} = l_j + rand(0,1)(u_j - l_j) \quad (6.21)$$

Eşitlik 6.17 kullanılarak φ_{ij} çözümü belirlenir. Burada $i = \{1,2, \dots, PS\}$ ve $j = \{1,2, \dots, B\}$ olmak üzere l_j ve u_j sırasıyla alt ve üst sınırdır. PS popülasyon sayısı, İS iterasyon sayısı ve B boyut olmak üzere literatürde YAK algoritmasına ait sözde kod aşağıdaki gibi verilmektedir [36].

BAŞLA

YAK kontrol parametrelerinin belirlenmesi: PS,deneme_limiti,İS,B

φ_{ij} değerinin ilk çözüm popülasyonunun oluşturulması

deneme_limiti'nin sıfıra eşitlenmesi

φ_{ij} değerinin her bir bireye göre uygunluğunun değerlendirilmesi

döngü=1

İKEN (döngü $\leq$ İS)

{Burada işçi arıları için yeni yiyecek kaynakları üretiliyor.}

İÇİN i=1,PS

φ_i işçi arıların yiyecek kaynakları ve yeni yiyecek kaynakları v_i olmak üzere:

$v_{ij} = \varphi_{ij} + \alpha_{ij}(\varphi_{ij} - \varphi_{kj}); k \in \{1,2, \dots, PS\}, k \neq i$ hesaplanması

v_i 'nin uygunluğunun belirlenmesi

v_i ile φ_i arasında en uygun olanının çözüme uygulanması

φ_i çözümünün iyileşmesi durumunda $deneme_i=0$, iyileşmiyorsa

$deneme_i = deneme_i + 1$

İÇİN SONU

Uygunluk değerine bağlı olarak her bir φ_i çözümünün ihtimalinin hesaplanması (p_i)

{Burada gözcü arılar için yeni yiyecek kaynakları oluşturuluyor.}

iter=0 ve i=1 olarak ayarlanması

İKEN (iter $\leq$ PS)

Rastgele olarak gen_rand sayısının oluşturulması

EĞER $\text{gen_rand} < p_i$

φ_i işçi arıların yiyecek kaynakları ve yeni yiyecek kaynakları

v_i olmak üzere:

$$v_{ij} = \varphi_{ij} + \alpha_{ij}(\varphi_{ij} - \varphi_{kj}); k \in \{1, 2, \dots, PS\}, k \neq i$$

hesaplanması

v_i 'nin uygunluğunun belirlenmesi

v_i ile φ_i arasında en uygun olanının çözüme uygulanması

φ_i çözümünün iyileşmesi durumunda $\text{deneme}_i = 0$,

iyileşmiyorsa $\text{deneme}_i = \text{deneme}_i + 1$

$\text{iter} = \text{iter} + 1$

EĞER SONU

$i = i + 1$

EĞER ($i > PS$)

$i = 1$

EĞER SONU

İKEN SONU

{Kaşif arıların belirlenmesi}

EĞER $\max(\text{deneme}_i) > \text{deneme_limiti}$

Yeni üretilen sonuçların φ_i ile değiştirilmesi

EĞER SONU

Şu ana kadar elde edilen en iyi sonucun kaydedilmesi

$\text{döngü} = \text{döngü} + 1$

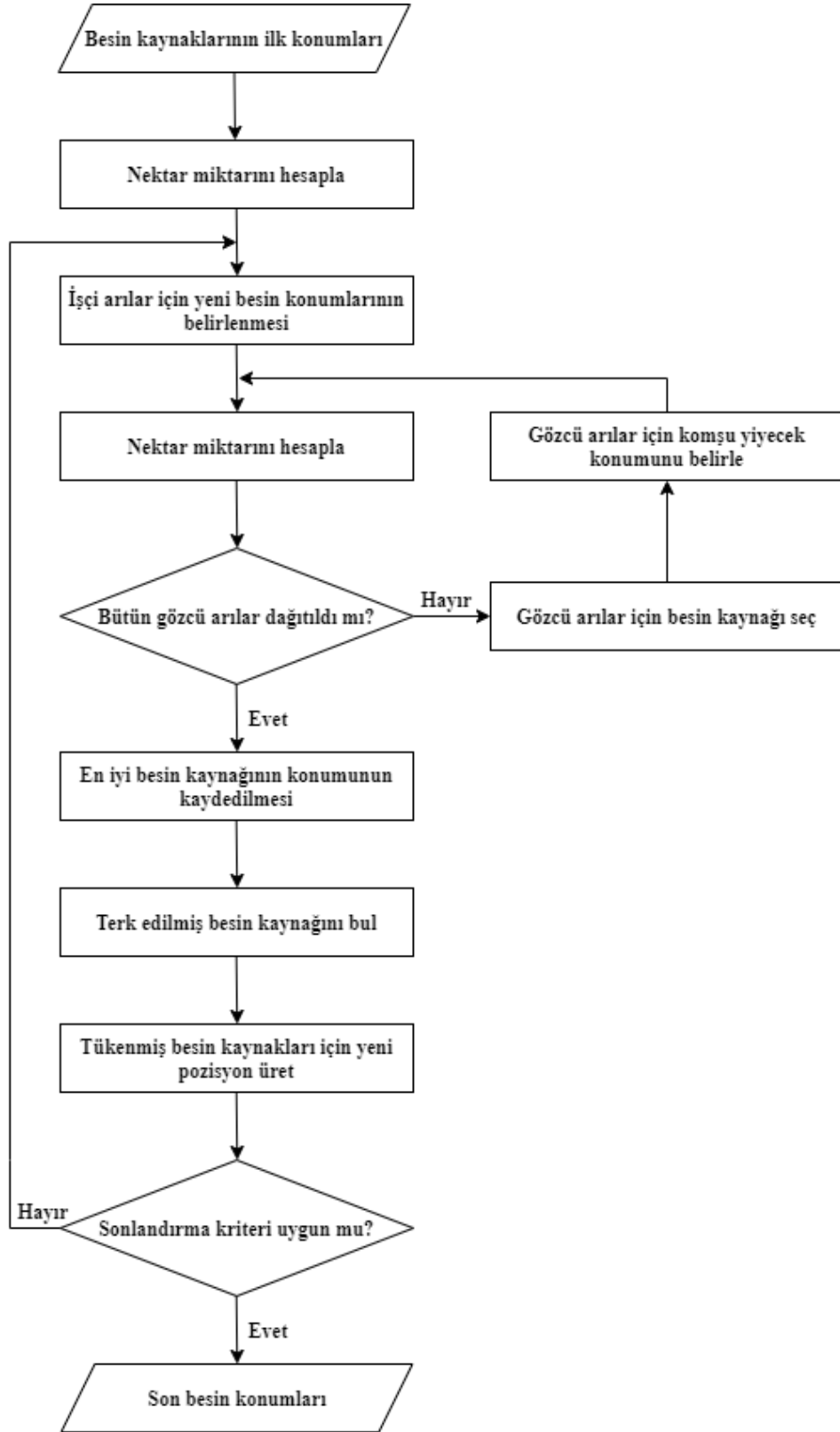
İKEN SONU

Faz açısı tahmininde kullanılmak üzere H_e H tahmin matrisinin tahmin edilmesi

EKKY kullanılarak $A_1, A_2, \dots, A_n$ tahmin edilmesi

SON

YAK algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 6.1.'de verilmektedir [36].

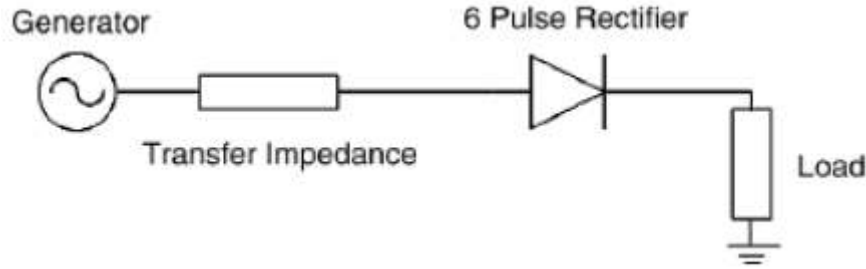


Şekil 6.1.YAK akış diyagramı [36]

7. UYGULAMALAR

7.1. En Küçük Kareler Yöntemi ve YAK Temelli Hibrit Algoritma Kullanılarak Harmonik Tahmini Uygulaması-1

Bölüm 4.4.’teki eşitlik 4.3’te n darbeli çeviricinin oluşturacağı harmoniklere bağlı seviye verilmiştir. Burada n darbe sayısıdır ve literatürdeki çalışmada 6 darbeli çevirici kullanılmıştır. 6 darbeli tam dalga köprü doğrultucudan ölçümler alınıp kaydedilmiştir. Şekil 7.1.’de sistemin gösterimi yapılmıştır. Tablo 7.1.’de elde edilen sonuçlar verilmiştir [2].



Şekil 7.1. 6 darbeli tam dalga köprü doğrultucu içeren elektrik sistemi [2]

Tablo 7.1. 6 darbeli tam dalga köprü doğrultucu harmonik ölçüm sonuçları [2]

Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Faz Açısı (Derece)
50	0.95	-2.02
250	0.09	82.1
350	0.043	7.9
550	0.03	-147.1
650	0.033	162.6

Tablo 7.1.’e bağlı olarak elde edilen test sinyali eşitlik 7.1’de verilmiştir.

$$X(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_5 \sin(\omega_5 t + \varphi_5) + A_7 \sin(\omega_7 t + \varphi_7) + A_{11} \sin(\omega_{11} t + \varphi_{11}) + A_{13} \sin(\omega_{13} t + \varphi_{13}) \quad (7.1)$$

Burada $A_1, A_5, A_7, A_{11}, A_{13}$ ilgili frekanstaki harmoniklerin genlikleridir. $\varphi_1, \varphi_5, \varphi_7, \varphi_{11}, \varphi_{13}$ ilgili frekanstaki faz açılarıdır [2].

YAK algoritması faz açılarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Gürültülü ve gürültüsüz koşullar incelenerek denemeler yapılmıştır. Gürültü için sırasıyla 0dB, 10dB ve

20dB değerleri kullanılmıştır. Literatürdeki algoritmada popülasyon ve nesil sayıları 50 ve 100 olarak verilmiştir [2]. Ayrıca YAK algoritmasının performansını değerlendirmek ve çalışmasını gösterebilmek için farklı parametrelerle de denemeler yapılmıştır.

YAK algoritmasında da diğer optimizasyon algoritmalarında olduğu gibi maliyet fonksiyonu kullanılmaktadır. Seçilen maliyet fonksiyonu ortalama mutlak hata (mean absolute error) yaklaşımı ile belirlenmiştir. Eşitlik 7.2’de maliyet fonksiyonu verilmiştir.

$$MF(k) = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} |X(k) - X_e(k)|}{k} \quad (7.2)$$

Burada $X(k)$ test sinyali ve $X_e(k)$ tahmin edilen sinyaldir.

Algoritmanın performansını test edebilmek için hata fonksiyonu olarak eşitlik 7.3 kullanılmıştır. Hata fonksiyonunda kullanılan yaklaşım ise ortalama yüzdelik hatadır (mean percentage error).

$$\varepsilon = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} |X(k) - X_e(k)|}{\sum_{k=0}^{\infty} |X(k)|} \times 100 \quad (7.3)$$

YAK algoritması aşağıda belirtilen koşullar için çalıştırılmıştır. YAK algoritmasında çok az parametre kullanılır. Bunlar aşağıdaki şekildedir.

- Popülasyon sayısı
- İterasyon sayısı
- İşçi arı yüzdesi
- Gözcü arı yüzdesi

İlk olarak işçi ve gözcü arıların yüzdelere bağlı olarak algoritma çalıştırılmıştır.

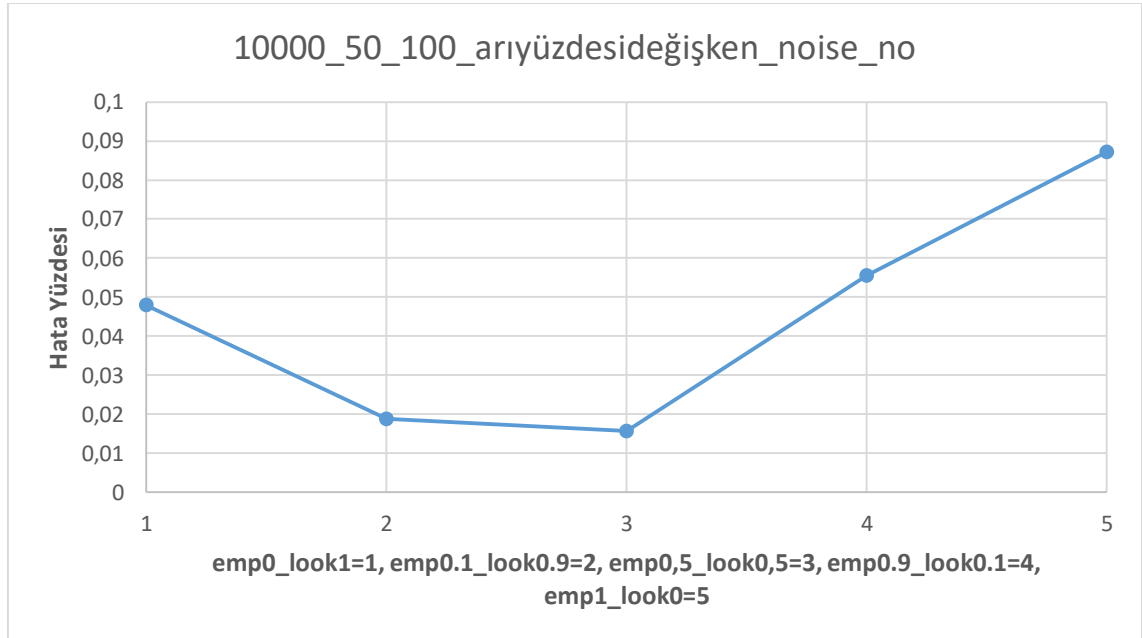
Algoritma çalıştırılırken “**x_y_z_emp”t”_look”k”_noise_m**” şeklinde tablolar ve grafikler oluşturulacaktır. Burada sırasıyla x örnekleme sayısı, y popülasyon sayısı, z iterasyon sayısı, t işçi arı yüzdesi, k gözcü arı yüzdesi ve m gürültü (SNR) miktarıdır. m değeri “NO” olarak belirtilirse bu gürültünün olmadığı anlama gelmektedir.

Tablo 7.2.'de işçi ve gözcü arıların yüzdelerinin değiştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.2. İşçi ve gözcü arı yüzdelerinin değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=10000, y=50, z=100, m=NO koşulunda)

10000_50_100_emp0_look1_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
35,9374	0,0479
10000_50_100_emp0.1_look0.9_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
33,2676	0,0188
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
29,5008	0,0157
10000_50_100_emp0.9_look0.1_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
27,9431	0,0555
10000_50_100_emp1_look0_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
31,7903	0,0872

Şekil 7.2.'de sonuçların ortalama hata yüzdelerinin grafiği verilmiştir.



