



**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK KESTİRİM
YÖNTEMLERİ VE PERFORMANS ANALİZLERİ**

Meltem KULU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK KESTİRİM YÖNTEMLERİ VE
PERFORMANS ANALİZLERİ**

Meltem KULU
0000-0003-0473-7731

Prof. Dr. Fahri VATANSEVER
0000-0002-3885-8622
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Meltem KULU tarafından hazırlanan “**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK KESTİRİM YÖNTEMLERİ VE PERFORMANS ANALİZLERİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Fahri VATANSEVER

Başkan : Prof. Dr. Fahri VATANSEVER
0000-0002-3885-8622
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Murat UYAR
0000-0001-7243-7939
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Cemal HANİLÇİ
0000-0002-9174-0367
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

..!..!..!..!..!

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../.....

Meltem KULU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK KESTİRİM YÖNTEMLERİ VE PERFORMANS ANALİZLERİ

Meltem KULU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fahri VATANSEVER

Günümüz modern güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin, güç elektroniği elemanlarının ve devrelerinin artmasıyla birlikte güç kalitesi problemleri de ortaya çıkmaktadır. Güç kalitesini etkileyen unsurların başında da harmonikler yer almaktadır. Bu nedenle harmoniklerin tespit edilmesi, ölçülmesi, kestirimi ve bastırılması son derece önemlidir. Harmoniklerin ölçümü ve kestirimi için birçok farklı yöntemler geliştirilmiş ve geliştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında Fourier dönüşümü, Chirp z-dönüşümü, ayrık Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü, Prony yöntemi, çoklu işaret sınıflandırması, Kalman filtresi, eğim düşüm tabanlı adaptif filtreler gibi çeşitli yöntemler kapsamlı bir şekilde araştırılmış, matematiksel altyapıları irdelenmiş, prensiplerine göre sınıflandırılmıştır. Sunulan yöntemler birleştirilerek, MATLAB programında harmonik kestirimi uygulaması oluşturulmuştur. Ayrıca incelenen yöntemler, güç kalitesi parametrelerine göre test edilmiş ve performans değerlendirmesi yapmak amacıyla karşılaştırılmıştır.

Sunulan yöntemlerden ayrık Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü ve çoklu işaret sınıflandırması yöntemleri giriş işaretindeki faz açılarından etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca hızlı Fourier dönüşümü, Chirp z-dönüşümü, eğim düşüm tabanlı adaptif filtreler ve Kalman filtresi ile genlik ve faz kestirimi yapılabilirken Hilbert-Huang dönüşümü, Prony ve çoklu işaret sınıflandırması yöntemleri ile genlik kestirimi ile birlikte frekans kestirimi de yapılmıştır. Frekans kestiriminde Hilbert-Huang dönüşümü ve Prony yönteminde hata oranının sıfıra yakın olduğu görülmüştür. İlave olarak gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, harmonik bozulma, gerilim kesintisi, DA bileşeni, gürültü bileşeni ekleme gibi durumlarda da performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Harmonik kestirimi, güç kalitesi, Fourier dönüşümü, Chirp z-dönüşümü, ayrık Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü, Prony yöntemi, çoklu işaret sınıflandırması, Kalman filtresi, eğim düşüm tabanlı adaptif filtreler.

2020, xi + 140 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

HARMONIC ESTIMATION METHODS IN POWER SYSTEMS AND THEIRS PERFORMANCE ANALYSIS

Meltem KULU

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fahri VATANSEVER

In modern power systems, power quality problems have occurred with an increase of non-linear loads, power electronics components and circuits. Harmonics are the fundamental factors that affect power quality. Therefore, it is significantly important to detect measure, estimate and suppress harmonics. Many different methods have been developed for the measurement and estimation of harmonics.

In this study, several techniques (Fourier transform, Hilbert-Huang transform, discrete Hartley transform, Chirp z-transform, multiple signal classification method, Prony's method, Kalman filtering, gradient descent-based adaptive filters) were researched comprehensively, their mathematical backgrounds were examined and classified according to its principles. Harmonic estimation application was realized in MATLAB by combining the presented methods. In addition, the methods examined were tested according to power quality parameters and compared for performance evaluation.

It was detected that Hartley transform, Hilbert-Huang transform and multiple signal classification methods were affected by changes in input signals. Furthermore, amplitude and frequency estimation were carried out with Hilbert-Huang transform, Prony, and multiple signal classification methods while amplitude and phase estimation were realized with Chirp z-transform, gradient descent-based adaptive filters and Kalman filter. It was observed that the error rate was approximately zero in the Hilbert-Huang transform and Prony's method. In addition, performance evaluation was made in case of voltage sag, voltage swell, harmonic distortion, voltage interruption, DC offset, the addition of noise component.

Key words: Harmonic estimation, power quality, Fourier transform, Hilbert-Huang transform, discrete Hartley transform, Chirp z-transform, multiple signal classification method, Prony's method, Kalman filtering, gradient descent-based adaptive filters.

2020, xi + 140 pages.

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın gerçekleőtirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaőan, kendisine danıőtıđım sũre boyunca bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve bũyũk bir ilgi ile faydalı olmak için elinden geleni sunan, gũler yũzũnũ ve samimiyetini esirgemeyen çok değerli danıőtmanım Prof. Dr. Fahri VATANSEVER'e, ayrıca tezime yardımlarından dolayı Arő. Gør. Nedim Aktan YALÇIN'a, teőekkũrlerimi sunarım.

Gøsterdięi sabır ve anlayıőtan dolayı sevgili aileme, manevi desteğiyle her zaman yanımda olan Uzm. Leyla Özlem BULUT'a ve tez çalışması esnasında beni cesaretlendiren değerli eőtım Aykut SũPÜRTÜLÜ'ye teőekkũrlerimi sunarım.

Meltem KULU
24/01/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1. Güç Kalitesi Parametreleri.....	10
2.1.1. Geçici Durumlar.....	10
2.1.2. Uzun Süreli Gerilim Değişimleri.....	12
2.1.3. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri.....	13
2.1.4. Gerilim Dengesizliği.....	15
2.1.5. Güç Frekansı Değişimleri.....	15
2.1.6. Dalga Şekli Bozulmaları.....	15
2.2. Harmonik Kestirim Yöntemleri.....	22
2.2.1. Parametrik Olmayan Yöntemler.....	22
2.2.2. Parametrik Yöntemler.....	29
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	44
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	53
4.1. Hızlı Fourier Dönüşümü Uygulaması.....	53
4.2. Chirp Z-Dönüşümü Uygulaması.....	56
4.3. Hartley Dönüşümü Uygulaması.....	58
4.4. Hilbert – Huang Dönüşümü Uygulaması.....	60
4.5. Prony Yöntemi Uygulaması.....	63
4.6. Çoklu İşaret Sınıflandırması Uygulaması.....	65
4.7. En Küçük Ortalama Kare Uygulaması.....	68
4.8. Normalleştirilmiş En Küçük Ortalama Kare Uygulaması.....	70
4.9. Sızdıran En Küçük Ortalama Kare Uygulaması.....	73
4.10. Kalman Filtresi Uygulaması.....	75
4.11. Parametrik Olmayan ve Parametrik Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	78
4.12. Güç Kalitesi Bozulma Parametrelerinin Analizi.....	100
5. SONUÇ.....	113
KAYNAKLAR.....	118
EKLER.....	125
EK 1. Yönetmelik ve Standartlarda Tanımlı Limit Değerler.....	126
EK 2. Uygulamada yer alan parametrelerin matematiksel hesabı.....	129
EK 3. Benzetim sonuçlarına ait ekran görüntüleri.....	130
ÖZGEÇMİŞ.....	140

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

i	Akım
v	Gerilim
f_0	Temel Frekans
ω	Açısal Frekans
T	Temel Periyot
A_0	İşaretin DA bileşeni
A_n	İşaretin Genlik
θ_n	İşaretin Faz Açısı
μ	Adım Büyüklüğü
ε	Normalizasyon Büyüklüğü
η	Sızdırma Faktörü

Kısaltmalar

Açıklama

ms	milisaniye
Hz	Hertz
DA	Direct Current (DC), Doğru Akım
AA	Alternative Current (AC), Alternatif Akım
AFD	Discrete Fourier Transform (DFT), Ayrık Fourier Dönüşümü
HFD	Fast Fourier Transform (FFT), Hızlı Fourier Dönüşümü
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IEC	International Electrotechnical Commission Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
CZD	Chirp z-Transform (CZT), Chirp z-Dönüşümü
AHD	Discrete Hartley Transform (DHT), Ayrık Hartley Dönüşümü
HHH	Hilbert – Huang Transform (HHT), Hilbert – Huang Dönüşümü
ÇİS	Multiple Signal Classification, Çoklu İşaret Sınıflandırması
EKK	Least Mean Square (LMS), En Küçük Ortalama Kare
NEKK	Normalized Least Mean Square (NLMS) Normalleştirilmiş En Küçük Ortalama Kare
SEKK	Leaky Least Mean Square (Leaky - LMS) Sızdıran En Küçük Ortalama Kare
KF	Kalman Filter, Kalman Filtresi
SNR	Signal Noise Ratio, İşaret Gürültü Oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Çalışmada yer alan konu başlıklarının özeti	9
Şekil 2.1. Harmonik dağılımı	18
Şekil 2.2. Gürültü engelleyici olarak kullanılan adaptif filtre şeması.....	35
Şekil 2.3. Kalman filtresinin çalışmasına ait blok diyagram	42
Şekil 3.1: Harmonik kestirimi uygulamasının ekran görüntüsü.....	44
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan yöntemlerin sınıflandırılması	45
Şekil 3.3. Hızlı Fourier dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı.....	46
Şekil 3.4. Chirp z – dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı.....	46
Şekil 3.5. Ayırık Hartley dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı	47
Şekil 3.6. Hilbert – Huang dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı	48
Şekil 3.7. Prony yöntemi algoritmasına ait akış diyagramı	49
Şekil 3.8. Çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) algoritmasına ait akış diyagramı.....	49
Şekil 3.9. En küçük ortalama kare algoritmasına ait akış diyagramı	50
Şekil 3.10. Normalleştirilmiş en küçük ortalama kare algoritmasına ait akış diyagramı	51
Şekil 3.11. Sızdıran en küçük ortalama kare algoritmasına ait akış diyagramı	52
Şekil 3.12. Kalman filtresi algoritmasının işleyişi	53
Şekil 4.1. Uygulama-1 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin bağıl hata grafiği	79
Şekil 4.2. Uygulama-1 için temel harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	80
Şekil 4.3. Uygulama-1 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği	81
Şekil 4.4. Uygulama-1 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	82
Şekil 4.5. Uygulama-1 için 5. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği	83
Şekil 4.6. Uygulama-1 için 5. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	84
Şekil 4.7. Uygulama-1 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği	85
Şekil 4.8. Uygulama-1 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	86
Şekil 4.9. Uygulama-1 için 9. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği	87
Şekil 4.10. Uygulama-1 için 9. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	88
Şekil 4.11. Uygulama-2 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği	90
Şekil 4.12. Uygulama-2 için temel harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği.....	90
Şekil 4.13. Uygulama-2 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği	92
Şekil 4.14. Uygulama-2 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	92
Şekil 4.15. Uygulama-2 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği	94
Şekil 4.16. Uygulama-2 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	94
Şekil 4.17. Uygulama-2 için 15. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği ..	96
Şekil 4.18. Uygulama-2 için 15. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği	96
Şekil 4.19. Uygulama-1 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları grafiği.....	98
Şekil 4.20. Uygulama-2 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları grafiği.....	99
Şekil 4.21. Saf sinüs işaretine kesinti uygulanması	101
Şekil 4.22. Zaman – frekans karakteristik eğrisi.....	101
Şekil 4.23. Çalışmada yer alan geçici durumların hata grafiği	111

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Güç sistemlerindeki elektromanyetik olayların kategorileri ve karakteristikleri	11
Çizelge 2.2. Güç kalitesi bozulmalarının matematiksel modeli	20
Çizelge 2.3. Güç kalitesi problemlerinin çözümünde kullanılan yapılar	21
Çizelge 4.1. Uygulama-1 için HFD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenlerine ait kestirim sonuçları.....	55
Çizelge 4.2. Uygulama-1 için HFD yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları	55
Çizelge 4.3. Uygulama-2 için HFD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	55
Çizelge 4.4. Uygulama-2 için HFD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları	56
Çizelge 4.5. Uygulama-1 için CZD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	57
Çizelge 4.6. Uygulama-1 için CZD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları	57
Çizelge 4.7. Uygulama-2 için CZD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	58
Çizelge 4.8. Uygulama-2 için CZD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları	58
Çizelge 4.9. Uygulama-1 için AHD yöntemi ile genlik ve DA bileşenleri kestirim sonuçları.....	59
Çizelge 4.10. Uygulama-1 için AHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları	60
Çizelge 4.11. Uygulama-2 için AHD yöntemi ile genlik ve DA bileşenleri kestirim sonuçları.....	60
Çizelge 4.12. Uygulama-1 için AHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları	60
Çizelge 4.13. Uygulama-1 için HHD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	62
Çizelge 4.14. Uygulama-1 için HHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları	62
Çizelge 4.15. Uygulama-2 için HHD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	62
Çizelge 4.16. Uygulama-2 için HHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları	63
Çizelge 4.17. Uygulama-1 için Prony yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	64
Çizelge 4.18. Uygulama-1 için Prony yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	64
Çizelge 4.19. Uygulama-2 için Prony yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	65
Çizelge 4.20. Uygulama-2 için Prony yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	65

Çizelge 4.21. Uygulama-1 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile genlik ve frekans bileşenleri kestirim sonuçları.....	67
Çizelge 4.22. Uygulama-1 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	67
Çizelge 4.23. Uygulama-2 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile genlik ve frekans bileşenleri kestirim sonuçları.....	67
Çizelge 4.24. Uygulama-2 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	68
Çizelge 4.25. Uygulama-1 için EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	69
Çizelge 4.26. Uygulama-1 için EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	70
Çizelge 4.27. Uygulama-2 için EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	70
Çizelge 4.28. Uygulama-2 için EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	70
Çizelge 4.29. Uygulama-1 için N-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	72
Çizelge 4.30. Uygulama-1 için N-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	72
Çizelge 4.31. Uygulama-2 için N-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	72
Çizelge 4.32. Uygulama-2 için N-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	73
Çizelge 4.33. Uygulama-1 için S-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	74
Çizelge 4.34. Uygulama-1 için S-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	75
Çizelge 4.35. Uygulama-2 için S-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	75
Çizelge 4.36. Uygulama-2 için S-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	75
Çizelge 4.37. Uygulama-1 için KF yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	77
Çizelge 4.38. Uygulama-1 için KF yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	77
Çizelge 4.39. Uygulama-2 için KF yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları.....	77
Çizelge 4.40. Uygulama-2 için KF yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları.....	78
Çizelge 4.41. Uygulama-1 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması.....	79
Çizelge 4.42. Uygulama-1 için temel harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	80
Çizelge 4.43. Uygulama-1 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması.....	81
Çizelge 4.44. Uygulama-1 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması.....	82
Çizelge 4.45. Uygulama-1 için 5. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması.....	83

Çizelge 4.46. Uygulama-1 için 5. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	84
Çizelge 4.47. Uygulama-1 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması	85
Çizelge 4.48. Uygulama-1 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	86
Çizelge 4.49. Uygulama-1 için 9. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması	87
Çizelge 4.50. Uygulama-1 için 9. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	88
Çizelge 4.51. Uygulama-2 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması	89
Çizelge 4.52. Uygulama-2 için temel harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	90
Çizelge 4.53. Uygulama-2 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması	91
Çizelge 4.54. Uygulama-2 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	92
Çizelge 4.55. Uygulama-2 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması	93
Çizelge 4.56. Uygulama-2 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	94
Çizelge 4.57. Uygulama-2 için 15. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması	95
Çizelge 4.58. Uygulama-2 için 15. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması	96
Çizelge 4.59. Uygulama-1 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları	97
Çizelge 4.60. Uygulama-1 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları	99
Çizelge 4.61. Saf sinüs dalgası uygulandığında yöntemlerde oluşan bağıl hata oranları	102
Çizelge 4.62. Gerilim çökmesi işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması	102
Çizelge 4.63. Gerilim sıçraması işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması	104
Çizelge 4.64. Harmonikli işaret uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması	104
Çizelge 4.65. Gerilim kesintisi işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması	105
Çizelge 4.66. DA bileşeni işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması	107
Çizelge 4.67. Gürültü bileşen işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması	107
Çizelge 4.68. Gürültü bileşen işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması (devam).....	109
Çizelge 4.69. Gürültü bileşen işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması (devam).....	109
Çizelge 4.70. Filtreli bileşen işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması	110
Çizelge 4.71. Çalışmada sunulan yöntemlerin parametre hesaplayabilme durumları ..	110
Çizelge 4.72. Çalışmadaki bazı yöntemlerin hesaplama karmaşıklığı karşılaştırması.	112
Çizelge 5.1. Parametrik olmayan yöntemlerin karşılaştırılması	116
Çizelge 5.2. Parametrik yöntemlerin karşılaştırılması	117

1. GİRİŞ

Elektrik, enerjinin en kolay kontrol edilebilir ve en çok yönlü biçimidir. Kullanılabilirlik açısından ise kullanılan enerji kaynağına bağlı olarak kirletici olmayıp çevre dostudur. Üretim aşamasında rüzgâr, su ve güneş ışığı gibi tamamen yenilenebilir enerji kaynakları kullanılabilir. Büyük miktarlarda depolanamayan elektrik enerjisinin üretildiği anda kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden elektrik enerjisinin istenilen her noktaya, istenilen zamanda kontrole ihtiyaç göstermeden ulaştırılması önem kazanmaktadır. Elektrik enerjisinin kalitesinde meydana gelebilecek değişikliklerin bu enerjinin kullanıldığı süreç veya süreçler üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması son derece önemlidir. Elektrik enerji kaynağı kullanım noktasından çok uzakta olabilmekte veya başka jeneratörlerin çıkışları ile birlikte şebekeye verilerek kilometrelerce uzunlukta havadaki hatlardan, yer altı kablolarından ve birçok transformatörden geçtikten sonra kullanım noktasına ulaşabilmektedir. Bu bakımdan; elektrik enerji kalitesinin kullanım noktasında güvence altına alınması kolay değildir ve standart dışı elektriğin besleme sisteminden uzaklaştırılması veya tüketici tarafından kabul edilmemesi de mümkün olmamaktadır. Bu yüzden elektrik enerjisinin kaliteli bir şekilde üretilmesi, taşınması ve dağıtılması hem üreticiler hem de tüketiciler için önemli hale gelmektedir (Arrillaga ve Watson 2003).

Elektrik enerji kalitesinin gittikçe önemli hale gelmesinin bazı nedenleri şunlardır (Grady ve Santoso 2001);

- Standartlaşmanın ve performans kriterlerinin gün geçtikçe daha da gelişmesi,
- Kullanılan cihazların her geçen gün dalgalanmalara, parazitlere ve diğer güç kalitesi problemlerine karşı daha da hassasiyet göstermeleri,
- Günümüz teknolojisinde sayıları artan hız kontrol cihazları gibi elemanların enerji kalitesini azaltması,
- Güç kalitesi izleme cihazlarının her geçen gün daha da gelişmesi,
- Enerji sektöründe rekabetin artması ve bununla paralel olarak kullanıcıların daha kaliteli enerji talep etmeleri.

Güç kalitesi problemleri ülkemizde ve birçok sanayileşmiş ülkede büyük maddi kayıplara yol açmaktadır. Özellikle fabrikaların üretimlerinin kısmen ya da tamamen durması, ürün kalitesizliği veya kaybı, elektrikli cihazların kısa sürede arızalanması ya da verimlerinin düşmesi gibi ciddi maddi hasarlar ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra elektrik iletim ve dağıtımını yapan kuruluşların da büyük maddi kayıpları olmaktadır. Genellikle güç kalitesi parametrelerindeki bozulmaların yol açtığı sorunlardan dolayı kesicilerde ve trafolarda büyük hasarlar oluşmaktadır. Bu nedenle oluşan enerji satışı kayıpları kuruluşlara büyük zararlar vermektedir (Kenneddy 2000).

Büyük ekonomik kayıplara neden olan güç kalitesi problemlerinin kaynağını ve türünü belirlemek için elektrik şebekesinin akım ve gerilimi sürekli gözlemlenmelidir. Bu sayede oluşan sorunların ne olduğu, hangi durumlarda oluştuğu, bu sorunların yol açabileceği muhtemel sonuçların ne olabileceği belirlenmeli ve buna göre tedbirlerin alınması gerekmektedir. Ayrıca ortak bağlantı noktasına bağlı hangi yüklerin bu probleme yol açtığı, bundan hangi kullanıcıların ne oranda mağdur olacağı belirlenmeli, gerekli yaptırımlar ve tedbirlerin uygulanması gerekmektedir. Bu yüzden güç kalitesinin ve güç akışının sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir (Kenneddy 2000).

Güç kalitesi ile sabit şebeke frekansında, düzgün sinüs dalgası şeklinde uç gerilimi sağlanması amaçlanmaktadır. Ancak böyle bir işaret pratikte birtakım zorluklarla sağlanabilmektedir. Güç sistemine bağlanan bazı doğrusal olmayan yükler ve bunların çektiği harmonikli ve/veya ara harmonikli akımlara bağlı olarak yol açtığı gerilim bozulmaları sebebiyle düzgün sinüs değişimden sapmalar olabilmektedir (Gırgıs ve Ham 1980).

Güç kalitesini etkileyen parametrelerden harmoniklerin çözümlenmesi ile ilgili yöntemlerin karşılaştırılması literatürde geniş yer tutmaktadır. Harmonikler ile ilgili araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar genellikle harmoniklerin ölçülmesi, modellenmesi, kestirimi konuları üzerine yoğunlaşmaktadır ve çeşitli öneriler bulunmaktadır. Bu konuda yapılmış çalışmalar sistemdeki akım ya da gerilimi örnekledikten sonra işaretin içerisinde bulunan bileşenlerin genlik, frekans ve faz açılarını bulmayı amaçlamaktadır.

Günümüze kadar, harmoniklerin analizinin gerçekleştirilebilmesi için önerilmiş birçok araştırmalar bulunmaktadır. Bu araştırmalarda akım veya gerilim işaretinin kalitesi genellikle hem fazör ölçümleri hem de zarf takip süreçlerine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir (Wiczynski 2008). Bu çalışmalarda en sık kullanılan yöntemler ayrık Fourier dönüşümü (AFD) ve hızlı Fourier dönüşümüdür (HFD) (Chu 2008; Lin 2012; Cupertino ve ark. 2011). Ancak bu yöntemlerin durağan olmayan güç kalitesi bozulmalarındaki zayıflık (Morsi, El-Hawary, 2008; Bollen ve Gu 2006), temel frekans ve katları dışındaki diğer frekans bileşenleri için yeterli analizlerin gerçekleştirilememesi (Nguyen 1997), pratik uygulamalarda bellek yetersizliği ve örnekleme işlemlerindeki çeşitli sorunlar (Wang ve Sun 2006) gibi zayıf noktaları bulunmaktadır. HFD, örnekleme ile eş zamanlı olduğunda doğru harmonik kestirimi sağlamaktadır. Örnekleme eş zamanlı değilse spektral sızıntıya ve picket-fence etkisine sebep olmaktadır.

Varaprasad ve arkadaşları (2013) tarafından sunulan yöntemde uyumsuz örneklemeyle eş zamanlı örneklemeyle dönüştürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yöntemde esas olarak daha az hesaplama ile spektral sızıntı etkisini azaltmaya odaklanılmıştır. Önerilen yöntemin en büyük avantajı, herhangi bir yüksek mertebeden polinom denklemini çözmeden harmonik parametreleri kolayca hesaplayabilmesidir.

Güç sistemlerinde spektral analiz için yeni bir AFD tabanlı yöntem, Carvalho ve arkadaşları (2014) tarafından önerilmiştir. Zamanla değişen frekansları içeren harmonikleri veya ara harmonikleri doğru kestirmek temelde amaçlanmıştır. AFD sonucundaki faz açısının frekansları, giriş işaretinin her bileşenini için frekans kestirimi sağlamak için basit filtreler kullanılarak azaltılmıştır. Giriş işareti parametrelerinin düzeltilmesi, örnekleme hızını ayarlama ihtiyacı duymadan AFD frekans cevap denklemleri kullanılarak yapılmıştır.

PEHFD tabanlı algoritmalar, doğru analizleri nedeniyle önem kazanmaktadır. PEHFD tabanlı algoritmaların en büyük avantajı, spektral sızıntı ve picket-fence etkisi nedeniyle hataların azaltılmasını içermektedir. Geliştirilmiş Hanning pencere enterpolasyonlu HFD algoritması Chintakindi ve arkadaşları (2015) tarafından önerilmiştir.

Xu ve arkadaşları (2017) tarafından sunulan yöntemde eşzamanlı olmayan örneklemede harmonik analizinin doğruluğunu artırmak için, çoklu kosinüs pencereyi yeni bir dördütlü spektrum hat enterpolasyonlu HFD algoritması önerilmiştir. Benzetim sonuçları, çoklu kosinüs pencerelerinin, spektrum sızıntısını daha iyi bastırabilen yan lob özelliklerinde üstünlüğe sahip olduğunu ve önerilen algoritma her harmoniğin parametrelerini doğru bir şekilde hesaplayabildiğini göstermiştir.

Wen ve arkadaşları (2018) tarafından sunulan yöntemde mevcut HFD geliştirilerek simetrik pencere enterpolasyonlu hızlı Fourier dönüşümü elde edilmiş ve geliştirilen bu yöntem ile gürültü ve harmoniklerle bozulan güç işaretinin genliği kestirilmiştir. Ayrıca sanal kısım ve harmoniklerden gelen spektral etkileşimlerin etkisi düşünüldüğünde, kabul edilen pencerenin spektral yan lobu azaldıkça maksimum mutlak genlik hatasının azaldığı belirlenmiştir.

Wang ve arkadaşları (2019) tarafından sunulan yöntemde çift pencere spektrum enterpolasyonlu algoritması önerilmiştir. Bu yöntemde pencerelemeyen sonra işaretin frekans alanı analiz edilerek gerçek spektral çizginin konumu belirlenmiştir. Önerilen yöntemin, şebeke dalgalanmaları altında harmonik kestirimini doğru bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Namdar ve arkadaşları (2012) tarafından sunulan çalışmada HFD ve CZD temelli spektrum algılama modelinin performans değerlendirme analizi yapılmıştır. Ayrıca vericide HFD, alıcıda ise CZD kullanan sistem modeli ile HFD kullanımına göre önemli derecede işlem karmaşıklığının ve işlem süresinin azaldığı gözlenmiş ve yüksek işaret-gürültü oranı değerleri için performans artışı sağlanmıştır.

Ngo (2015) tarafından sunulan yöntemde, CZD algoritması kullanılarak silika tabanlı PLC teknolojisine dayanan yeniden yapılandırılabilir bir optik Chirp z-dönüşümü (OCZD) işlemcisinin sentezi önerilmiştir.

Sayı tabanı-2 hızlı Hartley dönüşümünün hesaplanması için yeni bir yaklaşım Skodras ve arkadaşları (2015) tarafından önerilmiştir. Bu yöntem; mevcut yaklaşımlara göre daha az veri çaprazlaması gerektirmekte, ancak eklenen veri sayısını arttırmaktadır.

Hesaplamanın yapısı, artan sayıda toplama ve çıkarma işlemleri ile basitleştirilmiş ve simetriktir. Algoritmanın geliştirilmiş yapısı, yüksek seviyeli veya düşük seviyeli uygulamaların hızlı uygulanmasını kolaylaştırmıştır.

Averchenko ve Zhenatov (2016) tarafından sunulan çalışmada; Hartley ve Fourier dönüşümleri hesaplama yükü açısından karşılaştırılmış, yaklaşık %36 oranında Hartley dönüşümünün daha üstün olduğu belirlenmiştir. Hesaplamalarda karmaşık sayıların bulunmaması ve dolayısıyla hesaplama yükünün azaldığı belirtilmiştir.

Güç sistemlerinin gerilim kırışmasını ölçmek ve kısa süreli kırışma şiddetini hesaplamak için kullanılan Hilbert-Huang dönüşümü (HHD) ve kare demodülasyon (KD) yöntemlerinin ölçüm performansı değerlendirme çalışmaları Önal ve arkadaşları (2011) tarafından yapılmıştır. HHD'nin KD'den daha yüksek doğrulukta olduğu belirtilmiştir.