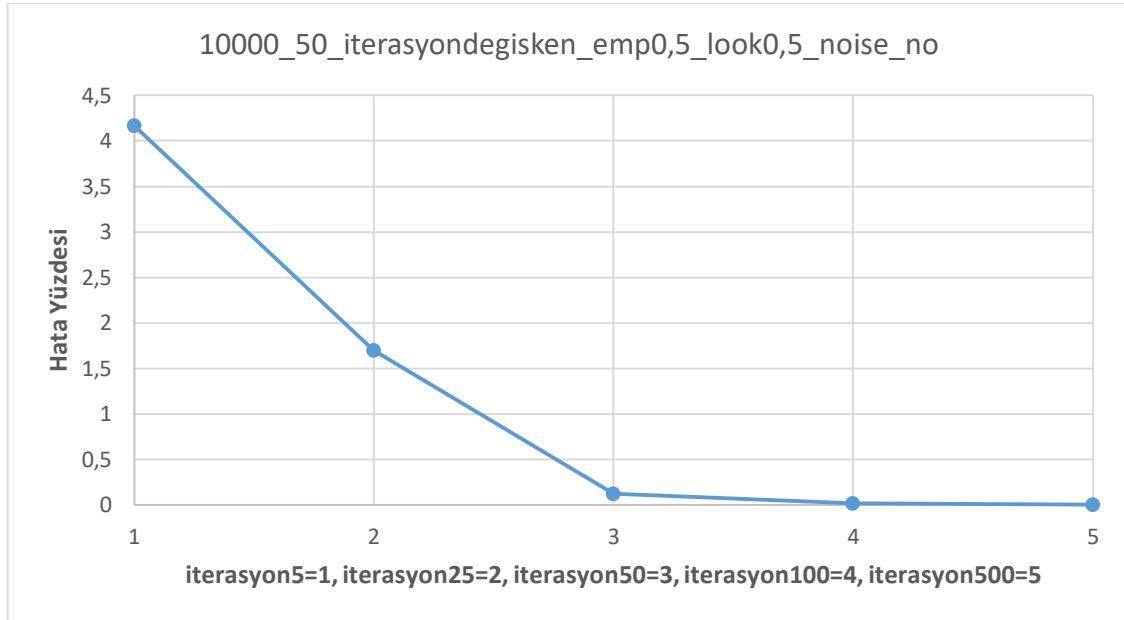
Şekil 7.2. İşçi ve gözcü arı yüzdelerinin değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=10000, y=50, z=100, m=NO koşulunda)

Tablo 7.3.'te iterasyon sayısının değıştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.3. İterasyon sayısının değıştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=10000, y=50, t=(0,5), k=(0,5), m=NO koşulunda)

10000_50_5_emp0.5_look0.5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
1,5225	4,1673
10000_50_25_emp0.5_look0.5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
9,486	1,6957
10000_50_50_emp0.5_look0.5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
14,0684	0,1203
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
29,5008	0,0157
10000_50_500_emp0.5_look0.5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
165,8882	1,76795E-07

Şekil 7.3.'te sonuçların ortalama hata yüzdelerinin grafiğı verilmiştir.



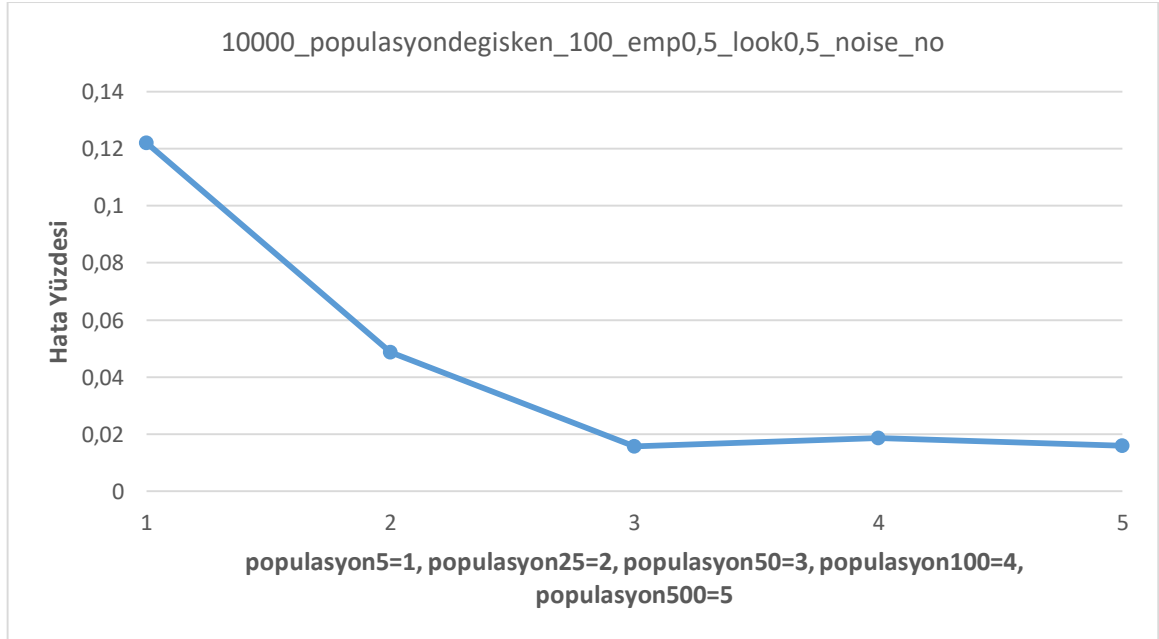
Şekil 7.3. İterasyon sayısının değıştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=10000, y=50, t=(0,5), k=(0,5), m=NO koşulunda)

Tablo 7.4.'te popülasyon sayısının değiştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.4. Popülasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)

10000_5_100_emp0.5_look0.5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
2,0897	0,1221
10000_25_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
11,8984	0,0487
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
29,5008	0,0157
10000_100_100_emp0.5_look0.5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
65,4775	0,0188
10000_500_100_emp0.5_look0.5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
371,7248	0,0161

Şekil 7.4.'te sonuçların ortalama hata yüzdelerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 7.4. Popülasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$, $m=NO$ koşulunda)

Tablo 7.5. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_1

10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Tahmin Edilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	0,95	0,9499	0,010526316
250	0,09	0,0899	0,111111111
350	0,043	0,0429	0,23255814
550	0,03	0,0299	0,333333333
650	0,033	0,0329	0,303030303

Tablo 7.6. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_2

10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Tahmin Edilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	-2,02	-2,0304	0,5148
250	82,1	82,0179	0,1
350	7,9	8,0779	2,2518
550	-147,1	32,7961	0,0315
650	162,6	-17,2475	0,0937

Tablo 7.7. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_20_1

10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_20			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Tahmin Edilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	0,95	0,9499	0,010526316
250	0,09	0,0902	0,222222222
350	0,043	0,0432	0,465116279
550	0,03	0,030081	0,27
650	0,033	0,0327	0,909090909

Tablo 7.8. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_20_2

10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_20			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Tahmin Edilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	-2,02	-2,0353	0,7574
250	82,1	81,8576	0,2952
350	7,9	7,764	1,7215
550	-147,1	32,7402	0,4857
650	162,6	-18,5514	0,7081

Tablo 7.9. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_10_1

10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_10			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Tahmin Edilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	0,95	0,9507	0,073684211
250	0,09	0,0901	0,111111111
350	0,043	0,0429	0,23255814
550	0,03	0,0295	1,666666667
650	0,033	0,0332	0,606060606

Tablo 7.10. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_10_2

10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_10			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Tahmin Edilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	-2,02	-2,039	0,9405
250	82,1	81,8885	0,2576
350	7,9	8,5801	8,6088
550	-147,1	33,3774	1,451
650	162,6	-17,6318	0,1425

Tablo 7.11. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_0_1

10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_0			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Tahmin Edilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	0,95	0,9491	0,094736842
250	0,09	0,0899	0,111111111
350	0,043	0,0411	4,418604651
550	0,03	0,0295	1,666666667
650	0,033	0,0322	2,424242424

Tablo 7.12. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_0_2

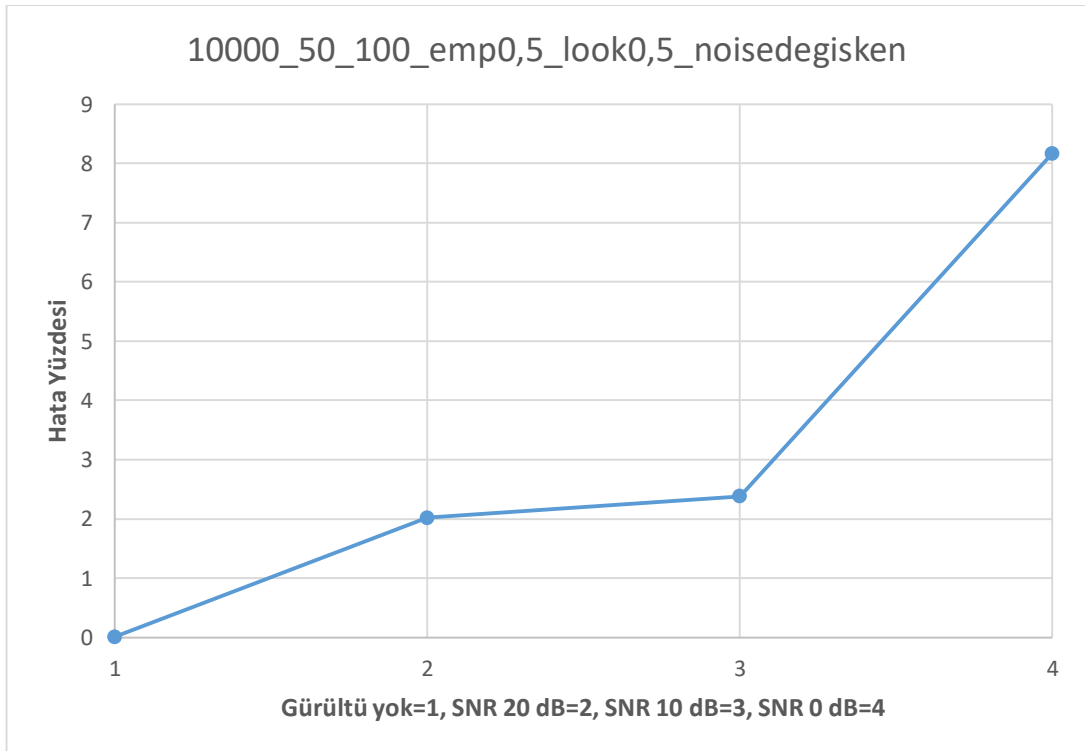
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_0			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Tahmin Edilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	-2,02	-2,079	2,9207
250	82,1	83,1589	1,2897
350	7,9	9,0861	15,0139
550	-147,1	45,2601	37,5686
650	162,6	-16,4258	0,05991

Tablo 7.13.'te gürültü miktarının değiştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.13. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$ koşulunda)

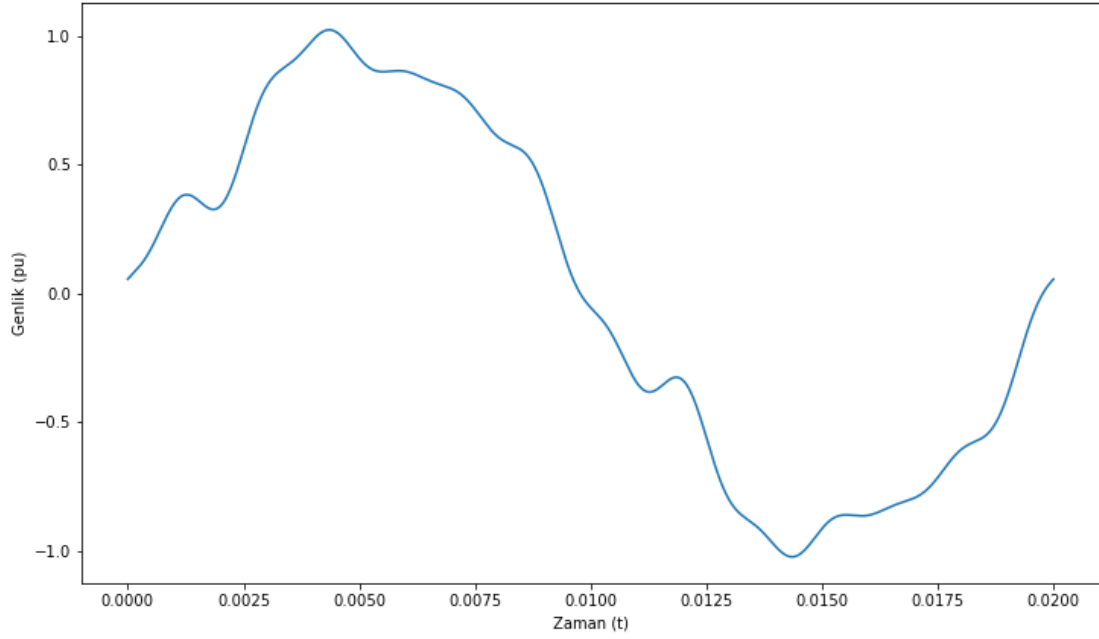
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
29,5008	0,01
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_20	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
25,3883	2,02
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_10	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
25,4061	2,38
10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_0	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
27,0734	8,17

Şekil 7.5.'te sonuçların ortalama hata yüzdelerinin grafiği verilmiştir.