Ompokov ve Boronoev (2019) tarafından sunulan çalışmada Hilbert-Huang dönüşümü ile durağan olmayan ve doğrusal olmayan süreçlerin analizi için bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Hilbert-Huang dönüşümü kullanılmasının, karmaşık çoklu bir frekans işaretinin görgül kiplere ayrıştırılmasını ve spektral yapıdaki değişiklikleri kestirmeyi mümkün kıldığı gösterilmiştir. Gerçek işaretlerin çeşitli gürültü türleriyle görgül kipte ayrışması durumunda, gürültü direkt olarak ayrı kip fonksiyonları ile filtrelenmekte, bunun sonucunda bu yöntemin de filtreleme problemlerinde kullanıldığı belirlenmiştir.

Ruan ve arkadaşları (2019) tarafından sunulan yeni bir yöntemde Prony tekniği geliştirilerek yüksek frekanslı çözünürlükte harmonik ve ara harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilmiş Prony yöntemi, Prony yönteminin ve alt uzay yönteminin güçlü yönlerini birleştirmekte ve Prony katsayılarının simetri özelliği kullanılmıştır. Önerilen yöntemin doğruluğu, geleneksel Prony yönteminden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, gerçek boyutunun sadece yarısı ile otokorelasyon matrisi oluşturulduğundan hesaplama yükünün büyük ölçüde azaltıldığı belirlenmiştir.

Zhou ve arkadaşları (2012) tarafından sunulan yeni bir yöntemde gerçek harmonik işaretleri için temel frekans kestirimi sorunu ele alınarak alt uzay tekniği ve Markov

tabanlı öz analizi ile optimum ağırlıklı bir harmonik çoklu işaret sınıflandırması geliştirilmiştir.

Liu ve arkadaşları (2019) tarafından sunulan yeni bir yöntemde kısa veri uzunluğu ile gürültü koşulunda yüksek genlikli alt harmoniklere yakın düşük genlikli harmonikleri bulmak için, enterpolasyonlu HFD algoritması ve çoklu işaret sınıflandırması algoritmasına dayalı bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemin en büyük avantajı; örnekleme veri uzunluğunun kısa olması, işaret dalgalanması olasılığını önleyerek gerçek zamanlı olarak tespit edebilmesidir. Ölçümün frekansı ve genliği daha doğru olmakta, ancak faz algılamının doğruluğunun daha da geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Adaptif filtre algoritmaları harmoniklerin gerçek zamanlı olarak kestiriminde kullanılan diğer yöntemlerden biridir. Algoritma yapısı, temel olarak en küçük kareler (EKK) yöntemidir. EKK tabanlı algoritmalar, eğim düşüm yöntemini kullandığından güncelleme kuralları daha basittir ve gerçek zamanlı sistemlerde kolaylıkla kullanılabilir (Bettayeb ve Qidwai 1998). EKK yöntemi, parametre kestiriminde yaygın kullanılan bir yöntem olduğundan güç sistemlerinin kestiriminde doğrudan kullanılmıştır. Fakat EKK yöntemi, verileri grup olarak işleyebildiğinden dolayı gerçek zamanlı sistemlerde kullanılmasının mümkün olmadığı görülmektedir (Joorabian ve ark. 2009).

Harmonik parametrelerinin kestiriminde Volterra en küçük ortalama karesi (VEKK) ve Volterra özyinelemeli en küçük kare (VÖKK) adı verilen doğrusal olmayan adaptif filtreleme algoritmaları Singh ve arkadaşları (2014) tarafından önerilmiştir. Gauss gürültüsü ile harmonikli bir işaretin genliği, fazı ve frekansının VEKK ve önerilen VÖKK gibi çeşitli doğrusal olmayan özyinelemeli kestirim teknikleri ile kestirimi sunulmuştur. Hesaplama süresi ve kestirim hatasının - bu algoritmaların sadeliği nedeniyle - daha az olduğu belirtilmiştir. Önerilen VÖKK algoritmasının genel performansının, doğruluk açısından güç sistemi harmonik kestirimi için VEKK'den daha iyi olduğu bulunmuştur.

Barros ve arkadaşları (2012) tarafından sunulan yöntemde doğrusal olmayan ölçümlerde Taylor serisi kullanılarak Kalman filtresi tabanlı harmonik kestirimi gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan ölçümler Taylor serisi ile doğrusal forma dönüştürüldüğü için kestirim sonuçlarının hatalı olduğu görülmüştür.

Alawadhi ve arkadaşları (2019) tarafından sunulan yeni bir yöntemde, hem dengeli olmayan gerilimin hem de simetrik harmoniklerin simetrik bileşenlerini kestirmek için Kalman filtresi geliştirilmiştir. Her bir gerilim ve akım fazı için mevcut tek çıkışlı KF yerine çoklu çıkışlı KF önerilmiştir. Kullanılan Kalman filtrelerinin sayısını minimuma indirmek için mevcut modellerin değiştirilmesi, üç fazdaki bozulmaların çıkarılması ve izlenmesi için tek bir KF kullanmasına bağlı olduğu belirlenmiştir.

Beltran ve Silva (2017) tarafından sunulan yeni bir yöntemde çoklu frekansa sahip harmonikli işaretlerde genlik, frekans ve faz parametreleri için zaman alanında hızlı cebirsel kestirim şeması önerilmiştir. Zaman bölgesi integral operatörleri, parametrik kestirim yaklaşımının oluşturulmasında uygun bir şekilde kullanılmıştır. Bu yöntem ile işaretlerin zaman türevleri ve sistemin başlangıç koşulları için gerekli olmadığı belirtilmiştir. Analitik ve sayısal sonuçlar; önerilen cebirsel yaklaşımın güç sistem işaretlerinde harmoniklerin, ara harmoniklerin ve alt harmoniklerinin genlik, frekans ve faz parametrelerinin hızlı ve eş zamanlı olarak kestirimde etkili olduğu görülmüştür.

Literatürde belirtilen yöntemler, belirli problemlerin çözülmesinde yetersiz kaldığından bazen araştırmacılar tarafından hibrit çözüm önerileri türetilmektedir. Aşağıda bazı hibrit yöntemlerin araştırmacılar tarafından kullanılıp performans değerlendirmeleri hakkında yorumları bulunmaktadır.

Tartan ve Erdem (2012) tarafından sunulan yöntemde harmonik kestirim problemi için EKK ile birlikte diferansiyel gelişim (DE) yöntemini kullanan bir hibrit algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma benzetim çalışmalarında uygulanmış ve doğruluk - hesaplama hızı performansları, pasif kalıtlı parçacık sürü optimizasyonu (PKPSO) kullanan hibrit bir algoritma ile karşılaştırılmıştır. Aynı test işareti ile yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, ortalama hata değeri ve hesaplama hızı bakımından, DE'nin PKPSO'ye göre daha iyi performansa sahip olduğu gösterilmektedir.

Tartan ve Erdem (2013) tarafından sunulan yöntemde temel frekans ve ara harmonikleri kestirmek için diferansiyel gelişim (DE) ve en küçük kareler (EKK) yöntemlerinin birleşimi önerilmiştir. Önerilen algoritmanın kestirim gücünü artırmak için, frekans sapması ve ara harmonik kestirimi optimize etme sürecine dâhil edilmiştir. Sonuçlar,

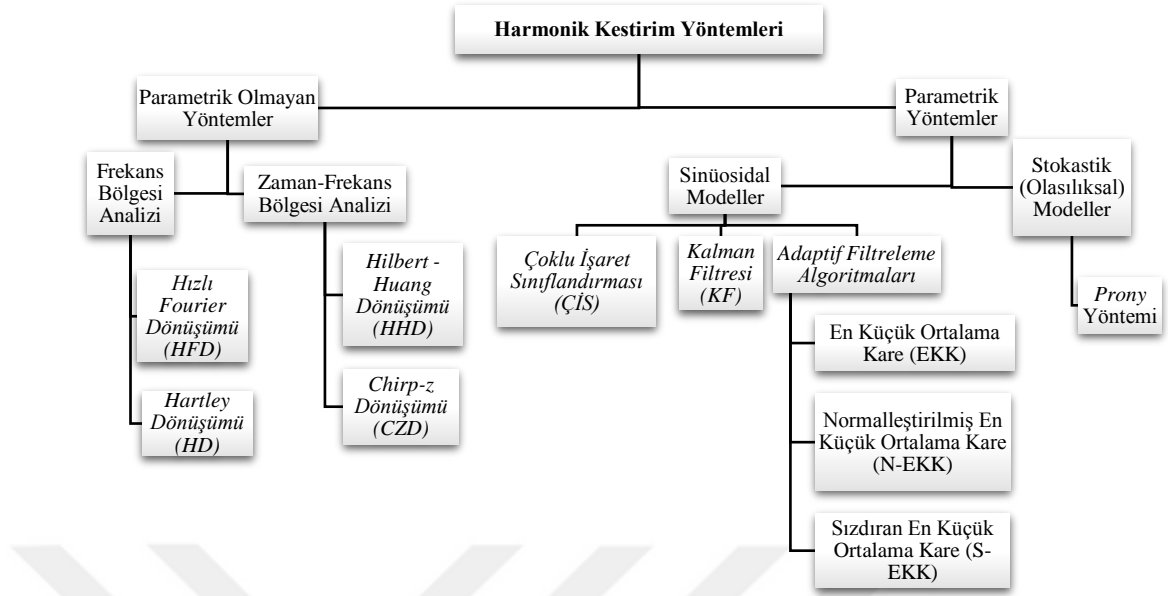
önerilen algoritmanın, frekans sapmasının varlığında temel frekansı kestirebileceğini göstermiştir. Benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen algoritmanın ayarlanması için daha az parametre gereksinimi duyduğu ve daha hızlı yakınsama hızına sahip olduğu belirlenmiştir.

Özgönenel ve arkadaşları (2013) tarafından sunulan yöntemde destek vektör makinesinin (DVM) performans değerlendirmesini ve güç kalitesinin izlenmesi için farklı sınıflandırma yöntemlerini önerilmiştir. Pratik uygulamalar ile önerilen hibrit algoritmanın güç kalitesi izleme yazılımında kullanılabilir olduğunu belirtilmiştir.

Tartan ve Erdem (2016) tarafından sunulan yöntemde faz kestirimi için koloni tabanlı arama algoritması ve genlik kestirimi için EKK yöntemi birleştirilmiştir. PSO ve DE'yi kullanan diğer iki evrimsel algoritma ile karşılaştırıldığında, önerilen algoritmanın doğruluk ve hesaplama süresi açısından üstün performans sağladığı belirtilmiştir.

Kabalıcı ve Koçkanat (2017) tarafından sunulan hibrit yöntemde güç işaretinin genliği ve faz kestirimi için bir optimizasyona dayalı diferansiyel arama algoritması (DSA) önerilmiştir. Önerilen DSA yönteminin performansı, Genetik Algoritma-En Küçük Kare (GA-EKK), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmaları ile karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, önerilen harmonik kestiricinin literatürde daha önce bildirilen yöntemlerden daha iyi sonuçlar sağladığı belirtilmiştir.

Bölüm 2'nin birinci kısmında güç kalitesi parametrelerine ait tanımlar sunulmuştur. İkinci kısmında ise güç sistemi harmoniklerinin kestirim yöntemleri, parametrik ve parametrik olmayan yöntemler olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Bu tez çalışmasında parametrik olmayan yöntemler içerisinde yer alan yöntemler; Fourier dönüşümü, Chirp z-dönüşümü, Hartley dönüşümü ve Hilbert – Huang dönüşümü iken parametrik yöntemler içerisinde yer alan yöntemler ise Prony yöntemi, çoklu işaret ayrıştırması, adaptif filtre algoritmaları (EKK, normalleştirilmiş-EKK ve sızdıran EKK) ve Kalman filtresidir. Şekil 1.1 ile bu çalışmada yer alan yöntemler kapsamlı bir şekilde araştırılmış, matematiksel altyapıları irdelenmiş, prensiplerine göre sınıflandırılmıştır.



Şekil 1.1. Çalışmada yer alan konu başlıklarının özeti (Jain ve Singh 2011)

Bölüm 3’te, Şekil 1.1’de yer alan yöntemlere ait algoritmaların akış diyagramları sunulmuş ve bu yöntemlerle oluşturulan harmonik kestirimi uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 4’ün birinci kısmında harmonik kestirimi uygulaması için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının yöntemlerdeki sonuçları yer almaktadır. İkinci kısmında sunulan yöntemlerin karşılaştırmaları yer almaktadır. Parametrik olan ve parametrik olmayan yöntemlerin karşılaştırılması alt başlığında, çalışma kapsamında sunulan yöntemlerin kestirim hataları genlik, faz ve frekans kestirim karşılaştırmaları yer almaktadır. Son kısımda güç kalitesi parametreleri, sunulan yöntemlere uygulanmış olup hata oranları verilmiştir. Yöntemlerin ve parametrelerin hata oranları grafikler ile görselleştirilmiştir. Yöntemlerin giriş işaretindeki gerilim, faz ve frekans bileşenlerini kestirme yetenekleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada yer alan yöntemlerin hesaplama yükü açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bölüm 5’te ise, sunulan yöntemlerin harmonik kestirimi uygulamasında yer alan sonuçları irdelenmiş ve kendi sınıfındaki diğer yöntemlerle karşılaştırmaları çizelgeler halinde sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Güç Kalitesi Parametreleri

Güç kalitesi, güç sisteminin belirlenen bir noktasında düzgün sinüs biçimindeki gerilimin, anma genlik ve frekans değerinde bozulma olmaksızın sürdürülmesi olarak ifade edilmektedir. IEEE 1159-1995 standartlarına göre güç kalitesi problemleri; geçici durumlar, kısa süreli gerilim değişimleri, uzun süreli gerilim değişimleri, gerilim dengesizlikleri, dalga şekli bozulmaları, gerilim salınımları ve frekans değişimleri olmak üzere yedi kategoriye ayrılmaktadır. Çizelge 2.1’de farklı kategorilerdeki güç kalitesi problemleri için uygun tipik spektral içerik, devamlılık süresi ve genlik değerleri içeren bilgiler görülmektedir. Bu kategoriler ve açıklamalar, ölçüm sonuçlarının sınıflandırılması ve güç kalitesi problemlerine sebep olabilen elektromanyetik olayın tanımlanmasında önemlidir. İlgili durumlar aşağıda özetlemektedir (IEEE 2019; Uyar 2008).

2.1.1. Geçici Durumlar

Geçici olaylar gerilim veya akım dalga şeklinde çok kısa sürede meydana gelen değişimlerdir. Geçici olaylar IEEE std. 1159-1995 standardına göre darbeli ve salınımlı olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Bu olaylar gerçekleşen olayın süresi ve frekansına göre sınıflandırılmaktadır.

Darbeli Geçici Durumlar

Akım, gerilim veya her ikisinin sürekli durum şartlarında meydana gelen ve tek kutuplu (pozitif veya negatif) anlık değişimler, darbeli geçici durum olarak tanımlanmaktadır. Darbeli geçici durumların şekli, oluşan yüksek frekanslardan dolayı hızlı bir şekilde değişebilir ve güç sistemlerinin farklı bölümlerinden izlendiğinde çok ayrı özellikler gösterebilmektedir. Darbeli olaylar iletim sisteminde en çok yıldırım darbe gerilimlerinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2.1. Güç sistemlerindeki elektromanyetik olayların kategorileri ve karakteristikleri (IEEE 2019)

Bozulmanın Türü	Frekans Spektrumu	Olayın Süresi	Gerilimin Genliği
1. Geçici Durum			
1.1 Darbeli			
1.1.1 Nanosaniye	5-ns yükselme	< 50 ns	
1.1.2 Mikrosaniye	1-µs yükselme	50 ns-1 ms	
1.1.3 Milisaniye	0,1 ms yükselme	> 1 ms	
1.2 Salınımlı			
1.2.1 Düşük frekans	<5 kHz	0,3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Orta frekans	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
1.2.3 Yüksek frekans	0,5-5 MHz	5 µs	0-4 pu
2. Kısa süreli etkin değer değişimleri			
2.1 Ani			
2.1.1 Çökme		0,5-30 periyot	0,1-0,9 pu
2.1.2 Sıçrama		0,5-30 periyot	1,1-1,8 pu
2.2 Kısa süreli			
2.2.1 Kesinti		0,5-30 periyot	<0,1 pu
2.2.2 Çökme		30 periyot-3 s	0,1-0,9 pu
2.2.3 Sıçrama		30 periyot-3 s	1,1-1,4 pu
2.2.4 Gerilim dengesizliği		30 periyot-3 s	%2-%15
2.3 Geçici			
2.3.1 Kesinti		>3 s-1 dk	<0,1 pu
2.3.2 Çökme		>3 s-1 dk	0,1-0,9 pu
2.3.3 Sıçrama		>3 s-1 dk	1,1-1,2 pu
2.3.4 Gerilim dengesizliği		>3 s-1 dk	%2-%15
3. Uzun süreli etkin değer değişimleri			
3.1 Kalıcı kesinti		>1 dk	0,0 pu
3.2 Düşük gerilim		>1 dk	0,8-0,9 pu
3.3 Aşırı gerilim		>1 dk	1,1-1,2 pu
3.4 Aşırı akım		>1 dk	
4. Gerilim dengesizliği			
4.1 Gerilim		Sürekli durum	%0,5-%5
4.2 Akım		Sürekli durum	%1.0-%3.0
5. Dalga şekli bozulmaları			
5.1 Doğru akım bileşeni		Sürekli durum	%0-0,1
5.2 Harmonikler	0-100. harmonik	Sürekli durum	%0-20
5.3 Ara harmonikler	0-6 kHz	Sürekli durum	%0-2
5.4 Çentik		Sürekli durum	
5.5 Gürültü	Geniş bant	Sürekli durum	%0-1
6. Gerilim salınımları	< 25 Hz	Kesintili	%0,1-7
			0,2-2 P _{st}
7. Güç frekansı değişimleri		<10 s	±0,10 Hz

Salınımlı Geçici Durumlar

Akım, gerilim veya her ikisinin sürekli durum şartlarında meydana gelen ve hem pozitif hem de negatif değerler alan anlık değişimler, salınımlı geçici durum olarak tanımlanmaktadır. Salınımlı geçici durumlar, ani değerleri hızlı bir şekilde kutuplarını değiştiren, akım ve gerilimlerden oluşmaktadır. Bu geçici durumlar, frekans spektrumu, devamlılık süresi ve genlik değerleriyle ifade edilmektedir (Çizelge 2.1).

2.1.2. Uzun Süreli Gerilim Değişimleri

Uzun süreli değişimler, şebeke frekansında, 1 dakikadan uzun süren etkin değişimleri kapsamaktadır. Uzun süreli değişimler, ya aşırı gerilimden ya da düşük gerilimden kaynaklanmaktadır. Aşırı ve düşük gerilimler genellikle sistem arızalarından meydana gelmemektedir. Bunlara daha çok yük değişimleri ve sistem anahtarlama işlemleri sebep olmaktadır. Böyle değişimler, gerilimin etkin değerinin zamana göre değişimine bağlı olarak gözlemlenmektedir.

Aşırı Gerilim

Aşırı gerilim, şebeke frekansında, 1 dakikadan uzun süren ve gerilimin etkin değerinin %110'dan fazla artış gösterdiği durumdur. Bu durum genellikle iç aşırı gerilim etkisidir ve yük anahtarlama (büyük yüklerin devre dışı bırakılması veya bir kapasitör grubunun devreye alınması) sonucu ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında, gerilim kontrollerinin yetersiz olması, yükün azalması ve transformatör kademe ayarının doğru yapılmaması sistemde aşırı gerilimlere neden olmaktadır.

Düşük Gerilim

Düşük gerilim, şebeke frekansında, 1 dakikadan uzun süren ve gerilimin etkin değerinin %90'nın altına düştüğü durumdur. Düşük gerilimde, aşırı gerilimlere sebep olan anahtarlama işleminin tersi gerçekleşmektedir. Yani, büyük yüklerin devreye girmesi veya kapasitör grubunun devreden çıkması gibi anahtarlama işlemleri, sistem üzerindeki gerilim düzenleyici cihazların sistemi tekrar eski seviyesine geri getirene kadar geçen

sürede düşük gerilime neden olmaktadır. Ayrıca aşırı yüklenmiş devrelerde düşük gerilime neden olabilmektedir.

Kalıcı Gerilim Kesintileri

Besleme gerilimi, 1 dakikayı aşan bir süre boyunca sıfır olduğu takdirde, uzun süreli gerilim değişimi kategorisinde yer alan kalıcı gerilim kesintisi meydana gelmektedir. 1 dakikadan fazla süren gerilim kesintileri çoğunlukla kalıcıdır. Bu tür kesintilerde sistemin düzenlenip eski haline getirilmesi için insan müdahalesi gerekmektedir.

2.1.3. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

Kısa süreli değişimler, değişimin süresine göre ani, anlık ve geçici olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Gerilimdeki genlik değişimine göre ise kısa süreli kesinti, gerilim sıçraması, gerilim çökmesi olmak üzere yine üç kısımda incelenmektedir. Bu tip değişimler, büyük yüklerin yüksek akımlarla devreye girmeleri, sistemdeki bağlantı kopuklukları gibi sebeplerden meydana gelebilmektedir.

Kısa Süreli Kesintiler

Kesinti, nominal şebeke geriliminin etkin (RMS) değerinin veya yük akımının %10'unun da altına inmesi olarak tanımlanmaktadır. IEEE 1159-1995 standardına göre kısa süreli kesintiler ani, anlık ve geçici olarak üçe ayrılmaktadır. Eğer kesinti yarım periyot ile 30 periyot arasında ise ani, 30 periyot ile 3 saniye arasında ise anlık, 3 saniye ile 1 dakika arasında ise geçici olarak tanımlanmaktadır. Kısa süreli kesintiler sistemde çalışan elektriksel aletlere zarar verebilir. Sistemdeki kesici açıp kapamaları da kesintilere neden olabilmektedir.

Gerilim Çökmesi

Şebeke frekansında 10 ms'den fazla (0.5 periyot) ve 1 dakikadan az olmak kaydıyla, nominal gerilim etkin değerinin %10-%90 arasında azalma göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Gerilim çökmesi, genlik değerine ve olayın süresine göre karakterize edilmektedir (Çizelge 2.1). Gerilim çökmeleri, genellikle sistem arızalarına bağlıdır. Ayrıca büyük yüklerin devreye girmesi veya büyük güçlü motorların çalışması esnasında

da meydana gelebilmektedir. Gerilim çökmeleri şebekelerde sıkça rastlanılan olaylardandır. Şebeke empedansı ile yakından ilişkilidir. Özellikle şebekeden çok akım çeken büyük yüklerin devreye girmelerinde, şebekede faz-toprak arası veya simetrik faz-faz arası arızalarda ortaya çıkabilmektedir.

Gerilim Sıçraması

Sıçrama, şebeke frekansında 10 ms'den fazla (0.5 periyot) ve 1 dakikadan az olmak kaydıyla nominal gerilim etkin değerinin %110 - %180 arasında artış göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Gerilim çökmesinde olduğu gibi, gerilim sıçramaları da genellikle sistem arızalarına bağlıdır. Fakat gerilim sıçramaları, gerilim çökmeleri kadar yaygın olarak görülmemektedir. Örneğin, tek faz-toprak kısa devre arızası esnasında, arızasız fazlar üzerinde meydana gelen geçici gerilim artışı, sıçrama oluşmasının en önemli sebeplerinden biridir. Gerilim sıçramaları, genlik değerine ve olayın süresine göre karakterize edilmektedir (Çizelge 2.1). Arıza durumu süresince gerilim sıçramasının şiddeti, arıza yerine, sistem empedansına ve topraklamaya bağlı olarak değişmektedir.

Anlık Gerilim Kesintisi

Kaynak gerilimi veya yük akımının, 1 dakikayı aşmayan bir süre boyunca nominal değerinin %10'nun altına düşmesi sonucu kesinti meydana gelmektedir. Kesintiler, güç sistemi arızaları, ekipman arızaları ve kontrol sistemlerinin yanlış çalışması sonucu meydana gelebilmektedir. Kesinti esnasında, gerilimin genliği genellikle nominal gerilimin %10'unun altına düştüğünden kesintiler sürelerine göre değerlendirilmektedir. Şebekedeki bir arızadan kaynaklanan kesintinin süresi, koruma rölesinin çalışma zamanı ile belirlenir. Koruma cihazının ani tekrar kapaması, genellikle 30 periyottan az süren ve kalıcı olmayan bir arızanın sebep olduğu kesintiye sınırlandırmaktadır. Koruma cihazının gecikmeli tekrar kapaması ise, anlık ve geçici kesintiye sebep olabilmektedir. Gerilim kesintileri, besleme sistemindeki bir arızadan kaynaklanıyorsa gerilim çökmesi olarak görülebilmektedir. Gerilim çökmesi, arızanın oluşumu ile koruma cihazının çalışması arasındaki zamanda meydana gelmektedir.

2.1.4. Gerilim Dengesizliği

Gerilim dengesizliği, üç faz gerilim veya akımın ortalamasından elde edilen maksimum sapma veya üç faz gerilim veya akımın ortalamasına bölümü olarak tanımlanmaktadır. Yüzde olarak ifade edilmektedir. Dengesizlik, simetrik bileşenler kullanılarak da hesaplanabilmektedir. Ya negatif dizi bileşeninin ya da sıfır dizi bileşeninin, pozitif dizi bileşenine oranı dengesizlik hesaplamada kullanılmaktadır. %2'den düşük gerilim dengesizlikleri, çoğunlukla üç fazlı sistemler üzerindeki tek fazlı yüklerdir. Gerçekten büyük problem oluşturan gerilim dengesizlikleri (% 5'den büyük), üç fazlı bir yükün veya üç fazlı bir kapasitör grubunun, tek faza kaldığı durumda meydana gelmektedir.

2.1.5. Güç Frekansı Değişimleri

Frekans değişimleri, güç sisteminin temel frekansının nominal değerinden sapması olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemlerinin frekansı, sistemi besleyen generatörün dönme hızıyla doğrudan bağlantılıdır. Yük ve üretim arasında dinamik bir denge olduğundan, frekansta küçük değişiklikler meydana gelmektedir. Frekans değişiminin boyutu ve süresi, yükün özelliklerine ve yük değişikliklerine yol açan generatör kontrol sisteminin cevabına bağlıdır. İletim sisteminde meydana gelen arızalar, büyük yük taşıma kapasitesine sahip bir güç iletim sisteminin devre dışı kalması veya büyük güç üreten generatörlerin devre dışı kalması, bir güç sisteminin normal sürekli durum çalışması için kabul edilen sınırlar dışına çıkan frekans değişikliklerine sebep olmaktadır.

2.1.6. Dalga Şekli Bozulmaları

Dalga şekli bozulmaları, sürekli durumda gücün frekansının ideal sinüs dalgasından sapması olarak tanımlanmaktadır. Dalga şekli bozulmalarının; doğru akım bileşeni, harmonikler, ara harmonikler, çentik ve gürültü olmak üzere başlıca beş tipi vardır.

Doğru Akım Bileşeni

Bir alternatif akım güç sisteminde, doğru akım veya gerilimin bulunması, doğru akım bileşeni ile ifade edilmektedir. Bu bileşen, elektronik güç çeviricilerindeki simetrisizlik veya yeryüzünün manyetik alanındaki bozulmadan kaynaklanabilmektedir. Trafolarda

doyuma ve böylece fazla ısınmaya sebep olabilmektedir. Bu da trafonun ömrünü kısaltmaktadır.

Çentik

Şebeke geriliminin bir periyodunda doğrultucu darbe sayısı kadar tekrarlanan çökmelerden oluşan periyodik dalga bozulması çentik olarak tanımlanmaktadır. Çentik sürekli olarak meydana geldiği için, etkilediği gerilimin harmonik spektrumu üzerinden özellikleri belirlenebilmesine rağmen, genellikle özel bir durum olarak incelenmektedir. Çentiğin etkisi ile oluşan frekans bileşenleri çok yüksek olabilir. Bu nedenle harmonik analizleri için kullanılan klasik ölçüm cihazları ile belirgin bir şekilde tanımlanamamaktadır.