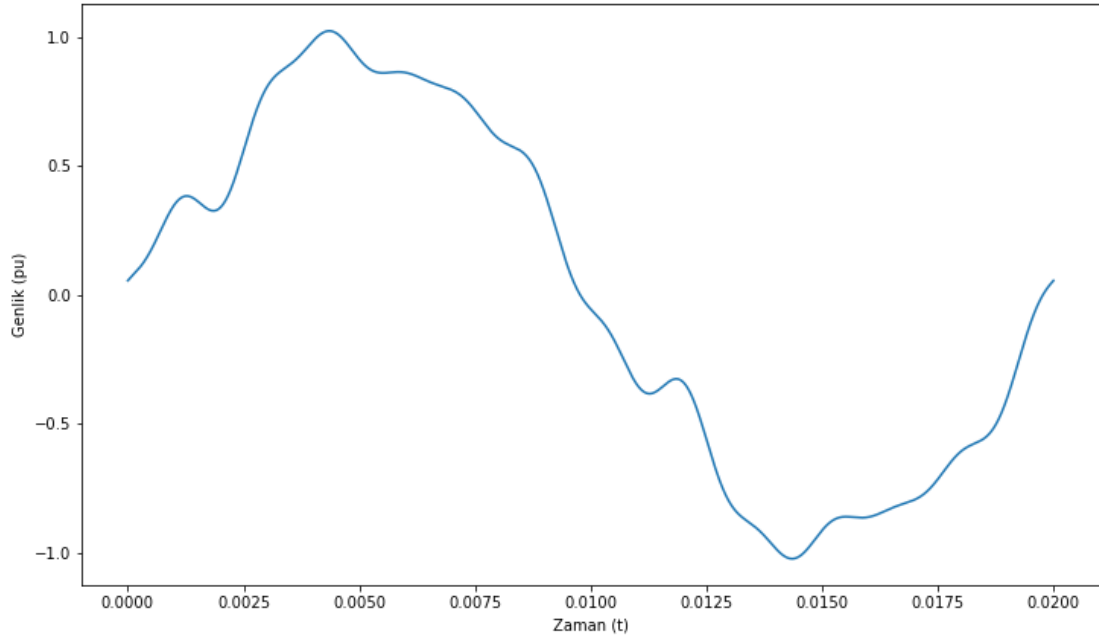
Şekil 7.5. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi ($x=10000$, $y=50$, $z=100$, $t=(0,5)$, $k=(0,5)$ koşulunda)

Tablo 7.1.'e bağılı olarak elde edilen test sinyalinin grafiğı Şekil 7.6'da verilmiştir.



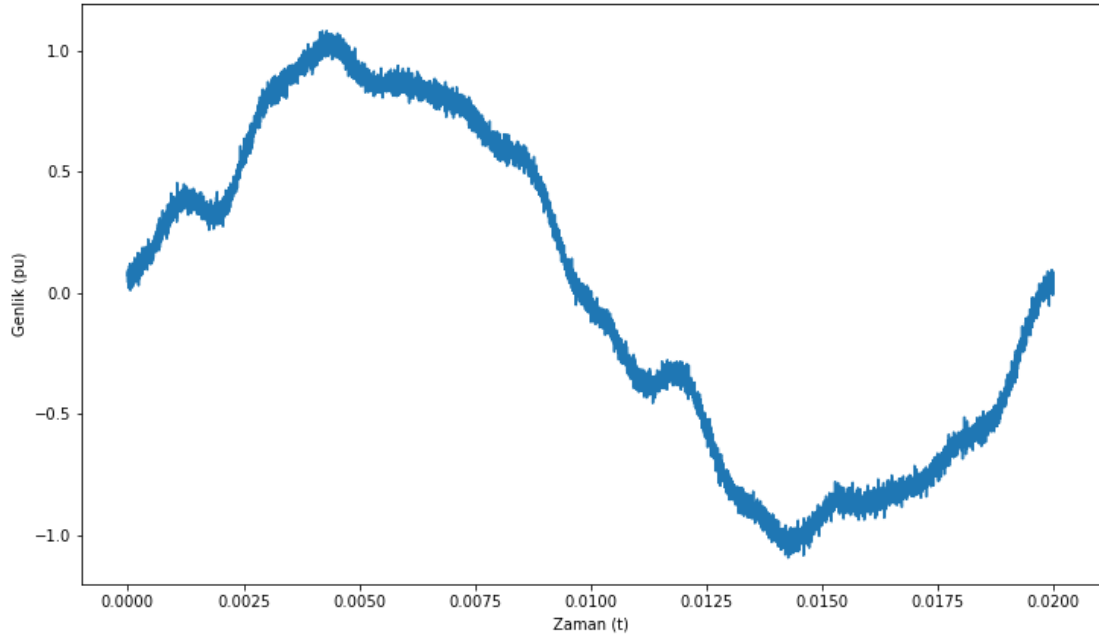
Şekil 7.6. Oluşturulan $X(t)$ sinyali

Şekil 7.6.'daki grafiğı herhangi bir gürültü eklenmediğı zaman yine aynısı ortaya çıkacaktır. Bu da Şekil 7.7.'de verilmiştir.



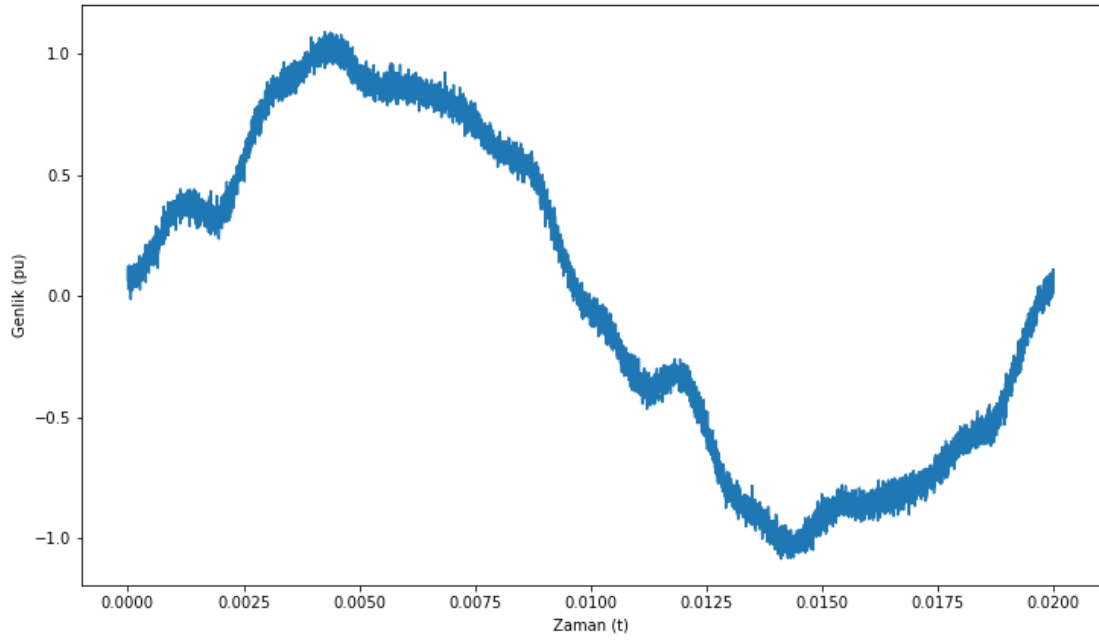
Şekil 7.7. Gürültüsüz $X(t)$ sinyali

Şekil 7.8.'de SNR=20dB gürültülü $X(t)$ sinyali verilmiştir.



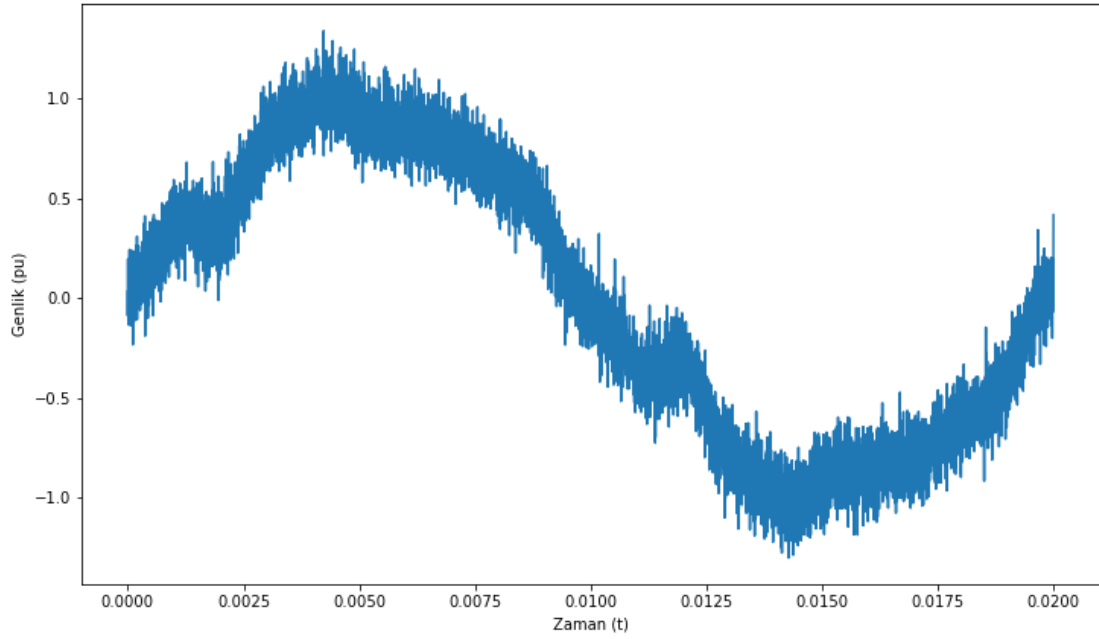
Şekil 7.8. SNR=20dB gürültülü $X(t)$ sinyali

Şekil 7.9.'da SNR=10dB gürültülü $X(t)$ sinyali verilmiştir.



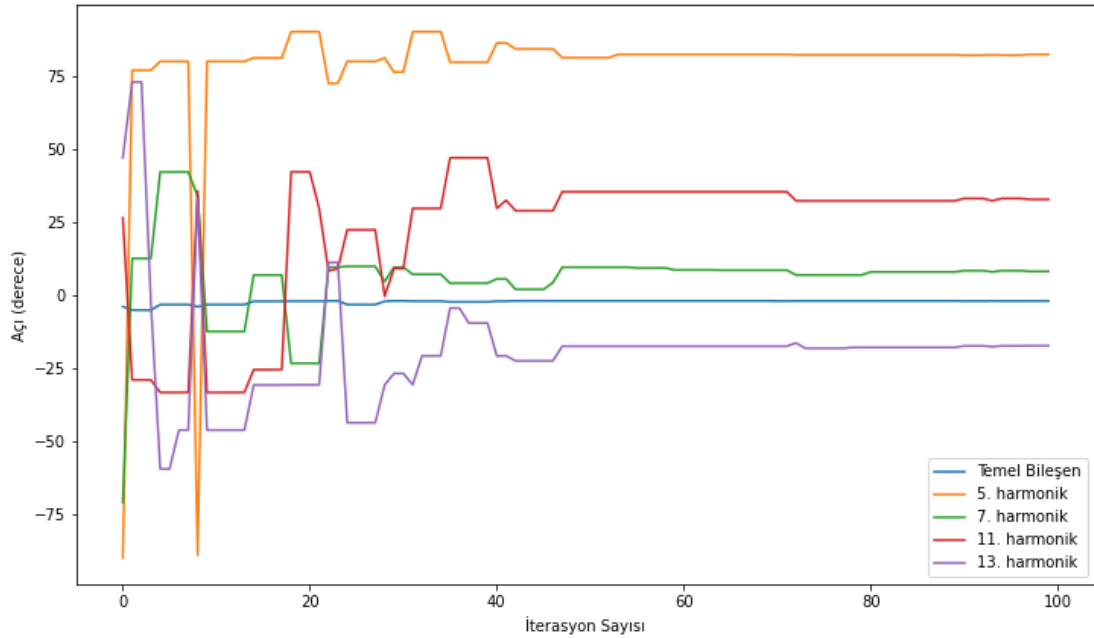
Şekil 7.9. SNR=10dB gürültülü $X(t)$ sinyali

Şekil 7.10.'da SNR=0dB gürültülü $X(t)$ sinyali verilmiştir.

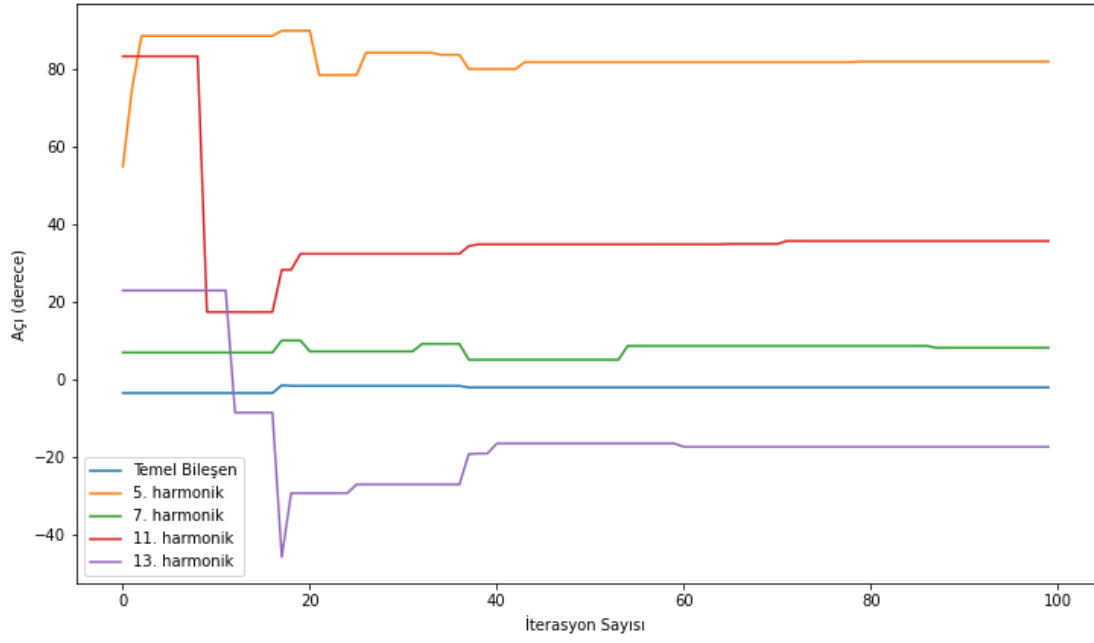


Şekil 7.10. SNR=0dB gürültülü $X(t)$ sinyali

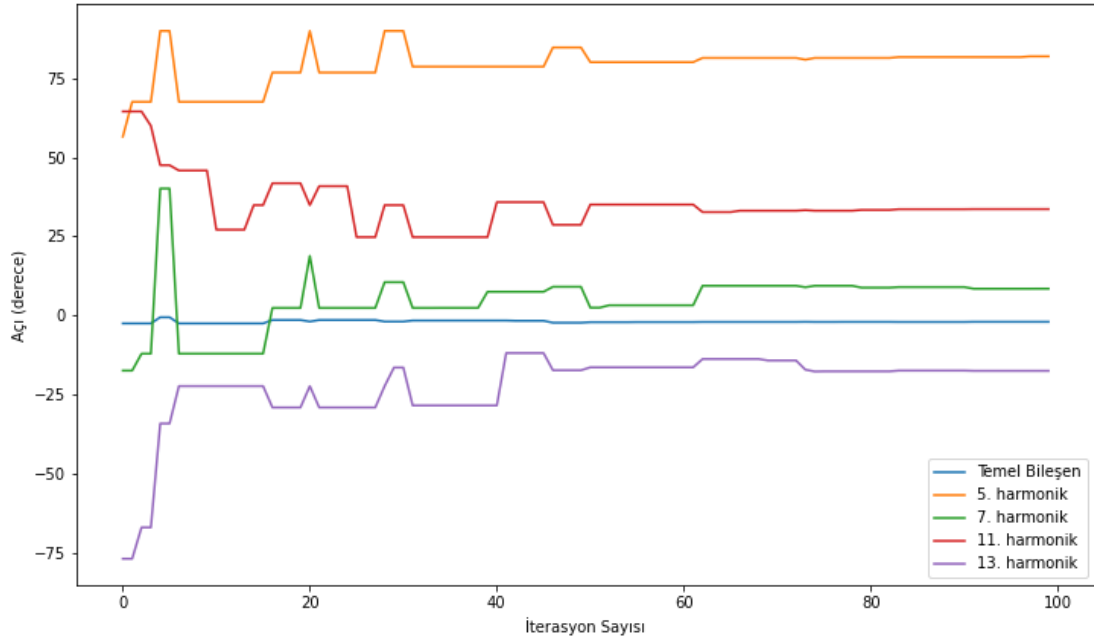
İterasyon sayısı boyunca tahmin edilen açı değerlerinin sonuçları, gürültüsüz ve gürültülü koşullar için Şekil 7.11., Şekil 7.12., Şekil 7.13. ve Şekil 7.14.'te verilmiştir.