Gürültü

Gürültü, normal sinüs şeklindeki akım veya gerilim üzerine binen, 200 kHz'den küçük geniş bant frekans spektrumuna sahip istenmeyen elektrik işareti olarak tanımlanmaktadır. Bu işaret hem faz iletkenleri hem de nötr iletkenleri üzerinden taşınabilmektedir. Güç sistemlerinde gürültüye, güç elektroniği cihazları, kontrol devreleri, ark cihazları, anahtarlamalı güç kaynakları ve transistörlü doğrultucu içeren yükler sebep olabilmektedir. Ayrıca güç sistemlerinde uygun topraklama yapılmadığı takdirde, gürültü problemleri daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Temel olarak gürültü, harmonik bozulma veya geçici durum olarak sınıflandırılmayan herhangi bir güç işaretinin bozulmasından oluşmaktadır. Gürültü, mikroişlemciler ve programlanabilir kontrolörler gibi hassas elektronik cihazların çalışmasını etkileyebilir veya zarar verebilmektedir. Bu problem, filtreler ve izolasyon transformatörleri kullanılarak azaltılabilmektedir.

Gerilim Salınımları

Gerilim salınımları (flicker), genliği nominal gerilimin 0.9-1.1 pu değerleri arasında olan hızlı sistematik gerilim değişiklikleridir. Ark fırınları, kaynak makineleri gibi süreklilik gösteren cihazlar, yük akımında hızlı değişiklikler yaparak kırpışma (flicker) etkisi olarak da isimlendirilen gerilim salınımlarına sebep olmaktadır. Gerilim salınımlarının oluşturduğu kırpışma, akkor flamanlı veya flüoresan lambaların hızlıca yanıp sönmeye

sebeptir. Kırpışma, 6-8 Hz civarında ise, ışığın şiddetindeki değişim gözle görülebilir. Kırpışma, insanları hem bedensel hem de ruhsal olarak olumsuz bir şekilde etkileyebilmektedir. Ayrıca hassas cihazların çalışmasını da etkileyebilmektedir.

Harmonikler

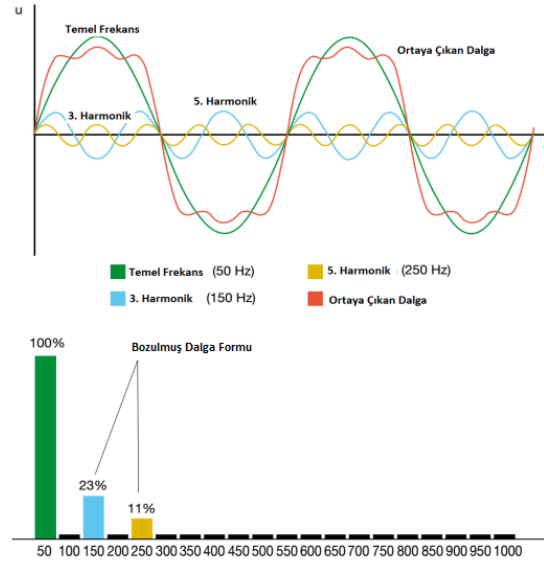
Harmonikler, şebeke frekansının tam katı frekanslara sahip sinüzoidal gerilim veya akımlardır. Bozuk dalga şekilleri, temel bileşen ve tüm harmoniklerin toplamı olarak ifade edilebilmektedir (Şekil 2.1). Harmonik bozulma, güç sistemindeki doğrusal olmayan özellikteki cihaz ve yükler nedeniyle oluşabilir. Harmonik bozulma seviyeleri, Eş. (2.1)'de görüldüğü gibi, her bir harmonik bileşenin genliği ve faz açılarını belirten harmonik spektrumu ile açıklanabilir. Akım için eşitlik,

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^H I_h \sqrt{2} \cos(h\omega t - \beta_h) \quad (2.1)$$

şeklindedir. Burada $\omega = 2\pi f_0$ ve f_0 temel frekans veya güç sistemi frekansı olup: $f_0 = 1/T$ ve T ise işarete ait temel periyottur. Burada DA bileşen toplama $h = 0$ seçilerek de dâhil edilebilir. Bu matematiksel olarak doğru olsa da yorumlama açısından yukarıdaki gösterim daha uygundur. Aynı şekilde, gerilim dalga şekli;

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^H V_h \sqrt{2} \cos(h\omega t - \alpha_h) \quad (2.2)$$

şeklindedir. Temel frekansı 50 Hz olan sistemler için $T = 20$ ms ve $f_0 = 50$ Hz'dir. Birçok güç sistemi uygulamalarında, temel frekans ($h = 1$) özellikle gerilim için baskındır. Sürekli zamanlı bir işaret için H sonsuzdur; ancak ayrık zamanlı işaretler için bu değer örnekleme frekansı tarafından belirlenmektedir. Örnekleme frekansı, ayrık zamanlı bir işaret içindeki en yüksek değerlikli frekans bileşeninin en az iki katı olması gerekmektedir. (Fang ve Mu 2008).



Şekil 2.1. Harmonik dağılımı (ABB 2019)

Ara Harmonikler

50 veya 60 Hz'de çalışacak şekilde tasarlanan bir besleme sisteminin frekansının, tam katı olmayan frekans bileşenlerine sahip akımlar veya gerilimler ara harmonik olarak isimlendirilmektedir. Bu harmonikler, ayrık frekanslar veya geniş bant spektrumu olarak görülebilmektedir. Ara harmonikler tüm gerilim kademelerinde bulunabilir. Ara harmonikleri oluşturan temel kaynaklar; statik frekans çeviricileri, indüksiyon fırınları ve ark cihazlarıdır. Bu tip harmonikler genellikle frekans değişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır ve yüke göre değişebilirler. Böyle ara harmonik akımları, değişken olan ara harmonik frekansının sistemin temel frekansıyla çakışması durumunda, güç sistemleri üzerinde oldukça ciddi rezonansları ortaya çıkarabilmektedir.

Harmonikler gerilim ve akım değerleri için farklı sınır seviyelerine göre değerlendirilmektedir. Sınır değerlerinin bazıları EK – 1'de yer almaktadır.

IEEE std. 519-1992 (IEEE 2014) göre, etkin (RMS) değer, Eş. (2.3) ile tanımlanmıştır.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T V(t)^2 dt} \cong \sqrt{\sum_{k=1}^N V_k^2} \quad (2.3)$$

İşaretteki bozulmanın bir ölçüsü olan toplam harmonik bozulma (THB), temel harmonik dışındaki harmoniklerden hesaplanan RMS değerinin, temel harmoniğin RMS değerine oranıdır (IEEE 1992). Gerilim ve akım için toplam harmonik bozulma Eş. (2.4)'te verilmiştir.

$$THB_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N V_k^2}}{V_{1RMS}} \quad (2.4a)$$

$$THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N I_k^2}}{I_{1RMS}} \quad (2.4b)$$

Eş. (2.5) ile ifade edilen biçim faktörü (BF), işaretin RMS değerinin, temel harmoniğin RMS değerine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$BF = \frac{V_{RMS}}{V_1} \quad (2.5)$$

Eş. (2.6) ile ifade edilen tepe faktörü (TF), işarettaki maksimum ani değer (tepe değeri), RMS değere oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$TF = \frac{V_m}{V_{RMS}} \quad (2.6)$$

Ayrıca etkin (RMS) değer, toplam harmonik bozulma (THB), biçim faktörü (BF) ve tepe faktörü (TF) parametreleri bu çalışma kapsamında 4. Bölümde benzetim sonuçları olarak çizelgeler halinde sunulmuştur. Matematiksel hesaplama referansı ise EK – 2’de açıklanmıştır.

Elektrik enerjisinin kalitesinin standartlaştırılması ve tanımlanması önem arz etmektedir. Her enerji sisteminde farklı standartların uygulanması ve farklı tanımlamalar yapılması karışıklıklara sebep olabilir. Bu karışıklıklara yer vermemek için dünya genelinde güç kalitesi parametreleri ile ilgili iki ayrı çatı standart bulunmaktadır. Bunlar EN 50160 ile IEEE Standard 1159’dur. Bu iki standart genel olarak gerilim olaylarından bahsetmektedir. Güç kalitesi parametrelerinin ölçüm yöntemleri ve güç kalitesine etki eden faktörler IEC 61000-4-30 standardında sıralanmıştır. EPDK tarafından Aralık 2012’de yayınlanan “Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi

Yönetmeliği” ülkemizde elektrik dağıtım şirketlerinin uyması gereken güç kalitesi sınırlarını belirtmektedir. Bu yönetmelik, EN 50160 standardını gerilim karakteristikleri yönünden, IEEE 519-1992 standardını akım harmonikleri yönünden ve IEEE 1453-2004 standartlarını fliker etkisi yönünden referans almaktadır. Güç kalitesi parametrelerinin ölçüm yöntemleri ve güç kalitesine etki eden faktörler IEC 61000-4-30 standardında sıralanmıştır (Laughton ve Warne 2003; Erişti ve Demir 2011). Yük tarafından gerilimin RMS değerindeki değişimleri standartlarda farklı detaylarla ele alınmıştır. IEEE std. 1159 standardında geçici olaylar ve kısa süreli değişimler oldukça detaylıdır. EN 50160 standardında ise olaylar daha çok alınan verilerin belli süreli ortalamalarına göre sınıflandırılmış ve bu değerlerin sınırlandırmaları üzerinde durulmuştur. Geçici gerilim değişimleri kısmında geçici olaylar tanımlanmış olsa da sınıflandırılmamıştır. Güç kalitesi bozulmalarına ait matematiksel model ve parametreleri Çizelge 2.2’de yer almaktadır.

Çizelge 2.2. Güç kalitesi bozulmalarının matematiksel modeli (Uyar 2008)

Bozulma Tipi	Matematiksel İfade	Parametreler
Gerilim çökmesi	$v(t)=A \left(1-\alpha(\mu(t-t_1)-\mu(t-t_2))\right) \sin(\omega t)$	$0,1 \leq \alpha \leq 0,9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Gerilim sıçraması	$v(t)=A \left(1+\alpha(\mu(t-t_1)-\mu(t-t_2))\right) \sin(\omega t)$	$0,1 \leq \alpha \leq 0,9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Kesinti	$v(t)=A \left(1-\alpha(\mu(t-t_1)-\mu(t-t_2))\right) \sin(\omega t)$	$0,9 \leq \alpha \leq 1,0$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Harmonik	$v(t)=A(\alpha_1 \sin(\omega t)+\alpha_3 \sin(3\omega t)+\alpha_5 \sin(5\omega t)+\alpha_7 \sin(7\omega t))$	$0,05 \leq \alpha_3 \leq 0,15$ $0,05 \leq \alpha_5 \leq 0,15$ $0,05 \leq \alpha_7 \leq 0,15$
Saf sinüs dalgası, $v(t)=A.\sin(\omega t)$ olarak ifade edilmektedir ($A=1$ pu, $f=50$ Hz).		

Güç sistemlerinde elektrik enerjisinin verimliliğini ve yükün güç kalitesini artırmak için harmoniklerin yok edilmesi gerekmektedir. Harmonikler, elektromanyetik cihazlarda ısınma, mekanik cihazlarda titreşim ve gürültülü çalışmaya, şebekede güç faktörünün azalmasına, aşırı nötr akımlarına ve nötr iletkeni problemlerine, ateşleme devrelerinin anormal çalışmasına, hassas elektronik kartların arızalanmasına, elektronik ölçüm cihazlarının doğru çalışmamasına, güç kondansatörlerinde aşırı ısınma ile ömrünün

azalmasına ve kayıplara, iletim hatlarında, kablolarda ısınma ve enerji kayıplarına yol açmaktadır (Kay 1988). Çizelge 2.3'te güç kalitesi problemleri ve bu problemlerin çözümünde kullanılan yapılar yer almaktadır.

Güç kalitesini etkileyen parametrelerden harmoniklerin çözülmesi ile ilgili yöntemlerin çalışmaları genellikle harmoniklerin ölçülmesi, modellenmesi, kestirimi konuları üzerine yoğunlaşmaktadır ve çeşitli öneriler bulunmaktadır. Bir sonraki bölümde bu tez çalışması kapsamındaki harmonik kestirim yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

Çizelge 2.3. Güç kalitesi problemlerinin çözümünde kullanılan yapılar (Widlund 2012)

Dalga Şekli Bozulmaları	Bozulma Sebebi	Bozulmanın Çözümleri
Gerilim çökmesi veya kısa süreli kesinti	Kısa devreler veya büyük yüklerin anahtarlanması	1.Motor-Jeneratör Seti 2.Sabit Gerilim Transformatörü(CVT) & Manyetik sentezleyici 3.Statik Transfer Anahtarı (STS) & Hızlı Transfer Anahtarı 4.Kesintisiz Güç Kaynağı(UPS) 5.Yedeklemeli Enerji Depolama Sistemi (BSES) 6.Statik Gerilim Regülatörü (SVR) 7.Statik Seri Kompanzator (SSC) 8.Birleştirilmiş Güç Kalitesi Kondisyoneri (UPQC)
Geçici durumlar	Yıldırım darbe gerilimi, şalt cihazı veya kondansatör anahtarlamaları	1.Geçici Gerilim Dalgalanma Bastırıcı (TVSS) 2.İzolasyon Transformatörü ve Düşük Empedanslı Güç Kondisyoneri (LIPC) 3.Alçak Geçiren Filtre
Harmonikler	Doğrusal olmayan yükler	1.Zigzag Transformatörü 2.İzolasyon Transformatörü 3.Manyetik sentezleyici 4.Pasif Filtre 5.Aktif Filtre
Gerilim Dengesizliği	Dengesiz yük dağılımı	1.Birleştirilmiş Güç Kalitesi Kondisyoneri (UPQC) 2.Statik VAr Kompanzasyonu (SVC)
Gerilim Dalgalanmaları	Kısa devreler veya büyük yüklerin anahtarlanması	1.Statik VAr Kompanzasyonu (SVC) 2.Statik Senkron Kompanzator (STATCOM)

2.2. Harmonik Kestirim Yöntemleri

Güç kalitesini etkileyen parametrelerden harmoniklerin çözümlenmesi ile ilgili yöntemlerin karşılaştırılması literatürde geniş yer tutmaktadır. Harmonikler ile ilgili araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar genellikle harmoniklerin ölçülmesi, modellenmesi, kestirimi konuları üzerine yoğunlaşmaktadır ve çeşitli öneriler bulunmaktadır. Bu konuda yapılmış çalışmalar sistemdeki akım ya da gerilimi örnekledikten sonra işaretin içerisinde bulunan bileşenlerin genlik, frekans ve faz açılarını bulmayı amaçlar. Aşağıda harmonik kestirim yöntemleri parametrik olmayan ve parametrik olan yöntemler hakkında genel açıklama yapılmaktadır.