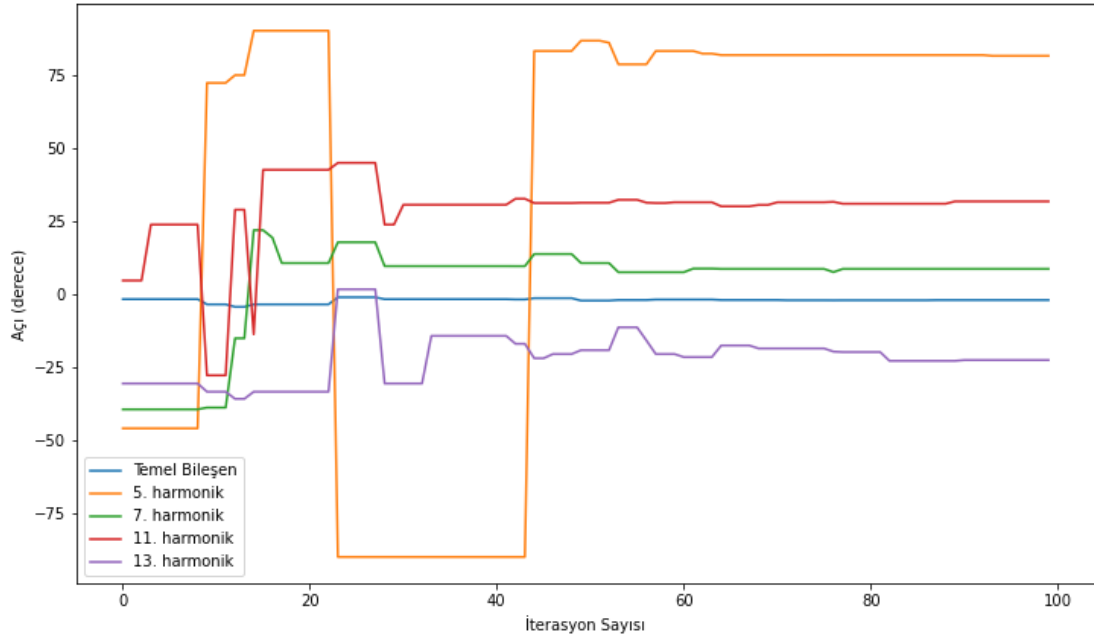
Şekil 7.11. Gürültüsüz koşulda tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açı değerleri



Şekil 7.12. SNR=20dB gürültüde tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açı değerleri

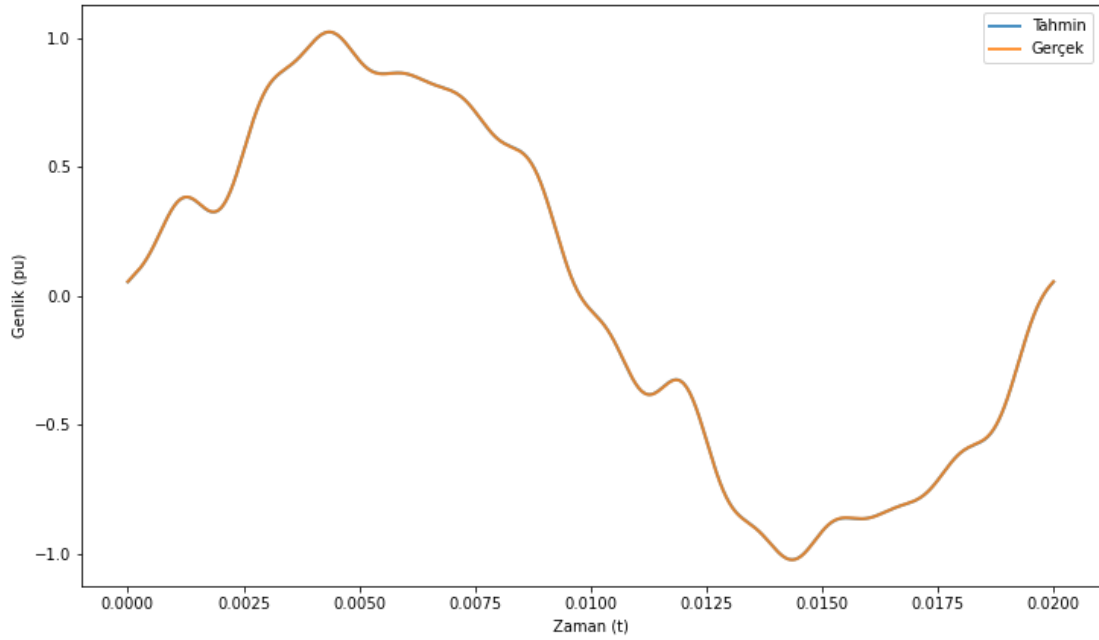


Şekil 7.13. SNR=10dB gürültüde tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açı değerleri



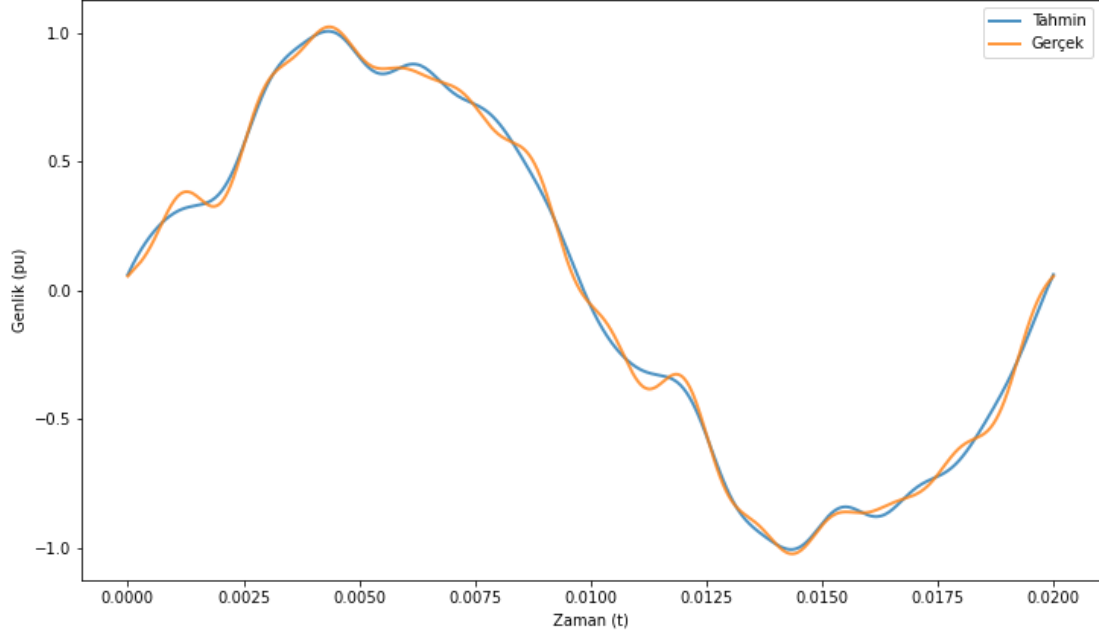
Şekil 7.14. SNR=0dB gürültüde tahmin edilen $X_e(t)$ sinyalinin açı değerleri

Çalışma sırasında $X(t)$ ve $X_e(t)$ sinyallerinin birlikte verilmesi de hedeflenmiştir. “10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO” koşuluna bağlı olarak $X(t)$ ve $X_e(t)$ sinyalleri birlikte Şekil 7.15.’te verilmiştir.



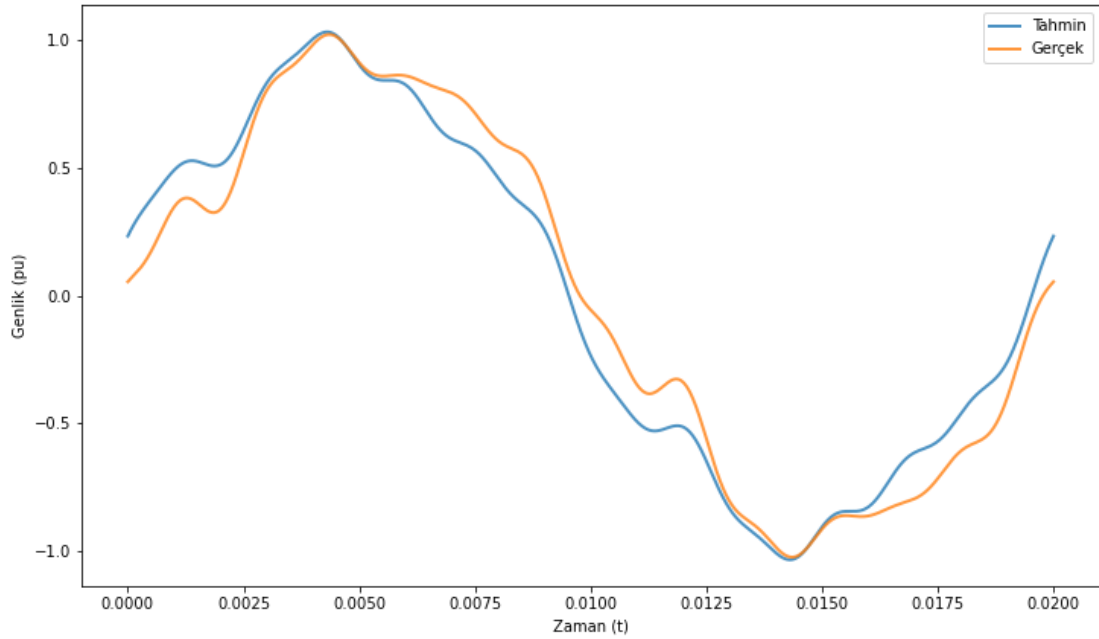
Şekil 7.15. 10000_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X(t)$ ve $X_e(t)$

“10000_20_20_emp0.5_look0.5_noise_NO” koşuluna bağlı olarak $X(t)$ ve $X_e(t)$ sinyalleri birlikte Şekil 7.16.’da verilmiştir.



Şekil 7.16. 10000_20_20_emp0.5_look0.5_noise_NO koşulundaki $X(t)$ ve $X_e(t)$

“10000_5_5_emp0.5_look0.5_noise_NO” koşuluna bağlı olarak $X(t)$ ve $X_e(t)$ sinyalleri birlikte Şekil 7.17.’de verilmiştir.



Şekil 7.17. 10000_5_5_emp0.5_look0.5_noise_NO koşulundaki $X(t)$ ve $X_e(t)$

7.2. En Küçük Kareler Yöntemi ve YAK Temelli Hibrit Algoritma Kullanılarak Harmonik Tahmini Uygulaması-2

Bir ark fırınında ve güç elektroniği içeren devrelerde harmoniklerin oluşacağı belirtilmiştir. İçerisinde DC bileşen bulunan sistemden ölçümler alınıp kaydedilmiştir [37].

Tablo 7.14. DC bileşen içeren sistemin harmonik ölçüm sonuçları [37]

Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Faz Açısı (Derece)
50	1,5	80
150	0,5	60
250	0,2	45
350	0,15	36
550	0,1	30

Tablo 7.14.'e bağlı olarak elde edilen $X_2(t)$ sinyali eşitlik 7.4'te verilmiştir.

$$X_2(t) = 1.5 \sin(\omega t + 80^\circ) + 0.5 \sin(3\omega t + 60^\circ) + 0.2 \sin(5\omega t + 45^\circ) + 0.15 \sin(7\omega t + 36^\circ) + 0.1 \sin(11\omega t + 30^\circ) + 0.5 \exp(-5t) + \mu(t) \quad (7.4)$$

Bölüm 7.1.'de olduğu gibi faz açılarını tahmin etmek için YAK algoritması kullanılmıştır. Gürültülü ve gürültüsüz koşullar incelenerek denemeler yapılmıştır. Gürültü için sırasıyla 10dB, 20dB ve 40dB değerleri kullanılmıştır. Popülasyon sayısı 100 ve iterasyon sayısı 100 olarak seçilmiştir [37]. Ayrıca YAK algoritmasının performansını değerlendirmek ve çalışmasını gösterebilmek için farklı parametrelerle de denemeler yapılmıştır.

Bölüm 7.1.'de maliyet fonksiyonu eşitlik 7.2'de ortalama mutlak hata olarak verilmiştir. Bu bölümde de maliyet fonksiyonu olarak ortalama mutlak hata kullanılmıştır.

Algoritmanın performansını test edebilmek için hata fonksiyonu olarak eşitlik 7.3 kullanılmıştır. Hata fonksiyonunda kullanılan yaklaşım ise ortalama yüzdelik hatadır.

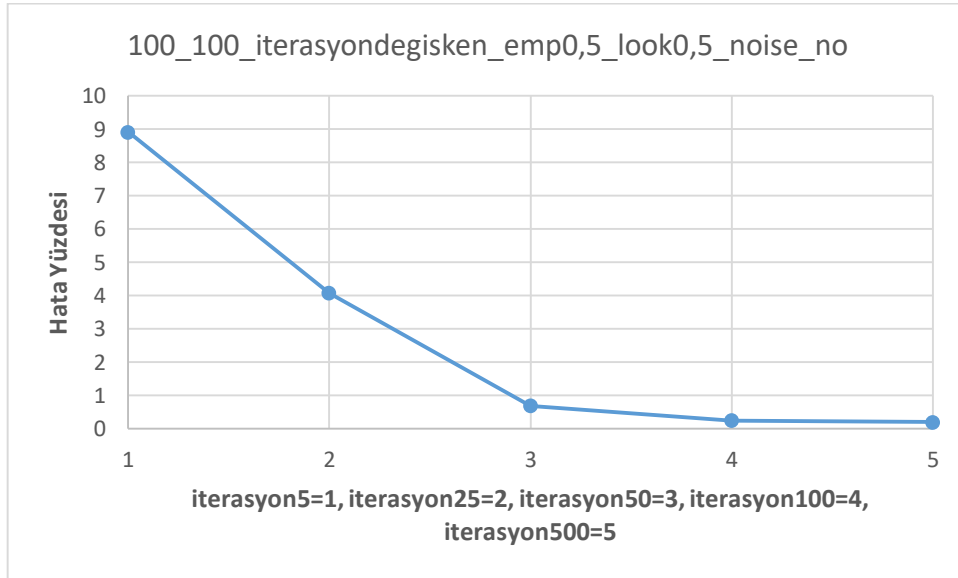
Algoritma çalıştırılırken “x_y_z_emp”t”_look”k”_noise_m” şeklinde tablolar ve grafikler oluşturulacaktır. Burada sırasıyla x örnekleme sayısı, y popülasyon sayısı, z iterasyon sayısı, t işçi arı yüzdesi, k gözcü arı yüzdesi ve m gürültü (SNR) miktarıdır. m değeri “NO” olarak belirtilirse bu gürültünün olmadığı anlama gelmektedir.

Tablo 7.15.'te iterasyon sayısının değiştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.15. İterasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=100, y=100, t=(0,5), k=(0,5), m=NO koşulunda)

100_100_5_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
0,8118	8,9164
100_100_25_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
3,1347	4,0708
100_100_50_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
5,9522	0,6871
100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
14,6737	0,2438
100_100_500_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
65,4756	0,1996

Şekil 7.18.'de sonuçların ortalama hata yüzdelerinin grafiği verilmiştir.



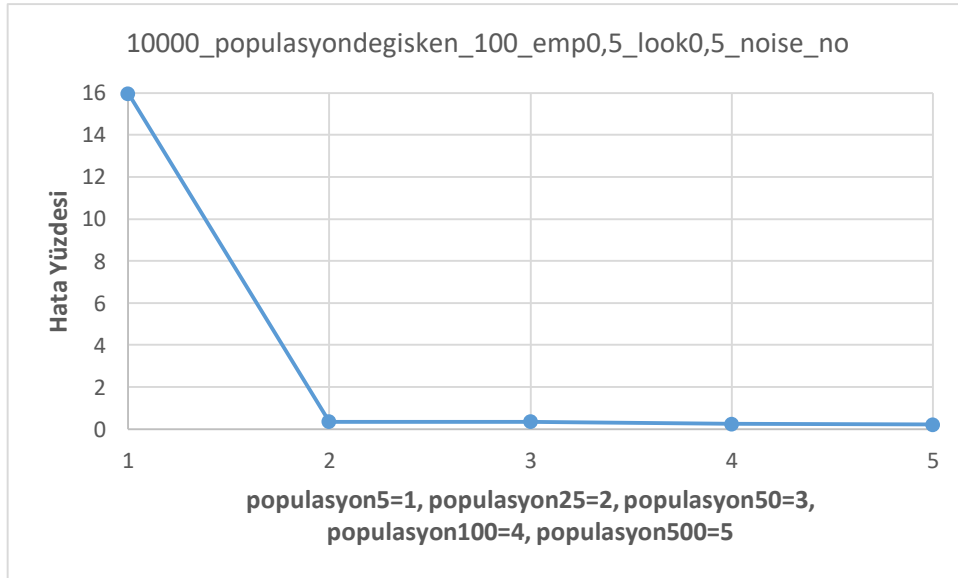
Şekil 7.18. İterasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=100, y=100, t=(0,5), k=(0,5), m=NO koşulunda)

Tablo 7.16.'da popülasyon sayısının değiştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.16. Popülasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=100, z=100, t=(0,5), k=(0,5), m=NO koşulunda)

100_5_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
0,6214	15,9707
100_25_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
3,1596	0,3531
100_50_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
6,3584	0,3455
100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
14,6737	0,2438
100_500_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzdelik Hata
75,6489	0,2103

Şekil 7.19.'da sonuçların ortalama hata yüzdelerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 7.19. Popülasyon sayısının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=100, z=100, t=(0,5), k=(0,5), m=NO koşulunda)

Tablo 7.17. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_1

100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_1			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Kestirilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	1,5	1,5027	0,18
150	0,5	0,5024	0,48
250	0,2	0,202	1
350	0,15	0,1516	1,066666667
550	0,1	0,101	1

Tablo 7.18. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_2

100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO_2			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Kestirilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	80	80,0105	0,013125
150	60	59,9108	0,148667
250	45	45,4002	0,889333
350	36	35,4716	1,467778
550	30	29,6278	1,240667

Tablo 7.19. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_40_1

100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_40_1			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Kestirilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	1,5	1,4956	0,2933333
150	0,5	0,501	0,2
250	0,2	0,2118	5,9
350	0,15	0,1677	11,8
550	0,1	0,0953	4,7

Tablo 7.20. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_40_2

100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_40_2			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Kestirilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	80	80,5497	0,687125
150	60	59,0395	1,600833
250	45	48,9365	8,747778
350	36	36,6212	1,725556
550	30	37,0122	23,374

Tablo 7.21. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_20_1

100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_20_1			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Kestirilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	1,5	1,5038	0,2533333
150	0,5	0,5072	1,44
250	0,2	0,208	4
350	0,15	0,1636	9,0666667
550	0,1	0,1149	14,9

Tablo 7.22. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_20_2

100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_20_2			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Kestirilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	80	80,1542	0,19275
150	60	61,0471	1,745167
250	45	44,1688	1,847111
350	36	38,4197	6,721389
550	30	35,4778	18,25933

Tablo 7.23. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_10_1

100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_10_1			
Frekans (Hz)	Gerilimin Genliği (pu)	Kestirilen Gerilimin Genliği (pu)	Hata (%)
50	1,5	1,5168	1,12
150	0,5	0,4984	0,32
250	0,2	0,2215	10,75
350	0,15	0,1449	3,4
550	0,1	0,1003	0,3

Tablo 7.24. 100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_10_2

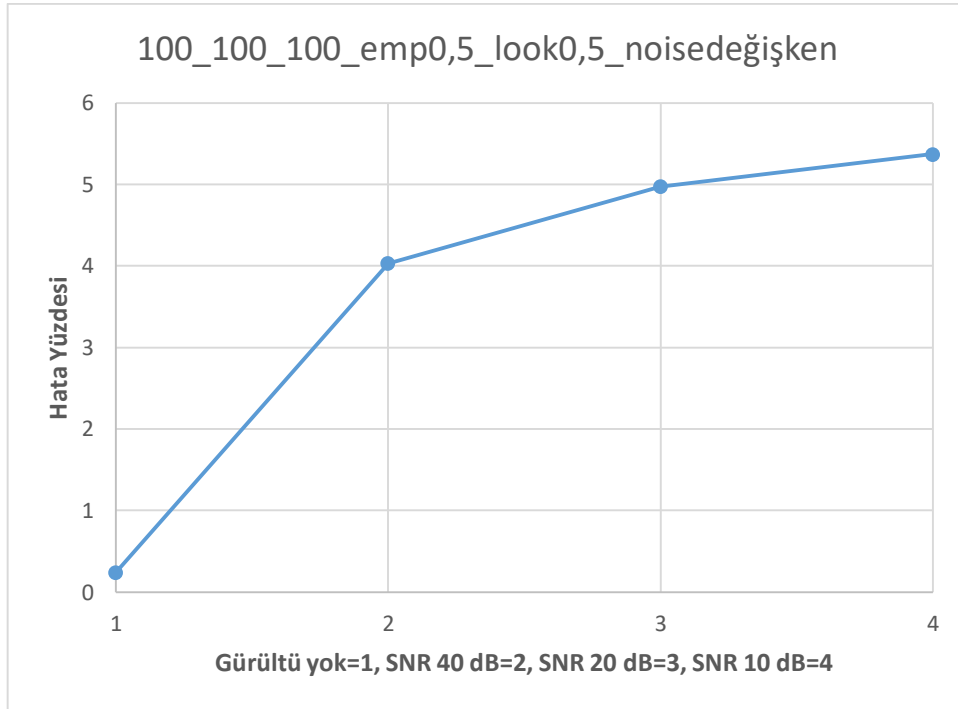
100_100_100_emp0.5_look0.5_noise_10_2			
Frekans (Hz)	Faz Açısı (Derece)	Kestirilen Faz Açısı (Derece)	Hata (%)
50	80	80,6004	0,7505
150	60	59,8434	0,261
250	45	41,9951	6,677556
350	36	37,6113	4,475833
550	30	32,2731	7,577

Tablo 7.25.'te gürültü miktarının değiştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.25. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=100, y=100, z=100, t=(0,5), k=(0,5) koşulunda)

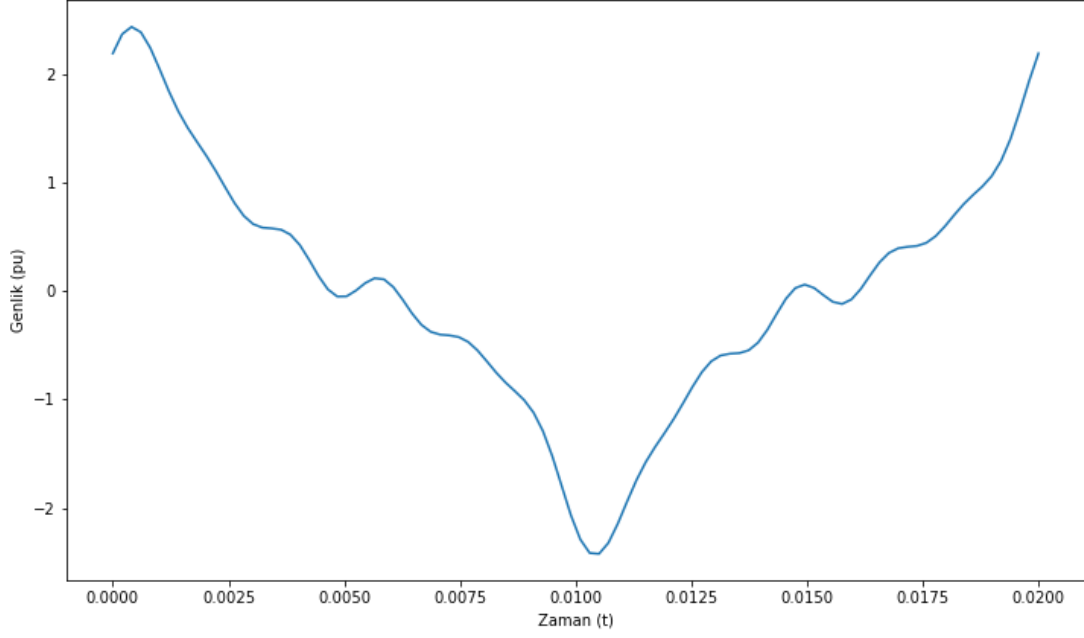
100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
14,6737	0,2438
100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_40	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
10,475	4,03
100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_20	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
11,2878	4,972
100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_10	
İşlem Süresi (saniye)	Ortalama Yüzelik Hata
12,2899	5,369

Şekil 7.20.'de sonuçların ortalama hata yüzdelerinin grafiği verilmiştir.



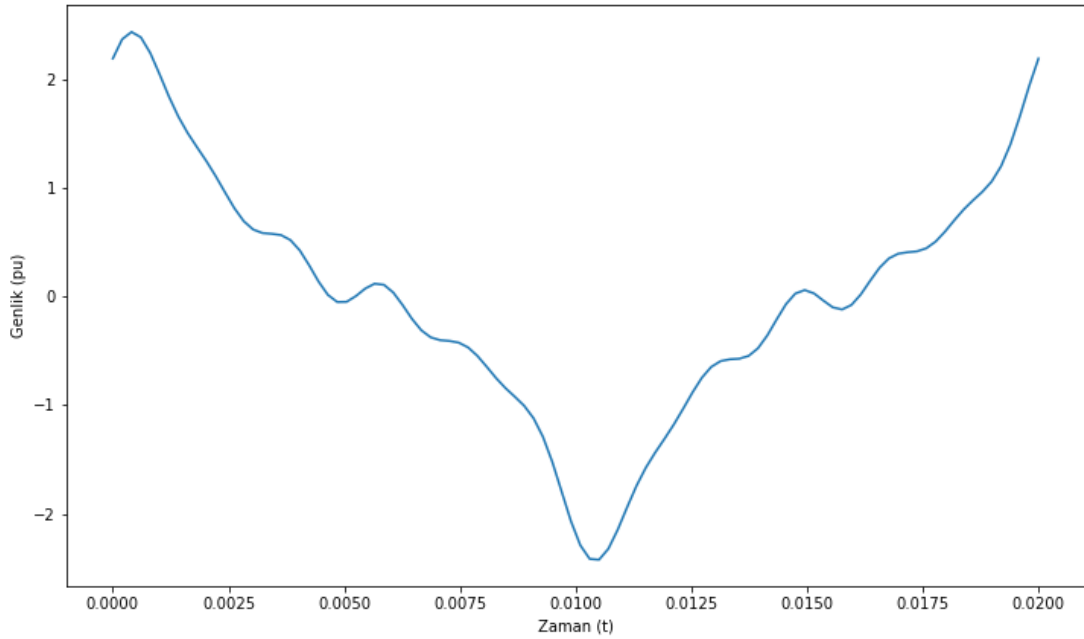
Şekil 7.20. Gürültü miktarının değiştirilerek sonuçların elde edilmesi (x=100, y=100, z=100, t=(0,5), k=(0,5) koşulunda)

Tablo 7.15.'e bağılı olarak elde edilen $X2(t)$ sinyalinin grafiğı Şekil 7.21.'de verilmiştir.



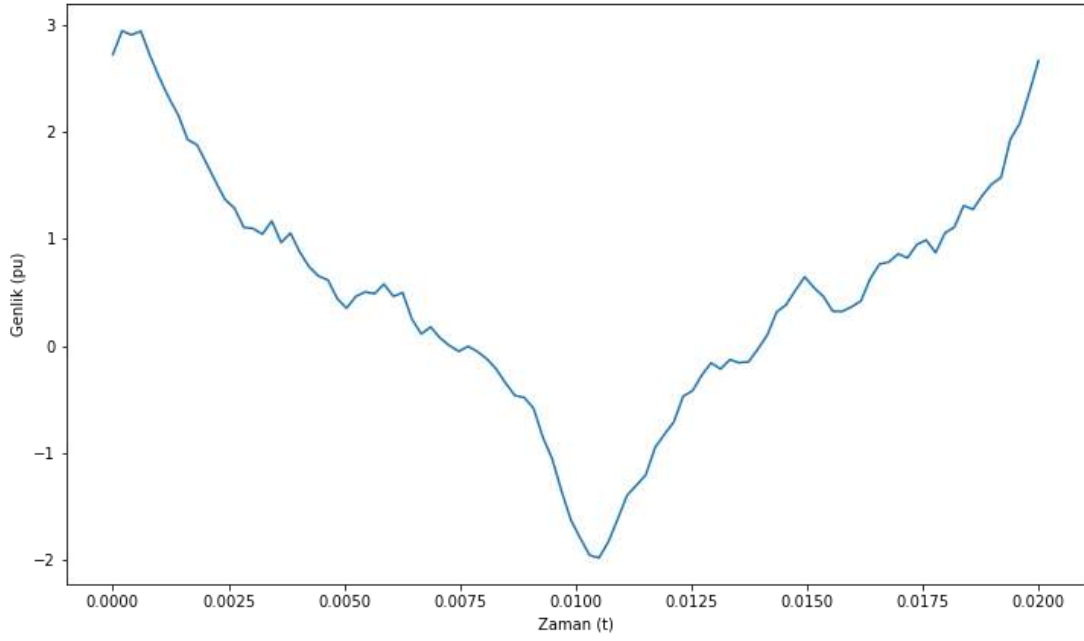
Şekil 7.21. Oluşturulan $X2(t)$ sinyali

Şekil 7.21.'deki grafiğı herhangi bir gürültü eklenmediğı zaman yine aynısı ortaya çıkacaktır. Bu da Şekil 7.22.'de verilmiştir.