2.2.1. Parametrik Olmayan Yöntemler

Parametrik olmayan yöntemler, güç işaretindeki farklı frekansların uygun dönüşümlerle kestirilmesini incelemektedir (Jain ve Singh 2011). Özellikle, yaklaşımlar dönüşüm için kullanılan temel fonksiyonlar olarak da adlandırılan bilinen fonksiyonların bazı katsayılarının (örneğin genliklerin) değerlendirilmesi yoluyla dalga formu spektrumunun kestiriminde oluşur. Fourier dönüşümü, Hartley dönüşümü, Chirp z-dönüşümü ve Hilbert-Huang dönüşümü, bu analiz yöntemleri kategorisine ait güç sistemi dalga formu analizinde uygulanan ana teknikler arasındadır. Yukarıda belirtilen teknikler, ayrık ve gelişmiş modelleri ile birlikte, karakteristik özelliklerine ve zamana göre değişen dalga formlarının analizi ile ilgili konulara odaklanarak aşağıda sunulmaktadır.

Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü, her frekansa ait sinüs dalgası için genlik ve faz bileşenlerini hesaplayan bir fonksiyondur. Dönüşüm sürekli zaman fonksiyonlarına veya ayrık zaman fonksiyonlarına uygulanmaktadır. Eğer dönüşüm kesikli zaman aralıklı değerlerden oluşmuş ise ayrık frekanslardaki sinüzoidal fonksiyonların serisi şeklinde gösterilebilmektedir. Bu frekanslar asıl frekansın iki, üç ve daha büyük katlarıdır. Bu şekildeki sinüslerin toplamına Fourier serisi denilmektedir. Zaman bölgesindeki bir işareti frekans bölgesine aktarma işlemine Fourier dönüşümü denilmektedir. Bu dönüşümden sonra fonksiyon karmaşık ve eksponansiyel ifadeler şekline dönüşmektedir.

Mühendislik, analiz ve tasarım konusunda büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Oppenheim ve ark. 1983). Bir elektrik işareti hakkında bilgi alabilmek (frekans, genlik ve fazı öğrenmek) için işaret Fourier serisi ile yazılabilmektedir. Eş. (2.7)'te Fourier serisinin açılımı verilmektedir.

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) \right) \quad (2.7)$$

Her bir harmonik frekansı için ayrı ayrı hesaplanan a_0 , a_n , b_n katsayıları Eş. (2.8)'te verilmektedir.

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.8a)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) dt \quad (2.8b)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) dt \quad (2.8c)$$

Eş. (2.7)'te verilen Fourier serisi gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Eş. (2.9)'teki gibi yazılabilmektedir. A_0 katsayısı işaretin DA seviyesini, A_n katsayısı hesaplanan harmonik frekansa ait genliğini ve θ_n ise açısını vermektedir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) + \theta_n \right) \quad (2.9)$$

$$A_0 = \frac{1}{2} a_0 \quad (2.9a)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.9b)$$

$$\theta_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (2.9c)$$

$\omega t = 2\pi f t$ ve $e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) - j\sin(\omega t)$ olmak üzere tanımlama yaptığımızda Eş.(2.10)'da Fourier dönüşümü verilmektedir.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.10)$$

Eş. (2.10)'da verilen dönüşüm fonksiyonu sabit ΔT aralıklarla N kadar örnekleğinde Eş. (2.11)'de verilen ayrık Fourier dönüşümü (AFD) elde edilmektedir (Acha ve Madrigal 2002).

$$F[k\omega] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n\Delta T]e^{-jk\omega n\Delta T} \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.11)$$

Faz faktörü $W = e^{-j2\pi/N}$ eşitliği ile ifade edilmektedir. Eş. (2.11) faz faktörüne göre tekrar yazıldığında Eş. (2.12) elde edilmektedir.

$$F[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n]W^{kn} \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.12)$$

Eş. (2.12)'de verilen AFD'de, $N=8$ olarak alındığında eşitliği $F=Wxf$ matris formunda yazılacak olursa,

$$\begin{bmatrix} F[0] \\ F[1] \\ F[2] \\ \vdots \\ F[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & \dots & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & \dots & W^{(N-1)} \\ W^0 & W^0 & W^4 & \dots & W^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W^0 & W^{(N-1)} & W^{2(N-1)} & \dots & W^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ f[2] \\ \vdots \\ f[N-1] \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Eş. (2.13)'te verilen W matrisi $7 \times 7 = 49$ değer almaktadır. W matrisinin 49 değerinden 46 değeri $1, \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}, j\frac{1}{2}$ sayılarının eşleniğinden veya negatif değerlerinden oluşmaktadır. AFD kullanılarak gereksiz hesaplamaların azaltılma işlemine hızlı Fourier dönüşümü (HFD) denilmektedir (Acha ve Madrigal 2002).

Chirp z-Dönüşümü

Chirp z-dönüşümü modeli, z dönüşümünün genelleştirilmiş bir yaklaşımıdır. Fourier dönüşümü, z düzleminde birim çember ile sınırlı iken, CZD modelinde ise kısıtlama yoktur. Uygulama, birim çember üzerinde istenilen bölgede çalışma esnekliğine sahiptir. Spektrum analizi çalışmalarında sıklıkla karşılaşılan CZD yönteminde, örneklerin z dönüşümü spiral kontör üzerinde (içe ve dışa dairesel döngü), birbirine eşit açılarla yerleşmiş noktalarda alınabilmektedir. Yapılan incelemeler, birim çember dışındaki noktalarda, hatanın arttığını göstermektedir (Rabiner ve ark. 1969; Frickey 1995). N uzunluklu $y(n)$ dizisine ilişkin z dönüşümü,

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)z^{-n} \quad (2.14)$$

şeklindedir. $z = AW^{-k}$ biçiminde tanımlanmaktadır. Burada $A = A_0 e^{j\theta_0}$, $W = W_0 e^{j\varphi_0}$, $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 'dir. A_0 ve W_0 pozitif gerçel sayılardır. Ayrıca θ_0 , genelleştirilmiş biçimi $\theta_k = \theta_0 + k\varphi_0$ olan başlangıç açısal frekansını, $\varphi_0 = \frac{2\pi}{M}$ açısal artırım aralığını ifade etmektedir. $Y(z)$ dönüşümünün z noktalarında hesap edilmesi ile Chirp z-dönüşümü elde edilmektedir. $z = AW^{-k}$ dönüşümü yapılarak,

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)(A^{-n}W^{-kn}) \quad (2.15)$$

ifadesi elde edilmektedir (Oppenheim ve Schaffer 1989). Öte yandan büyük boyutlu verileri fazla bellek gereksinimi duymadan rahat işleyebilmek için bölünmüş Chirp z-dönüşümü (BCZD) kullanılmaktadır. Eş. (2.16)'da $y(n)$ 'nin N uzunluklu toplam L tane parçaya bölüdüğü ($n < 0$, $y(n)=0$) durumda, LN uzunluklu $y(n)$ için CZD ifadesi,

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{N-1} y_1(n)z^{-n} + (z^N) \sum_{n=0}^{N-1} y_2(n)z^{-n} + (z^N)^2 \sum_{n=0}^{N-1} y_3(n)z^{-n} + \dots \\ + (z^N)^{L-1} \sum_{n=0}^{N-1} y_L(n)z^{-n} \quad (2.16)$$

biçimindedir (Wang 1990). A ve W ifadeleri Eş. (2.16)'da yerine yazılarak,

$$Y(z) = C\{y_1(n)\} + (A_0W_0^{-k})^N e^{j\theta_k N} C\{y_2(n)\} + (A_0W_0^{-k})^{2N} e^{j\theta_k 2N} C\{y_3(n)\} + \dots \\ + (A_0W_0^{-k})^{(L-1)N} e^{j\theta_k (L-1)N} C\{y_L(n)\} \quad (2.17)$$

ifadesi elde edilmektedir. Eş. (2.17)'de $Y(z) = Z\{y(n)\}$ iken $C(z) = C\{y(n)\}$ 'dir ($y(n)$ dizisi için CZD, C ile tanımlanmıştır). Birim çember üzerinde çalışıldığından $A_0=1$, $W_0=1$ yapılarak en genel durumda,

$$Y(z) = \sum_{i=0}^{L-1} C\{y_1(n)\} \{e^{j\theta_k N}\}^i \quad (2.18)$$

biçimine dönüşmektedir. İşlemsel karmaşıklık açısından incelendiğinde CZD için N olan sonuç, HFD için ise $N \log_2 N$ ifade edilmiştir (Mitra 2001). Buradan da CZD kullanılan sistemin daha avantajlı olduğu görülmektedir (Namdar ve ark. 2012).

Hartley Dönüşümü

Hartley dönüşümü, gerçek değerli fonksiyondan gerçek değerli başka bir fonksiyona olan dönüşümdür (Hartley 1942). Yani; Fourier dönüşümünün aksine Hartley dönüşümünde sanal bileşenlere ihtiyaç yoktur. Hartley dönüşümünün Fourier dönüşümünde olduğu gibi ayrık dönüşümü mevcuttur. Hartley dönüşümü, Fourier dönüşümüyle temelde aynı sonuçları vermesine karşın aralarında hız açısından fark olduğu belirtilmektedir (Hou 1987). Ayrık formdaki Hartley dönüşümü (AHD) ise Bracewell tarafından ortaya konulmuştur (Bracewell 1987). Hartley dönüşümünün hızlı formu da mevcuttur.

$$H(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas}\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.19)$$

Eş. (2.19)'daki $x(n)$, gerçek zamanlı bir işareti ifade ederken; k harmonik sırasını, n işaretten alınan örnek sırasını ve N ise toplam örnek sayısını ifade etmektedir. cas ifadesi Eş. (2.20)'deki gibi reel kosinüs ve sinüs fonksiyonlarının toplamıdır.

$$\text{cas}(x) = \cos(x) + \sin(x) \quad (2.20)$$

AHD'de reel değişkenler kullanılmaktadır. Farklı olarak, Eş. (2.21)'de görüldüğü üzere AFD'de ise karmaşık üstel bir dönüşüm fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) [e^{-j\frac{2k\pi n}{N}}], \quad 0 \leq k \leq N-1; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.21)$$

Dönüşümün çekirdeği olan üstel karmaşık fonksiyonun Eş. (2.22)'deki gibi, reel bileşeni kosinüs, sanal bileşeni ise sinüs fonksiyonudur.

$$e^{-jx} = \cos(x) - j \sin(x) \quad (2.22)$$

Bu farklılık, literatürde AHD'nin AFD'den daha hızlı ve basit olacağı şeklinde ifade edilmiştir (Piccinin 1988). AFD'de iki karmaşık değişkenin çarpımı ifade edilirken, AHD'de AFD'deki işlem karmaşasından daha az işlem ve değişken ifade edilmektedir. Fourier ve Hartley dönüşümleri arasındaki fark, Fourier dönüşümünde sanal kısmın var olmasıdır. Her iki dönüşüm de işaret işlemede alternatif çözüm yolları sunmaktadır. AHD'nin ters dönüşümü ise Eş. (2.23)'deki gibidir.

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} H(k) \cos\left(\frac{2k\pi n}{N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.23)$$

Eş. (2.19) ve Eş. (2.23)'de verilen dönüşüm ve ters dönüşüm bağıntıları ölçekleme faktörü dışında özdeştir. Bu özellik, hesaplamalarda daha az hafıza kullanımı anlamına gelmektedir. Oysa AFD'deki karmaşık aritmetik kullanımı, işlemlerdeki hafıza kullanımını arttırmaktadır. Genel olarak aslında iki yöntem benzer karmaşıklığa sahiptir. Ancak bu küçük fark, AHD'nin bir üstünlüğü olarak ön plana çıkmaktadır (Vatansever ve Yalçın 2018). Fakat incelenen işaretin faz farkı içermesi durumunda, Hartley dönüşümünün doğruluğu azalmaktadır. Bu durumda parçalı Hartley dönüşümü kullanılmalıdır. Parçalı Hartley dönüşümü aşağıdaki gibidir (Piccinin 1988).

$$H_1(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * \cos\left(\frac{2k\pi n}{N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.24a)$$

$$H_2(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * \sin\left(\frac{2k\pi n}{N}\right), \quad 0 \leq k \leq N-1; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.24b)$$

$$H(k) = \sqrt{H_1(k)^2 + H_2(k)^2} \quad (2.25)$$

Görüldüğü gibi iki aşamalı bir hesaplama gerekmektedir. Bu zorunluluk AHD'nin hesaplama hızına olumsuz etki etmekte ancak sonuçlar doğru olmaktadır (Tekin ve Yılmaz 2015).

Hilbert – Huang Dönüşümü

Hilbert – Huang dönüşümü, lineer olmayan ve durağan olmayan işaretin analizinde kullanılan anlık frekansa dayalı bir işaret işleme yöntemidir (Huang ve diğerleri 1998). Güç kalitesindeki bozulmaları belirlemek için görgül kip ayrışımı (GKA) ve Hilbert dönüşümüne dayalı bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yöntemde, ilk olarak bozulma olan gerilim işaretin GKA kullanılarak farklı frekanslardaki bileşenlerine ayrıştırılmaktadır. İkinci olarak bozulmanın genliğinin ve frekansının belirlenebilmesi için GKA sonucunda elde edilen her bir öz kip işlevlerine (ÖKİ) Hilbert dönüşümü uygulanmaktadır (Rillind 2003;Önal ve ark. 2011).

İncelenen işaret $x(t)$ olmak üzere, ÖKİ bileşenlerinin ve artık işaretin toplamı olarak Eş.(2.26) ile gösterilmektedir.

$$x(t) = r_n + \sum_{j=1}^n c_j \quad (2.26)$$

Burada $x(t)$ analiz edilen işaret, n ölçek sayısı, c_j ise j 'ninci ölçekteki ÖKİ'dir. r_n ise yinelemeler sonunda geriye kalan artık işarettir. GKA sonucunda elde edilen ÖKİ bileşenlerine Hilbert dönüşümü uygulanmaktadır. Her ÖKİ bileşenine $c_j(t)$ Hilbert dönüşümü uygulandıktan sonra, yeni bir veri serisi Eş. (2.27) ile elde edilmektedir.

$$y_j(t) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_j(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.27)$$

$P.V$, bu integralin Cauchy prensip değerini göstermektedir. Bu tanımdan analitik işaret $z_j(t) = c_j(t) + iy_j(t)e^{i\theta_j(t)}$ ile oluşturulmaktadır. Burada $z_j(t)$ 'nin anlık genliği, anlık açısıl frekansı ve anlık frekansı Eş.(2.28) ile hesaplanmaktadır:

$$a_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + y_j^2(t)} \quad (2.28a)$$

$$\theta_j(t) = \arctan \frac{y_j(t)}{c_j(t)} \quad (2.28b)$$

$$w_j(t) = \frac{d\theta_j(t)}{dt} \quad (2.28c)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_j(t)}{dt} \quad (2.28d)$$

2.2.2. Parametrik Yöntemler

Parametrik yöntemler, klasik yöntemlere alternatif bir yaklaşımdır ve analiz edilecek dalga formu için bir model tanımına dayanmaktadır. Dalga şekli spektrumu, modelin parametreleri değerlendirildiğinde bilinmektedir. Parametrik yöntemler, parametrik olmayan yöntemlerin birçok dezavantajının üstesinden gelmektedir. Böylece spektral bileşen kestiriminde büyük bir doğruluk sağlanmaktadır. Örneğin, parametrik çerçevede analiz penceresinin süresiyle ilgili bir frekans çözünürlüğü tanımı yoktur ve bu nedenle AFD'ye dayalı metotların tüm temel problemlerinden kaçınılmaktadır (Caramia ve diğerleri 2009; Bollen ve Gu 2016).

Durağan ve durağan olmayan dalga biçimlerini belirlemek için parametrik yöntemler kullanılabilir. İlk durumda, parametre kestirimi, analiz edilecek dalga biçiminin tüm veri dizisi boyunca elde edilebilir. İkinci durumda, zaman içindeki spektrum değişkenliği mevcut örneklenen dalga formunu uygun sayıda bloğa bölerek tespit edilebilir (Caramia ve diğerleri 2009). Prony'nin yöntemi ve çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi güç sistemi dalga biçimi bozulma değerlendirmesinde uygulanan en yaygın parametrik yöntem örnekleridir (Alfieri 2013).

Durağan olmayan veri modelleme yaklaşımına göre diğer parametrik yöntemler de geliştirilmiştir. Bu yöntemler incelenen sistemin matematiksel bir modelini uygulanmaktadır. Modele herhangi bir zamanda dinamik bir düzeltme sağlamak için gerilim ve akım ölçümleri kullanılmaktadır. Bu şekilde, farklı harmonik sıraları için gerilim ve akım fazları durum modeli tarafından elde edilebilmekte ve bunların bir ölçüm güncelleme adımıyla zamana göre değişimleri tespit edilebilmektedir. Bu kategorideki ana yöntem Kalman filtresidir (Granados ve Lieberman ve ark. 2011; Jain ve Singh 2011).

Prony Yöntemi

Periyodik işaretler Fourier serilerine açılarak farklı genlik ve frekanstaki *sin* ve *cos* trigonometrik fonksiyonlarının (sönümsüz karmaşık üstel fonksiyonlarının) toplamı şeklinde modellenerek işaret bileşenlerinin genlik, frekans ve fazları elde edilmektedir. Prony yönteminde ise işaret, sönümlü karmaşık üstel fonksiyonların doğrusal toplamı olarak modellenerek işaret bileşenlerinin genlik, frekans, faz ve sönüm katsayıları elde edilmektedir. Analiz, herhangi bir $y(t)$ fonksiyonunun,

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^p A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2.29)$$

gibi üstel sönümlü sinüzoidal bileşenlerin doğrusal birleşimi olarak uyarılma işlemidir. Eş. (2.29)'da; A_i , i . bileşenin genliği, σ_i , i . bileşenin sönüm katsayısı, f_i , i . bileşenin frekansı, φ_i , i . bileşenin faz açısı, p , sönümlü üstel bileşenlerin sayısını göstermektedir. Prony analizi üç adımda gerçekleşmektedir (Qi ve ark. 2007; Lobos ve ark. 2003; Salci ve ark. 1998):

Birinci adım: N tane örneklenmiş değere sahip $y(t)$ fonksiyonuna ait doğrusal kestirim modelinin (LPM) katsayıları hesaplanmaktadır.

$$y_N = a_1 y_{N-1} + a_2 y_{N-2} + \dots + a_p y_{N-p} \quad (2.30)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_p \\ y_{p+1} \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix}}_B = \underbrace{\begin{bmatrix} y_{p-1} & y_{p-2} & \cdots & y_0 \\ y_p & y_{p-1} & \cdots & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{N-2} & y_{N-3} & \cdots & y_{N-p-1} \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}}_a \quad (2.31)$$

$$a = C^{-1}.B \quad (2.32)$$

İkinci adım: LPM katsayılarından oluşan karakteristik polinomun kökleri hesaplanmaktadır.

$$\mu^p - a_1\mu^{p-1} - \cdots - a_{p-1}\mu - a_p = 0 \quad (2.33)$$

Üçüncü adım: Doğrusal denklem sistemi çözülerek genlik, frekans ve faz değerleri elde edilmektedir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix}}_F = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \mu_1 & \mu_2 & \cdots & \mu_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_1^{N-1} & \mu_2^{N-1} & \cdots & \mu_p^{N-1} \end{bmatrix}}_E \underbrace{\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_p \end{bmatrix}}_D \quad (2.34)$$

$$D = E^{-1}.F \quad (2.35)$$

$$D_i = \frac{A_i}{2} e^{\varphi_i t} \quad (2.36)$$

Prony'nin yöntemi, hem tüm veri dizisi hem de ardışık veri bloklarına uygulanabilmektedir ve mevcut tüm dalga formuna kayan bir pencere uygulanmaktadır. Bu kayan pencere, sonraki veri bloklarının üst üste binmesiyle veya zaman içinde model parametrelerinin (genlikler ve frekanslar) gösterilmesine göre üst üste binmeyerek zamanla kaydırılabilmektedir.

$$\varphi_i = \text{ArcTan} \left\{ \frac{\text{Im}(D_i)}{\text{Re}(D_i)} \right\} \quad (2.37)$$

$$A_i = \frac{2 \cdot \text{Re}(D_i)}{\text{Cos}(\varphi_i)} \quad (2.38)$$

$$\mu_i = e^{(\sigma_i + 2\pi f_i)T} \quad (2.39)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{T} \text{Re}(\text{In}(\mu_i)) \quad (2.40)$$

$$\omega_i = \frac{1}{T} \text{Im}(\text{In}(\mu_i)) \quad (2.41)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi T} \text{Im}(\text{In}(\mu_i)) \quad (2.42)$$

Eş.(2.37) – Eş.(2.42)'de yer alan eşitliklerde T örnekleme periyodudur (Wylie ve Tiwari 2014).

Çoklu İşaret Sınıflandırması

Çoklu frekans bileşenli genel bozulmuş güç sistemi işaret modeli Eş. (2.43) ile verilmiştir (Uzunoğlu 2011).

$$x[n] = \sum_{k=1}^K A_k e^{(j\omega_k n)} + z[n] \quad (2.43)$$

Eş. (2.43)'te A_k , k . frekans bileşeninin genliğini ve fazını temsil eden karmaşık bir sayıdır. Sistem işaretinde gözlenen gürültü bileşeni $z[n]$ 'dir. Birkaç frekans bileşeninden oluşan işaretlerin alt uzay yapısının analizi, otokorelasyon matrisinin analizi ile gerçekleştirilmektedir.

$$R_x = E[xx^H] = \begin{bmatrix} r_x[0] & \cdots & r_x[M-1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_x[M-1] & \cdots & r_x[0] \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Üstbilgi $\{.\}^H$ H ve $E\{.\}$, eşlenik transpozunu ve matematiksel olasılığı belirtir. R_x korelasyon matrisinin öz ayrışabileceği varsayılmaktadır.

$$R_x = U^H \Lambda_x U \quad (2.45)$$

Matris U , R 'nin ortonormal özvektörlerini içerir ve Λ , karşılık gelen özdeğerleri (λ) içeren çapraz bir matristir. En önemli özvektörler işaret alt uzayını kapmaktadır. Gürültü alt

alanı en az önemli özvektörler tarafından yayılmaktadır (Jensen ve ark. 2010). Otokorelasyon matrisi, işaret ve gürültü alt alanlarına ayrılabilir. Otokorelasyon matrisi, işaret ve gürültü alt alanlarına ayrılabilir.

$$R_x = R_s + R_n = \sum_{k=1}^K |A_k|^2 e_k e_k^{*T} + \sigma_0^2 I \quad (2.46)$$

$$e_k = [1, e^{j\omega_k}, e^{j\omega_k^2}, \dots, e^{j\omega_k(M-1)}] \quad (2.47)$$

Denklemlerde σ_0^2 , gürültü varyansı ve I 'de birim matrisidir. Eş. (2.47), vektör-matris ile ifade edilebilmektedir (Jensen ve ark. 2010).

$$R_x = E\Lambda E^H + \sigma_0^2 I \quad (2.48)$$

$$E = [e_1, e_2, \dots, e_K] \quad (2.49)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} |A_1|^2 & & & & & 0 \\ & |A_2|^2 & & & & \vdots \\ & & \ddots & & & \vdots \\ & & & \ddots & & 0 \\ 0 & \dots & \dots & |A_K|^2 & \dots & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (2.50)$$

Otokorelasyon matrisi işaret ve gürültü alt alanlarına kolayca ayrışmaktadır. Bu cebirsel form Eş. (2.51) ile verilmiştir.

$$R_x = \sum_{i=1}^K (\lambda_i + \sigma_\omega^2) u_i u_i^H + \sum_{i=K+1}^M \sigma_\omega^2 u_i u_i^H \quad (2.51)$$

U matrisi, Eş. (2.52) ile verilen özvektörleri (u_i) içermektedir (Leonowicz 2006).

$$U_{\text{işaret}} = [u_1, \dots, u_K] \quad , \quad U_{\text{gürültü}} = [u_{K+1}, \dots, u_M] \quad (2.52)$$

MUSIC, Schmidt tarafından geliştirilen bir alt uzay tabanlı bir algoritmadır (Schmidt 1981). Pisarenko, bozulmuş işaretin frekanslarının, otokorelasyon matrisinin minimum özdeğerine karşılık gelen özvektörden elde edilebileceğini bulmuştur. Aynı zamanda, kovaryans matrisinin öz değerlerine karşılık gelen özvektörlerin z dönüşümünden elde edilen sıfırlar, birim daireye dayanmaktadır. Ayrıca, sıfır konumlarına göre elde edilen açılar, sinüzoidallerin frekansı ile ilişkilidir (Pisarenko 1973). MUSIC algoritmasında, ortalama değer, Pisarenko kestiricisinin performansının iyileştirilmesi için önerilmiştir. Özvektörler iki gruba ayrılabilir. İşaret alt uzayı, maksimum değerli özvektörler

tarafından ve gürültü alt alanı, gürültü gücünü temsil eden minimum değerli özvektörler tarafından yayılmaktadır (Leonowicz 2006). İşaret ve gürültü özdeğerleri Eş. (2.53)'te sıralanmıştır.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_K \quad \geq \quad \lambda_{K+1} \geq \dots \geq \lambda_M \quad (2.53)$$

Sadece bir gürültü özvektörü kullanmak yerine, MUSIC algoritması çok fazla gürültü öz filtresi kullanmaktadır. Öz-filtre formu ile z-düzlemindeki özvektör matrisi Eş. (2.54)'te verilmiştir. Her bir öz filtrenin kök sayısı $M-1$ 'dir ve öz-filtrelerin kökleri frekansı temsil etmektedir.

$$U_i(z) = \sum_{m=0}^{M-1} u_i[m] z^{-m}, i = K + 1, \dots, M \quad (2.54)$$

$z = e^{j\omega}$ olarak verilmiştir. Ayrıca, MUSIC'e dayalı ω_0 frekans değerleri için sözde-spektrumlu ifade de üretilebilmektedir (Leonowicz 2006).

$$\hat{P}(e^{j\omega_0}) = \frac{1}{\sum_{k=K+1}^M |e(\omega_0)^H(u)_k|^2} \quad (2.55)$$

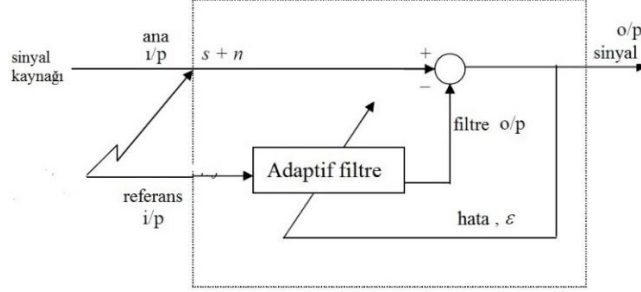
Eş. (2.55) kullanılarak temel frekans kestirimi elde edilmektedir (Uzunoğlu 2012).

$$\hat{\omega}_0 = \operatorname{argmax} P(\omega_0), \quad \omega_0 \in \Omega_0 \quad (2.56)$$

Adaptif Filtreleme Algoritmaları

DA'dan, AA'ya dönüştürücünün çıkışı durağan olmadığından sinüzoidal dalga formu üretmek çok önemlidir. Bu yüzden, üçüncü ve daha yüksek dereceli harmonikleri sistemden kaldırarak harmonik etkisini azaltan filtreler uygulanmaktadır. Bu filtreler çok sayıda bobin ve kondansatörden oluştuğundan daha yüksek dereceli harmonikleri bastırmak için daha pahalı filtrelerin kullanımına sebep olmaktadır (Batarseh 2004; Girgis 2007). Bu gibi pahalı ve karmaşık filtrelerin maliyetini azaltmak için adaptif filtre algoritmaları uygulanmaktadır. Adaptif filtreleme, maliyet fonksiyonunun uygun değer çözümünü elde etmek için ağırlıklarını yinelemeli olarak değiştirebilen doğrusal bir filtredir. Adaptif filtre yapısı Şekil 2.2'de görülmektedir. Maliyet fonksiyonunun

tanımına, bilinen ve bilinmeyen sistem parametrelerine dayanarak, optimizasyon hedefine ulaşmanın birçok yolu vardır (Sayed 2008; Haykin 2001).