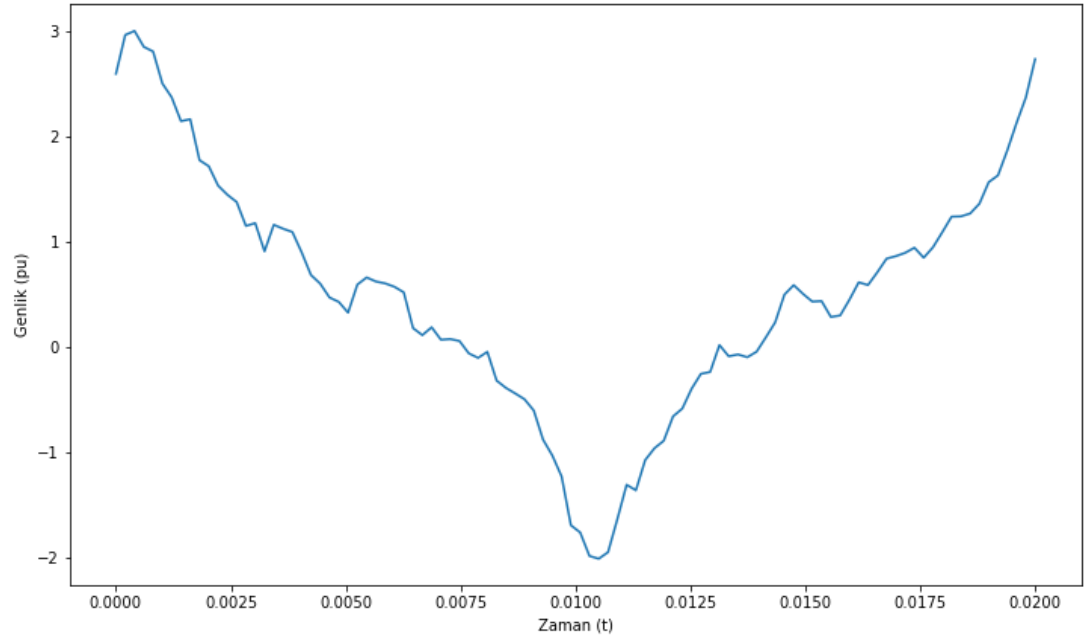
Şekil 7.22. Gürültüsüz $X2(t)$ sinyali

Şekil 7.23.'te SNR=40dB gürültülü $X2(t)$ sinyali verilmiştir.



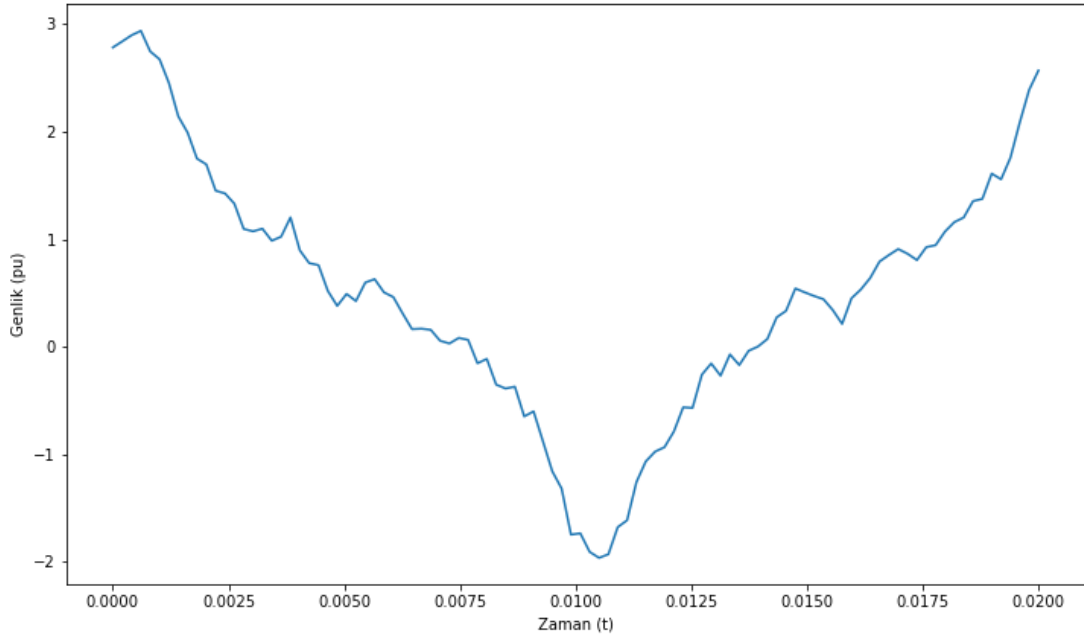
Şekil 7.23. SNR=40dB gürültülü $X2(t)$ sinyali

Şekil 7.24.'te SNR=20dB gürültülü $X2(t)$ sinyali verilmiştir.



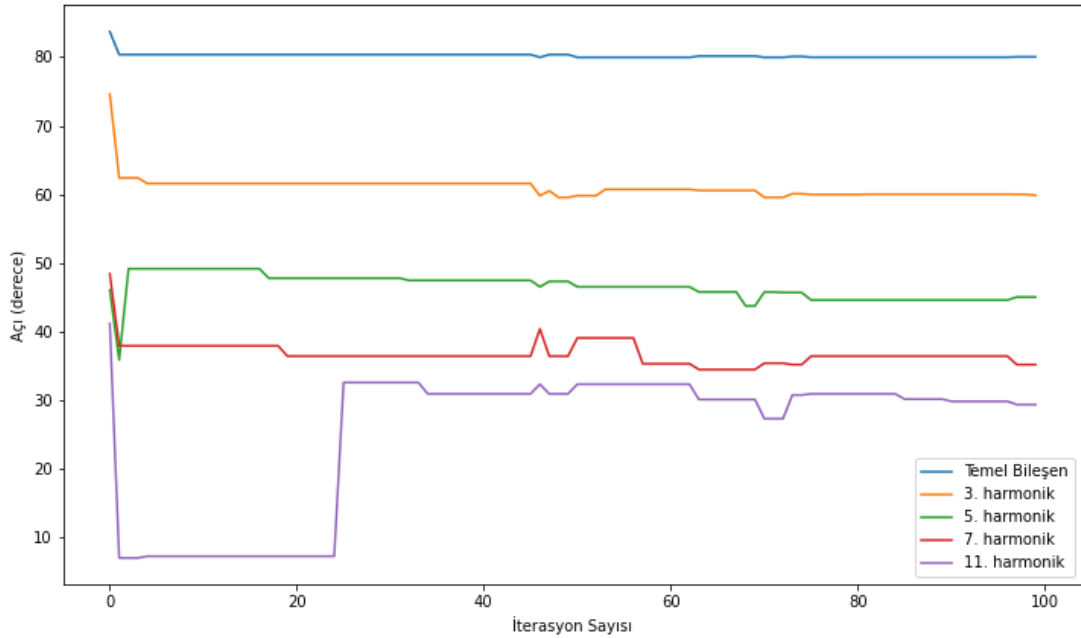
Şekil 7.24. SNR=20dB gürültülü $X2(t)$ sinyali

Şekil 7.25.'te SNR=10dB gürültülü $X_2(t)$ sinyali verilmiştir.

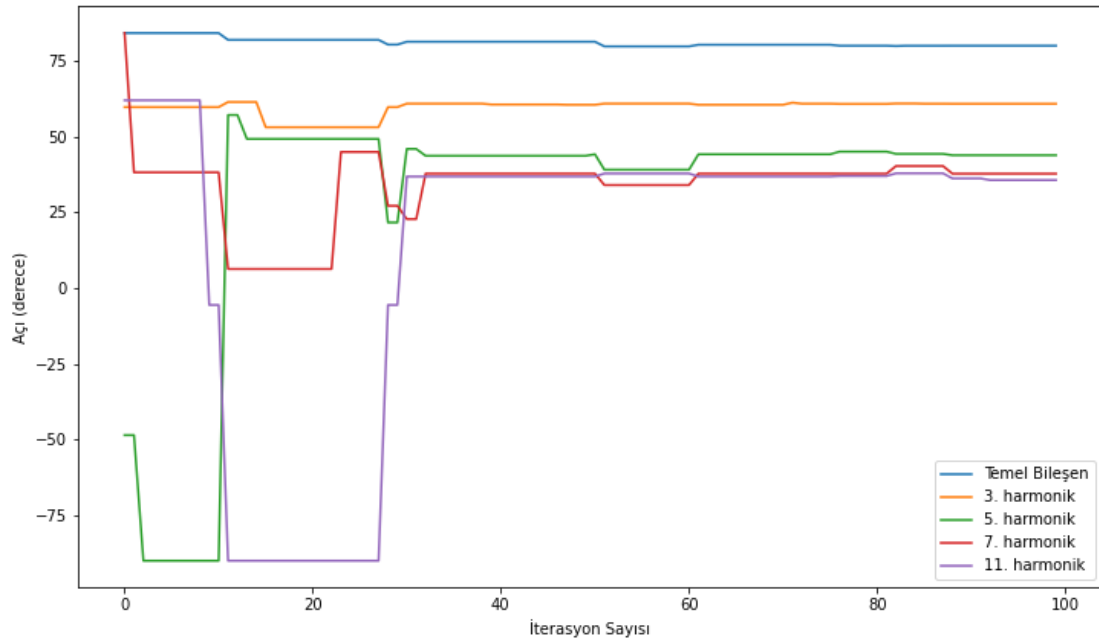
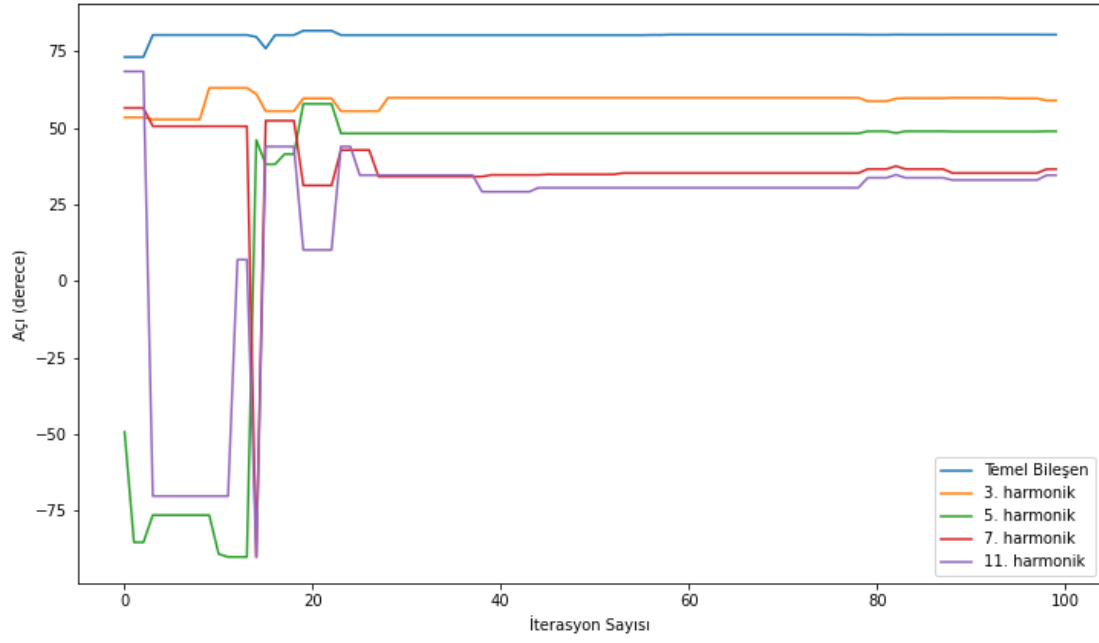


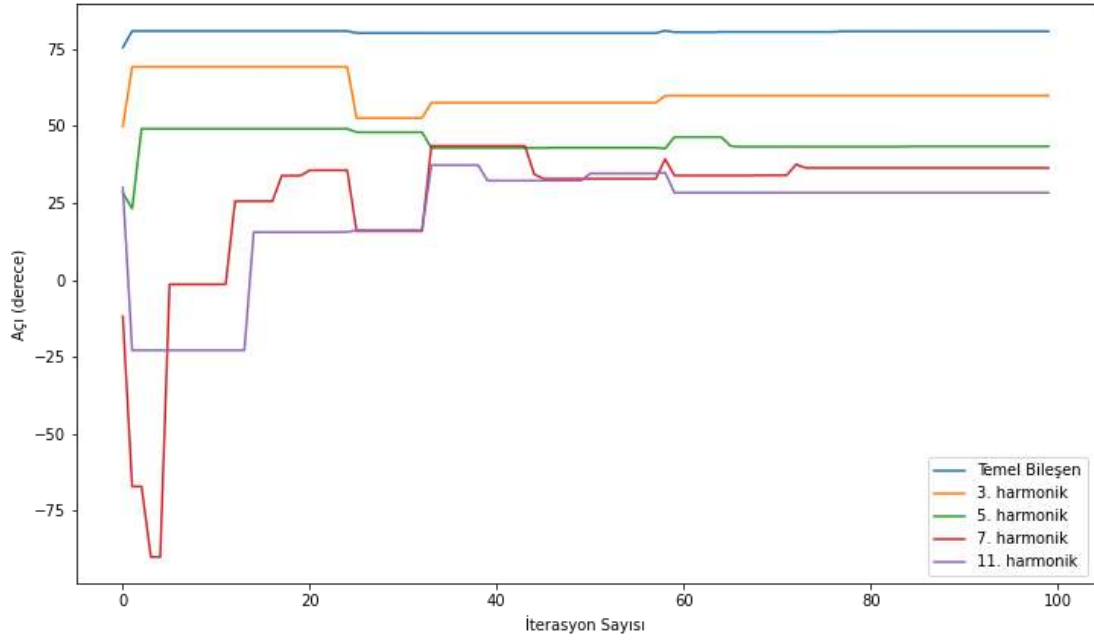
Şekil 7.25. SNR=10dB gürültülü $X_2(t)$ sinyali

İterasyon sayısı boyunca tahmin edilen açı değerlerinin sonuçları, gürültüsüz ve gürültülü koşullar için Şekil 7.26., Şekil 7.27., Şekil 7.28. ve Şekil 7.29.'da verilmiştir.



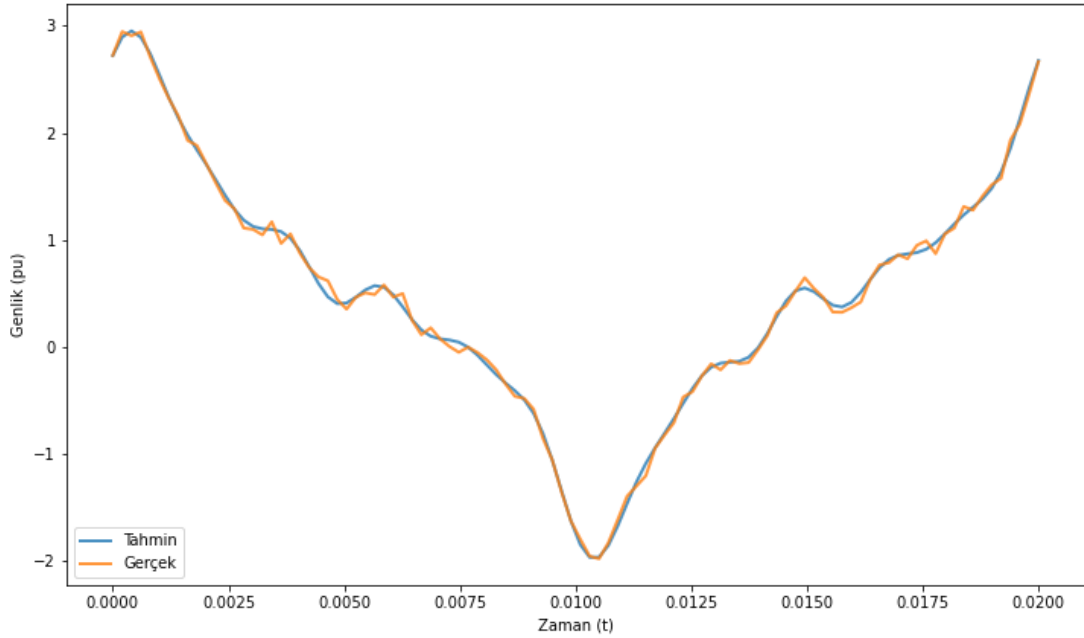
Şekil 7.26. Gürültüsüz koşulda tahmin edilen $X_{2e}(t)$ sinyalinin açı değerleri





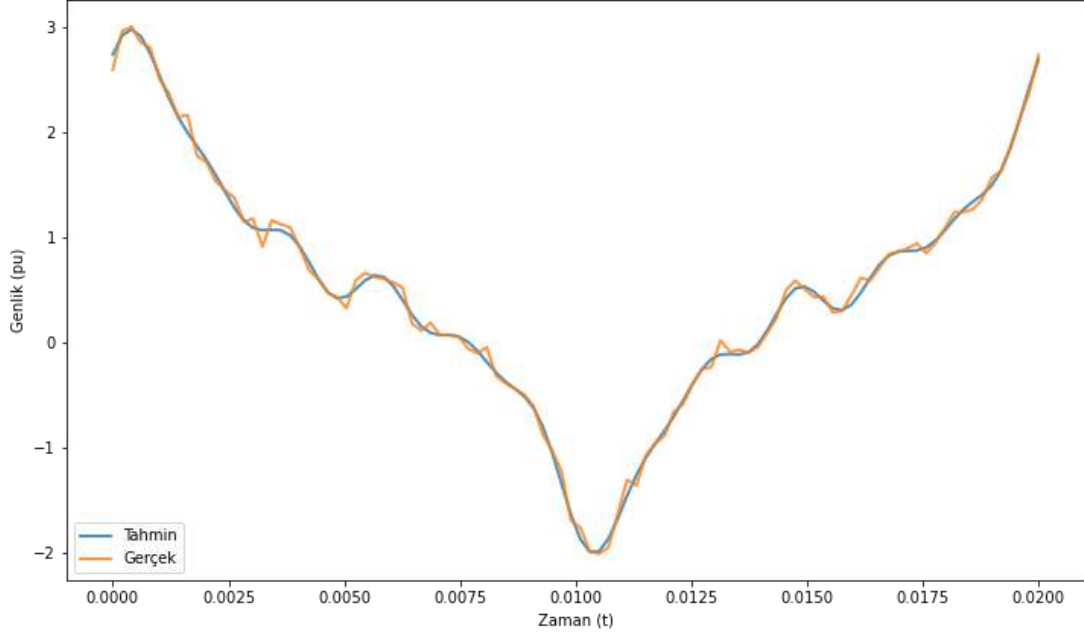
Şekil 7.29. SNR=10dB gürültüde tahmin edilen $X_{2e}(t)$ sinyalinin açı değerleri

Tablo 7.19. ve Tablo 7.20.'de elde edilen sonuçlara bağlı olarak tahmin edilen $X_{2e}(t)$ sinyali ile $X_2(t)$ sinyali birlikte Şekil 7.30.'da verilmiştir.



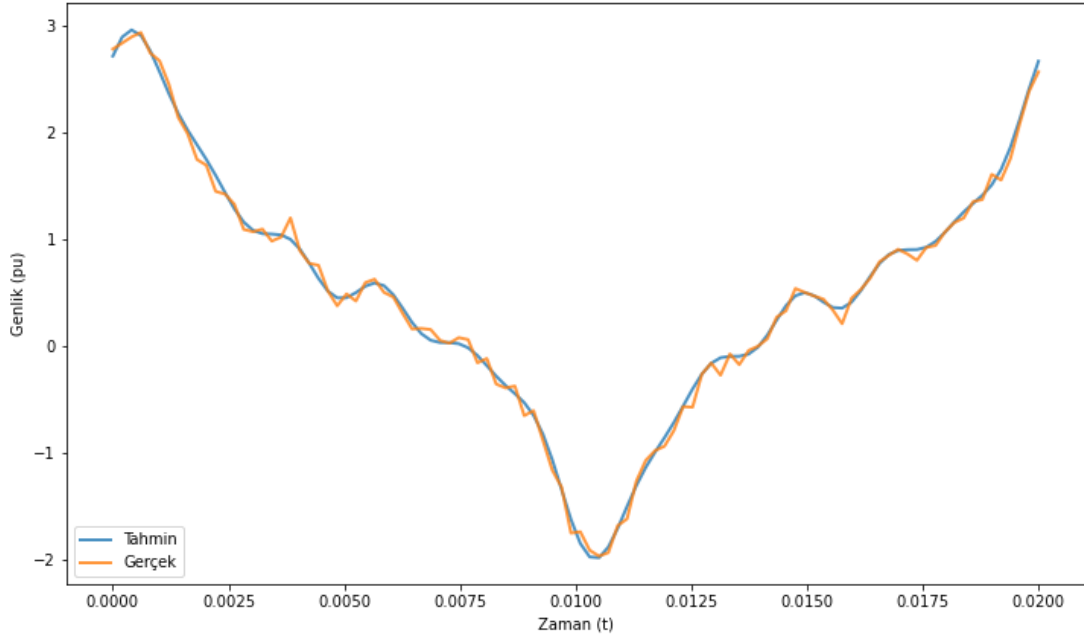
Şekil 7.30. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_40 koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$

Tablo 7.21. ve Tablo 7.22.'de elde edilen sonuçlara bağlı olarak tahmin edilen $X2_e(t)$ sinyali ile $X2(t)$ sinyali birlikte Şekil 7.31.'de verilmiştir.



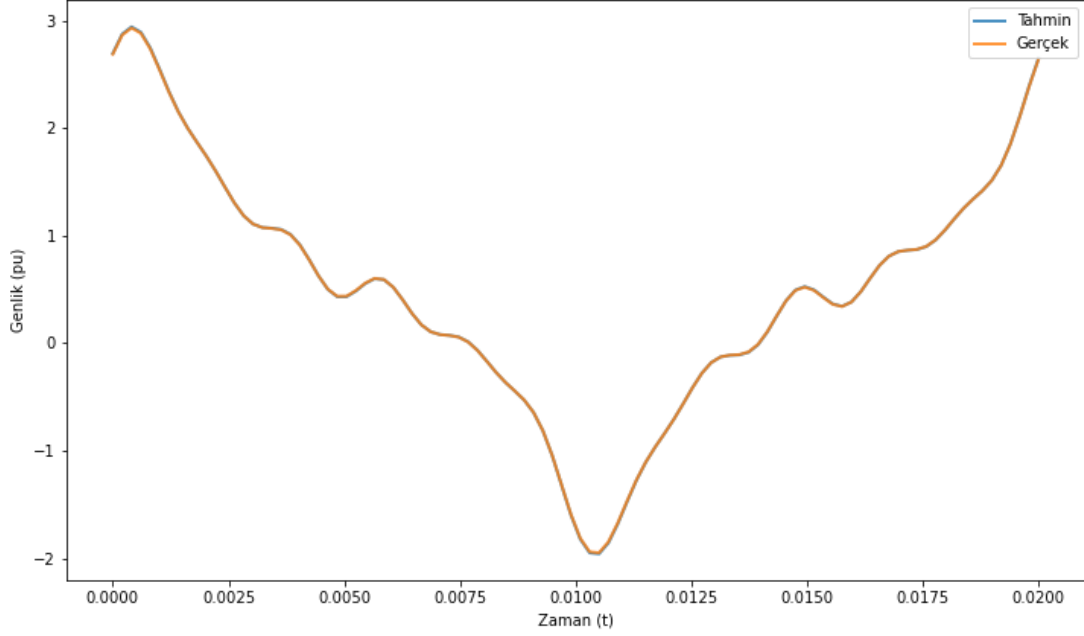
Şekil 7.31. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_20 koşulundaki $X2(t)$ ve $X2_e(t)$

Tablo 7.23. ve Tablo 7.24.'te elde edilen sonuçlara bağlı olarak tahmin edilen $X2_e(t)$ sinyali ile $X2(t)$ sinyali birlikte Şekil 7.32.'de verilmiştir.



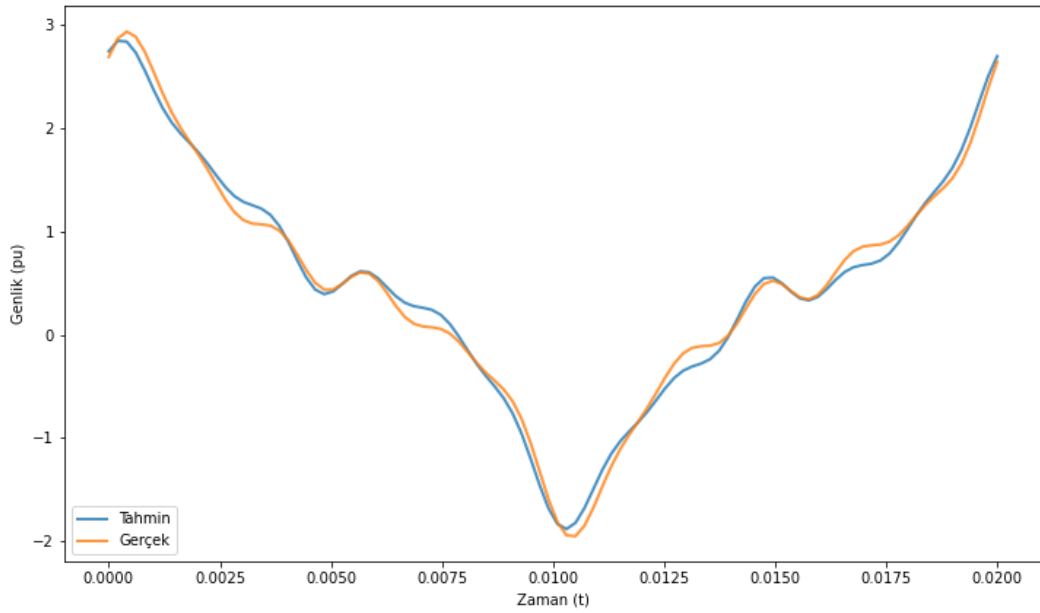
Şekil 7.32. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_10 koşulundaki $X2(t)$ ve $X2_e(t)$

Tablo 7.17. ve Tablo 7.18.’de elde edilen sonuçlara bağı olarak tahmin edilen $X2_e(t)$ sinyali ile $X2(t)$ sinyali birlikte Şekil 7.33.’de verilmiştir.



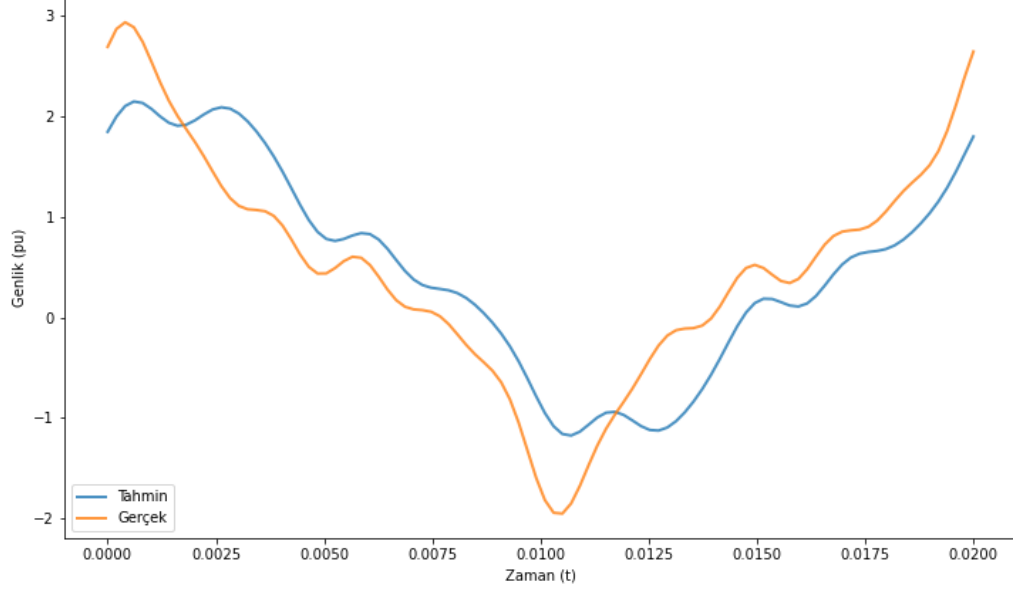
Şekil 7.33. 100_100_100_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X2(t)$ ve $X2_e(t)$

Çalışma sırasında $X2(t)$ ve $X2_e(t)$ sinyallerinin birlikte verilmesi de hedeflenmiştir. “100_20_20_emp0,5_look0,5_noise_NO” koşuluna bağı olarak $X2(t)$ ve $X2_e(t)$ sinyalleri birlikte Şekil 7.34.’te verilmiştir.



Şekil 7.34. 100_20_20_emp0,5_look0,5_noise_NO koşulundaki $X2(t)$ ve $X2_e(t)$

“100_5_5_emp0.5_look0.5_noise_NO” koşuluna bağılı olarak $X_2(t)$ ve $X_{2_e}(t)$ sinyalleri birlikte Şekil 7.35.’te verilmiştir.



Şekil 7.35. 100_5_5_emp0.5_look0.5_noise_NO koşulundaki $X_2(t)$ ve $X_{2_e}(t)$

8. SONUÇLAR

Bu tezde, en küçük kareler yöntemi ve yapay arı kolonisi birlikte kullanılarak hibrit algoritma oluşturulmuştur. Bu hibrit algoritmada, literatürde kullanılan harmonik frekanslarına bağlı olarak harmoniklerin genlikleri ve faz açıları tahmin edilmiş ve sonuçlar ortaya konmuştur. Hibrit algoritmada en küçük kareler yöntemi harmoniklerin genliklerini, yapay arı kolonisi algoritması ise harmoniklerin faz açılarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Hibrit algoritma Python ortamında geliştirilmiştir. Yazılımın çalıştırıldığı bilgisayar Intel Core i5, 2.53 GHz ve 4 GB RAM özelliklerini içermektedir. Python dosyaları olarak functions, signal, bee ve test oluşturulmuştur.

Bölüm 7.1’de literatürdeki popülasyon sayısı 50 ve nesil sayısı 100 olarak verilmiştir. Nesil sayısı yapay arı kolonisi algoritması için iterasyon sayısı olarak verilmektedir. Literatürde seçilen bu sayıları teyit etmek için, yapay arı kolonisi algoritması farklı koşullar için çalıştırılmıştır.

İterasyon sayısında sırasıyla 5, 25, 50, 100 ve 500 kullanılmıştır. Ortalama yüzdelik hatanın yüzde 1’in altında olması hedeflenmiştir. Denemeler sonucunda 50’den itibaren hatanın yüzde 1’in altına indiği gözlemlenmiştir ve stabil haledir. 50 ile 100 iterasyon sayısı oranlandığı zaman hata 7,66 kattır. Süre olarak 100 iterasyon sayısı 50’nin 2,09 katıdır. Ayrıca 500 ile 100 iterasyon sayısı arasında süre oranı 5,62 kattır ve 500 iterasyonda hata yüzdesi oldukça düşüktür. Literatürde seçilen 100 iterasyon değerinin kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

Popülasyon sayısında sırasıyla 5, 25, 50, 100 ve 500 kullanılmıştır. Ortalama yüzdelik hatanın yüzde 1’in altında olması hedeflenmiştir. Denemeler sonucunda bütün hata değerleri yüzde 1’in altındadır. Popülasyon sayısı 50’den itibaren hata yüzdesi stabil hale gelmiştir. 25 ile 50 popülasyon sayısı oranlandığı zaman hata 3,1 kattır. Süre olarak 50 popülasyon sayısı 25’in 2,47 katıdır. Ayrıca 100 ile 50 popülasyon sayısı arasında süre oranı 2,21 kattır ve hata yüzdesi stabildir. Literatürde seçilen 50 popülasyon değerinin kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

İşçi ve gözcü arıların yüzdelinde de farklı denemeler yapılmıştır. Şekil 7.2.’de de görüleceği gibi yarı yarıya olmaları hata yüzdesi için uygun koşuldur.

Bölüm 7.1.'e bağlı olarak literatürde test sinyaline gürültü eklenerek sistemin başarısı test edilmiştir. Tablo 7.13. ve Şekil 7.5.'te sonuçlar verilmiştir. Gürültü miktarı arttıkça ortalama yüzdelik hata giderek artmıştır.

Şekil 7.16. ve Şekil 7.17.'de görüleceği gibi tamamen farklı koşullar ile denemeler yapılmıştır. $X(t)$ ve $X_e(t)$ arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Literatürdeki değerler ile gürültüsüz koşulda $X(t)$ ve $X_e(t)$ eğrileri birbirleri üzerine çok yakın olduğu görülürken, popülasyon ve iterasyon değerinin 5 seçildiği durumda eğriler birbirlerinden uzaklaşmıştır. Çünkü $X_e(t)$ tahmin edilen fonksiyonda hata oldukça fazladır.

Bölüm 7.2.'de literatürdeki popülasyon sayısı 100 ve iterasyon sayısı 100 olarak verilmiştir. Şekil 7.20. ve Tablo 7.25.'te görüleceği gibi gürültü miktarı arttıkça hata yüzdesi giderek artmıştır.

Bölüm 7.1. ve Bölüm 7.2. beraber incelendiğinde gürültü miktarının arttığı zaman hata yüzdelerinin giderek arttığı gözlemlenmiştir.

Bölüm 7.2.'de iterasyon sayısında sırasıyla 5, 25, 50, 100 ve 500 kullanılmıştır. Ortalama yüzdelik hatanın yüzde 1'in altında olması hedeflenmiştir. Denemeler sonucunda iterasyon sayısı 50'den itibaren hatanın yüzde 1'in altına indiği gözlemlenmiştir. 50 ile 100 iterasyon sayısı oranlandığı zaman hata 2,81 kattır. Süre olarak 100 iterasyon sayısı 50'nin 2,46 katıdır. Ayrıca 500 ile 100 iterasyon sayısı arasında süre oranı 4,46 kattır ve 500 iterasyonda hata yüzdesi diğer deneme yapılan değerlere göre daha düşüktür. Literatürde seçilen 100 iterasyon değerinin kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

Bölüm 7.2.'de popülasyon sayısında sırasıyla 5, 25, 50, 100 ve 500 kullanılmıştır. Ortalama yüzdelik hatanın yüzde 1'in altında olması hedeflenmiştir. Denemeler sonucunda popülasyon sayısı 25'ten itibaren hatanın yüzde 1'in altına indiği gözlemlenmiştir. 50 ile 100 popülasyon sayısı oranlandığı zaman hata 1,41 kattır. Süre olarak 100 popülasyon sayısı 50'nin 2,3 katıdır. Ayrıca 500 ile 100 popülasyon sayısı arasında süre oranı 5,15 kattır ve 500 popülasyonda hata yüzdesi diğer deneme yapılan değerlere göre daha düşüktür. Literatürde seçilen 100 popülasyon değerinin kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

Bölüm 7.2.'de, Şekil 7.34. ve Şekil 7.35.'te görüleceği gibi tamamen farklı koşullar ile denemeler yapılmıştır. $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$ arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Literatürdeki değerler ile gürültüsüz koşulda $X_2(t)$ ve $X_{2e}(t)$ eğrileri birbirleri üzerine çok yakın olduğu görülürken, popülasyon ve iterasyon değerinin 5 seçildiği durumda eğriler birbirlerinden uzaklaşmıştır. Çünkü $X_{2e}(t)$ tahmin edilen fonksiyonda hata oldukça fazladır.

Literatür araştırmaları sırasında derin öğrenme ve makine öğrenmesi gibi daha ileri seviye yöntemler de incelenmiş olmasına rağmen, bu yöntemler daha çok görüntü ve ses işleme tekniklerinde kullanılmaktadır. İki incelenen problem de görüntü ve ses işlemeye nazaran daha kolay problemlerdir ve daha ileri seviyelerin kullanılması gerekmemektedir. Çünkü derin öğrenme ve makine öğrenmesi için CPU'lar yerine GPU'lar kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Türk Dil Kurumu Sözlükleri, “Elektrik.” <https://sozluk.gov.tr> (Accessed: Jan. 2, 2021)
- [2] E. Ö. Tartan, “Use of intelligent methods in harmonic analysis of power systems,” M.S. thesis, Institute of Science and Engineering, Dept. Elec. and Electron. Eng., Başkent Univ., Ankara, Türkiye, 2011.
- [3] F. F. Costa, A. J. M. Cardoso and D. A. Fernandes, "Harmonic Analysis Based on Kalman Filtering and Prony's Method," *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Setubal, Portugal, 2007, pp. 696-701, doi: 10.1109/POWERENG.2007.4380137.
- [4] Haili Ma and A. A. Girgis, "Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1659-1665, July 1996, doi: 10.1109/61.517531.
- [5] K. Çakar, “Genetik algoritmalar yardımıyla acil servis istasyonu yerleşiminin optimizasyonu,” Ph.D. dissertation, Institute of Social Science, Atatürk Univ., Erzurum, Türkiye, 2009.
- [6] B. Akduman, “Evrimsel algoritmalar ile elektrik dağıtım şebekelerinin restorasyonu,” M.S. thesis, Graduate School, Dept. Elec. Eng., İstanbul Technical Univ., İstanbul, Türkiye, 2010.
- [7] S. Paksoy, "Genetik algoritma ile proje çizelgeleme," Ph.D. dissertation, Institute of Social Science, Çukurova Univ., Adana, Türkiye, 2007.
- [8] S. Tamer, C. Karakuzu, “Parçacık sürüşü optimizasyon algoritması ve benzetim örnekleri,” Dept. Electron. and Comm. Eng., Kocaeli Univ., İzmit, Kocaeli, Türkiye, [Online]. Available: https://www.emo.org.tr/ekler/e5d75028d92047a_ek.pdf

- [9] S. Akyol ve B. Alataş, "Güncel Sürü Zekası Optimizasyon Algoritmaları," *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 1, sayı. 1, ss. 0-0, Nis. 2012.
- [10] F. T. Apay, "Güç kalitesi parametrelerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi," M.S. thesis, Graduate School of Science and Engineering, Dept. Elec. Eng., Yıldız Technical Univ., İstanbul, Türkiye, 2008.
- [11] M. Atasal, "Güç kalitesi ve fliker," M.S. thesis, Graduate School, İstanbul Technical Univ., İstanbul, Türkiye, 2000.
- [12] *Resmi Gazete, Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği*, 25639, 10/11/2004.
- [13] *Resmi Gazete, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği*, 25001, 22/01/2003.
- [14] *Resmi Gazete, Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik*, 26287, 12/09/2006.
- [15] *Electric Power Systems And Equipment - Voltage Ratings (60 Hz)*, ANSI C84.1., 2020.
- [16] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE 519-2014, June 2014.
- [17] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*, IEC 61000-3-2:2018, January 2018.
- [18] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE 1159-2019, June 2019.

- [19] H. Eroğlu, “Bir dağıtım şebekesinin güç kalitesi ve harmonikler yönünden incelenmesi,” M.S. thesis, Institute of Science, Dept. Elec. and Electron. Eng., Selçuk Univ., Konya, Türkiye, 2009.
- [20] Ö. Şahin, “Elektrik güç sistemlerinde harmonik analizi,” M.S. thesis, Graduate School, Dept. Elec. Eng., İstanbul Technical Univ., İstanbul, Türkiye, 2003.
- [21] M. Şahin, "Güç sistemlerinde enerji kalitesini etkileyen harmoniklerin incelenmesi," *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 7, sayı. 2, ss. 199-218, Oca. 2015, doi:10.18185/eufbed.74640.
- [22] A. Baghini, “Handbook of Power Quality,” West Sussex, John Wiley and Sons, 2008, DOI:10.1002/9780470754245.
- [23] T. N. Mutlu, “Eletrik pik fırınları,” [Online]. Available: www.maden.org.tr/resimler/ekler/644.pdf (Accessed: Jan. 5, 2021)
- [24] M. Şeker, A. Memmedov, R. Hüseyinov, “Elektrik ark fırınlarında çalışma karakteristiklerinin incelenmesi,” [Online]. Available: https://www.emo.org.tr/ekler/bca3737cb40c090_ek.pdf (Accessed: Jan. 5, 2021)
- [25] M. Yılmaz, “Fırçasız Elektrik Motorları (ELK 497) ders notları,” Dept. Elec. Eng., İstanbul Technical Univ., İstanbul, 01 Sept. 2015.
- [26] M. Özkaya, T. Tüfekçi, *Aydınlatma Tekniği*. İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 2011.
- [27] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*. Third Edition. US: McGraw-Hill Professional, 2012.
- [28] R. Yumurtacı, “Lineer olmayan dengesiz yükler içeren enerji sistemlerinde üç fazlı harmonik yük akışı analizi ve simülasyonu,” Ph.D. dissertation, Graduate School of

Science and Engineering, Dept. Elec. Eng., Yıldız Technical Univ., İstanbul, Türkiye, 2000.

- [29] S. Baykut, “Deney 3: Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) & Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT),” [Online]. Available: https://web.itu.edu.tr/~baykut/lab/pdf/Deney_3.pdf (Accessed: Jan. 5, 2021)
- [30] D. Shmilovitz, "On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 526-528, Jan. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839744.
- [31] M. Yılmaz, "Elektrik sistem tasarımında harmoniklerin giderilmesi için bir analiz," M.S. thesis, Graduate School, Dept. Elec. Eng., İstanbul Technical Univ., İstanbul, Türkiye, 2006.
- [32] M. A. Yükselen, “HM504 uygulamalı sayısal yöntemler ders notları,” [Online]. Available: <https://web.itu.edu.tr/yukselen/HM504/02-%20E%f0ri%20uydurma%20ve%20interpolasyon.pdf> (Accessed: Jan. 5, 2021)
- [33] Z. Moravej, J. Enayati, “A hybrid least squares–clonal selection based algorithm for harmonics estimation,” *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.* 2014; 24:1–15, doi: 10.1002/etep.1676.
- [34] [Online]. Available: <https://veribilimcisi.com/2017/07/14/mse-rmse-mae-mape-metrikleri-nedir> (Accessed: Jan. 5, 2021)
- [35] M. S. Kıran, “Optimizasyon problemlerinin çözümü için yapay arı kolonisi algoritması tabanlı yeni yaklaşımlar,” Ph.D. dissertation, Institute of Science, Dept. Comp. Eng., Selçuk Univ., Konya, Türkiye, 2014.
- [36] S. Biswas, A. Chatterjee, S. K. Goswami, “An artificial bee colony-least square algorithm for solving harmonic estimation problems,” *Applied Soft Computing*,

Volume 13, Issue 5, 2013, Pages 2343-2355, ISSN 1568-4946,
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.12.006>.

- [37] P. K. Ray, B. Subudhi, “*BFO optimized RLS algorithm for power system harmonics estimation*,” *Applied Soft Computing*, Volume 12, Issue 8, 2012, Pages 1965-1977, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.03.008>.