Şekil 2.2. Gürültü engelleyici olarak kullanılan adaptif filtre şeması

Gürültünün engellemesi için adaptif filtreleme yaygın olarak kullanılmaktadır. En küçük ortalama kare (EKK) ve normalleştirilmiş en düşük ortalama kare (NEKK), harmonikleri azaltmak için başarıyla kullanılan en yaygın algoritmalarındandır. Sonraki bölümlerde bu algoritmalar ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

En Küçük Ortalama Kare

EKK, ayırt edici özellikleri nedeniyle harmonikleri azaltmak için kullanılan en yaygın algoritmadır. Bu algoritmada, maliyet fonksiyonu, tahmini çıktıyla gerçek çıktı arasındaki ortalama kare hatası olarak tanımlanmaktadır (Sayed 2008). Adaptif filtreleme sistemi, Eş (2.57) ile tanımlanmaktadır.

$$\vec{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-M+1)] \quad (2.57)$$

Burada $\vec{x}(n)$, $M \times M$ boyutundaki giriş matrisi, M filtre boyutu ve n mevcut giriş örneklerinin sayısıdır. Adaptif filtrenin çıkışı $\vec{y}(n)$, Eş.(2.58)'de gösterilmektedir.

$$\vec{y}(n) = [y(n) \ y(n-1) \ \dots \ y(n-M+1)]^T = \vec{x}(n)\vec{w}(n)^T \quad (2.58)$$

Burada T matrisin devriğine karşılık gelmektedir ve $\vec{w}(n)$, Eş. (2.59)'da tanımlanan ağırlık vektörüdür.

$$\vec{w}(n) = [w(0) \ w(1) \ \dots \ w(M-1)]^T \quad (2.59)$$

Maliyet fonksiyonu $C(n)$, Eş. (2.62)'de tanımlanan, hata işareti $\vec{e}(n)$ 'nin karesinin beklenen değeri olarak tanımlanmaktadır. Hata işareti $\vec{e}(n)$, istenen çıkış $\vec{d}(n)$ ile gerçek çıkış $\vec{y}(n)$ arasındaki farktır. Eş. (2.60) ve Eş. (2.61)'de $\vec{e}(n)$ ve $\vec{d}(n)$ matrislerinin içeriği verilmektedir.

$$\vec{e}(n) = [e(n) \ e(n-1) \ \dots \ e(n-M+1)]^T \quad (2.60)$$

$$\vec{d}(n) = [d(n) \ d(n-1) \ \dots \ d(n-M+1)]^T \quad (2.61)$$

$$C(n) = E[|\vec{e}(n)|^2] \quad (2.62)$$

Eş. (2.62)'ye EKK uygulamak ayrı filtre ağırlıklarına göre kısmi türevleri almak anlamına gelmektedir. Eş. (2.63), Eş. (2.64) ve Eş. (2.65) ile kısmi türev açıklanmaktadır.

$$\nabla_w C(n) = \nabla_w E[|\vec{e}(n)|^2] = 2 \vec{e}(n) \frac{\partial \vec{e}(n)}{\partial w} \quad (2.63)$$

$$\vec{e}(n) = \vec{d}(n) - \vec{x}(n)w^T(n) \quad (2.64)$$

$$\frac{\partial \vec{e}(n)}{\partial w} = -\vec{x}(n) \quad (2.65)$$

Maliyet fonksiyonunu en az seviyede tutmak için, $\nabla_w C(n)$ zıt yönlü bir işlem gerçekleşmektedir. Eş.(2.66), Eş. (2.67) ve Eş. (2.68) ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) - \frac{\mu}{2} \nabla_w C(n) \quad (2.66)$$

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) - \frac{\mu}{2} 2 \vec{e}(n) [-\vec{x}(n)] \quad (2.67)$$

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + \mu \vec{e}(n) \vec{x}(n) \quad (2.68)$$

Eş. (2.68)'de yer alan $\vec{x}(n)$ $M \times M$ boyutundaki giriş matrisi, $\vec{e}(n)$ hata işareti, $\vec{w}(n)$, ağırlık vektörü ve μ adım büyüklüğüdür. Eş. (2.68), mevcut ağırlık vektörü ile bir sonraki adım arasındaki ilişki olan ağırlık güncellemesidir.

Normalleştirilmiş En Küçük Ortalama Kare

Filtrenin uzunluğu ve işaretin gücü, EKK algoritmasının kararlılık, yakınsama ve sabit durum davranışını etkilemektedir. Bu sorunu çözmek için, EKK'nın bir çeşidi olan NEKK yaygın olarak kullanılmaktadır. Giriş işaretinin gücünü normalleştirerek sorununu çözüme ulaştırmaktadır. NEKK algoritmasında, önceki bölümde belirtilen tüm denklemler, ağırlık güncellemesi haricinde aynı kalmaktadır. Ağırlık güncellemesi Eş. (2.69)'da görülmektedir (Sayed 2008).

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + \frac{\mu}{\varepsilon + \|\vec{x}(n)\|^2} \vec{e}(n)\vec{x}(n) \quad (2.69)$$

Burada $\|\vec{x}(n)\|^2 = \vec{x}^H(n)\vec{x}(n)$ normalleştirme faktörüdür. H, devriğinin karmaşık eşleniğini belirtir ve ε normalizasyon büyüklüğüdür.

Sızdıran En Küçük Ortalama Kare

Adım büyüklüğünün öğrenme oranına uygun olarak seçilememesi, EKK algoritmasının kararlılığa yaklaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu problemin çözümü için, EKK algoritmasının sızdıran faktörü parametresini kullanılan EKK'nın bir çeşidi sunulmuştur. Bu algoritma aynı zamanda EKK'nın yavaş yakınsamasını engellemek için de tasarlanmıştır (Sayed 2008). Sızdıran EKK'de giriş, çıkış ve hata işaretleri EKK'deki ile aynı kalmaktadır. Değişen ağırlık güncelleme denklemi Eş. (2.70)'de verilmiştir.

$$\vec{w}(n+1) = (1 - \mu * \eta)\vec{w}(n) + \mu \vec{e}(n)\vec{x}(n) \quad (2.70)$$

Burada η çok küçük pozitif bir sayı olan sızdıran faktörüdür ($\eta \ll 1$).

Harmonik Kestiriminde Güç Sistemi İşaretinin Ayrıklaştırılması

Dalga biçiminin (güç sisteminin akım veya gerilim dalga biçimi), bilinmeyen büyüklük ve fazların eklenmesi olan bir harmonik olarak temel açısız frekanstan oluşmaktadır. Dalga biçiminin genel formu Eş. (2.71)'de gösterilmektedir.

$$y(t) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(\omega_m t + \phi_m) + A_{da} \exp(-\alpha_{da} t) + \varepsilon(t) \quad (2.71)$$

Burada M harmoniklerin sayısı, $\omega_m = m2\pi f_0$, f_0 temel frekans, $\varepsilon(t)$ sistemin ölçüm gürültüsü ve $A_{da} \exp(-\alpha_{da} t)$ olası DA bozulmadır. Eş.(2.71)'de verilen genel dalga formu, T örnekleme periyodu kullanılarak Eş. (2.72)'de belirtilen biçimde ayrık zamanlı ifadesi elde edilmektedir.

$$y(n) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(\omega_m nT + \phi_m) + A_{da} \exp(-\alpha_{da} nT) + \varepsilon(n) \quad (2.72)$$

α_{da} ifadesi için Taylor serisini kullanılarak $A_{da} \exp(-\alpha_{da} nT)$ DA bozulma Eş. (2.73)'te ifade edilmektedir.

$$y_{da} = A_{da} - A_{da} \alpha_{da} nT \quad (2.73)$$

Eş. (2.73) ifadesi, Eş. (2.72)'de yerine yazılarak Eş. (2.74) elde edilmektedir.

$$y(n) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(\omega_m nT + \phi_m) + A_{da} - A_{da} \alpha_{da} nT + \varepsilon(n) \quad (2.74)$$

Eş. (2.74) yeniden düzenlenerek Eş. (2.75) ile genlik ve faz bilgisini kestirilmektedir.

$$y(n) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(\omega_m nT) \cos(\phi_m) + A_m \cos(\omega_m nT) \sin(\phi_m) + \dots \\ + A_{da} - A_{da} \alpha_{da} nT + \varepsilon(n) \quad (2.75)$$

Ayrıca, Eş. (2.75) parametrik biçimde şu şekilde yazılabilmektedir;

$$y(n) = H(n) \vec{w}(n) + \varepsilon(n)$$

$$H(n) = [\sin(\omega_1 nT) \cos(\omega_1 nT) \dots \sin(\omega_m nT) \cos(\omega_m nT) 1 - nT] \quad (2.76)$$

Burada $H(n)$ sistemin giriş vektörünü, X ise sistemin bilinmeyen parametrelerini temsil etmektedir.

$$X(n) = [X_1(n) \ X_2(n) \ \dots \ X_{2M-1}(n) \ X_{2M}(n) \ X_{2M+1}(n) \ X_{2M+2}(n)]^T \quad (2.77)$$

$$X = [A_1 \cos(\phi_1) \ A_1 \sin(\phi_1) \ \dots \ A_m \cos(\phi_m) \ A_m \sin(\phi_m) \ A_{da} \ A_{da} \alpha_{da}]^T \quad (2.78)$$

Güç Sistemi İşaretinde En Küçük Ortalama Kare Hesabı

En küçük ortalama kare algoritması kullanılarak durum kestirimi yapılmaktadır. Bu algoritmada, Eş. (2.81) kullanılarak her bir örnekleme anında X_n bilmeyen parametresi değiştirilerek hata karesi tekrar tekrar minimuma indirilmektedir.

$$X_n = X_{n-1} + \mu_n e_n \hat{y}_n \quad (2.79)$$

$$e_n = y_n - \hat{y}_n \quad (2.80)$$

Burada e_n ; hata işareti, μ_n adım boyutudur. Daha iyi yakınsama için, adım büyüklüğü gürültü varlığında güncellenmektedir.

$$\mu_{n+1} = \lambda \mu_n + \gamma R_n^2 \quad (2.81)$$

Burada R_n , e_n ve e_{n-1} 'in otokorelasyonudur ve Eş.(2.82)'de gösterilmektedir.

$$R_n = \rho R_{n-1} + (1 - \rho) e_n e_{n-1}, \quad 0 < \rho < 1; \quad 0 < \gamma < 1 \quad (2.82)$$

Burada ρ ve γ ; üstel ağırlık faktörüdür. Temel ve n . harmonik parametrelerin genlikleri ve fazları, EKK algoritması yardımı ile X_n vektörü güncelleyerek Eş. (2.83) elde edilmektedir (Alhafadhi 2016; Mengüç 2019).

$$A_m = \left(\sqrt{X_{2M}^2 + X_{2M-1}^2} \right) \quad (2.83a)$$

$$\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{X_{2M}}{X_{2M-1}} \right) \quad (2.83b)$$

Kalman Filtresi

Kalman filtresi (KF), ortalama karesel hatayı minimize ederek, sürece ait durumları özyinelemeli bir algoritmayla etkili bir şekilde kestiren matematiksel denklemler bütünüdür. Kalman filtresi geçmiş, şimdiki ve gelecek durumlara ait kestirimleri desteklemektedir. Modellenmek istenen sistemin doğası tam olarak bilinemese dahi oldukça başarılı olabilmektedir (Welch ve Bishop 2006). Kalman filtresinin amacı ayrık zamanda kontrol edilen sürece ait $x \in R^n$ durum değişkeninin kestirimi ve $z \in R^m$ ölçümdür. Durum değişkeni Eş. (2.85)'te ve doğrusal skolasitik fark denklemi Eş. (2.86)'da belirtilmiştir.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (2.85)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2.86)$$

Burada w_k rastgele değişkeni süreç gürültüsünü temsil etmekte olup, v_k rastgele değişkeni ise her biri diğerinden bağımsız, beyaz ve normal olasılık dağılımına sahip olduğu varsayılan ölçüm gürültüsünü temsil etmektedir. Süreç gürültüsüne ait kovaryans Q ile ve ölçüm gürültüsüne ait kovaryans ise R ile temsil edilmektedir.

Eş. (2.85)'de verilen $n \times n$ boyutlu A matrisinin amacı, duruma ait bir önceki $k - 1$ ayrık zaman basamağında verilen değer ile mevcut k basamağındaki durum arasındaki ilişkiyi; Eş. (2.86)'de verilen $n \times l$ boyutlu B matrisinin amacı ise isteğe bağlı kontrol girdisi $u \in R^l$ ile x durumu arasındaki ilişkiyi; Eş. (2.86)'de verilen $m \times n$ boyutlu H matrisi ise durum değişkeni ile z_k ölçümü arasındaki ilişkiyi oluşturmaktadır. Başlangıçta k basamağındaki öncül durum kestirimi $\hat{x}_k^- \in R^n$ ve k basamağındaki sonraki durum kestirimi $\hat{x}_k \in R^n$ verilen z_k ölçümüyle beraber tanımlanmıştır. Öncül durum kestirimi ve sonsal (sonraki) durum kestirimi hataları;

$$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^- \rightarrow e_k = x_k - \hat{x}_k \quad (2.87)$$

şeklinde ifade edilir. O halde $P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}]$ öncül kestirim hatası kovaryansı ve $P_k = [e_k e_k^T]$ ise sonsal kestirim hatası kovaryansı olarak ifade edilmektedir. Her bir

özyinelemede durum değişkenine ait kestirim yeni z_k ölçüm değerleriyle güncellenmektedir.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (2.88)$$

Eş. (2.88)'de görülen $H\hat{x}_k^-$ öngörülen ölçüm olup z_k ise gerçek ölçüm değeridir. $(z_k - H\hat{x}_k^-)$ farkı artık olarak adlandırılmakta, öngörülen ve gerçek ölçüm değerleri arasındaki tutarsızlığı göstermektedir. Bu denklemdeki $n \times m$ boyutlu K matrisi kazanç, sonsal hata kovaryansı P_k 'yi minimize etmektedir. P_k 'yi minimize eden K matrisi Eş. (2.89)'da tanımlanmaktadır.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (2.89)$$

Bu yeni parametreleri kullanarak Kalman filtresi aşağıda açıklandığı üzere çalıştırılmaktadır. Kalman filtresi, süreç üzerinde bir geri beslemeli kontrol yapısı kullanarak kestirim yapmaktadır. Kalman filtresi denklemleri iki gruba ayrılmaktadır. İlk grup *zaman güncelleme* denklemlerinden oluşurken ikinci grup *ölçüm güncelleme* denklemlerinden oluşmaktadır. Kalman filtresine ait zaman güncelleme denklemleri Eş. (2.90)'da verildiği gibidir (Köse ve diğerleri 2010).

$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} + B u_{k-1} \quad (2.91a)$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \quad (2.91b)$$

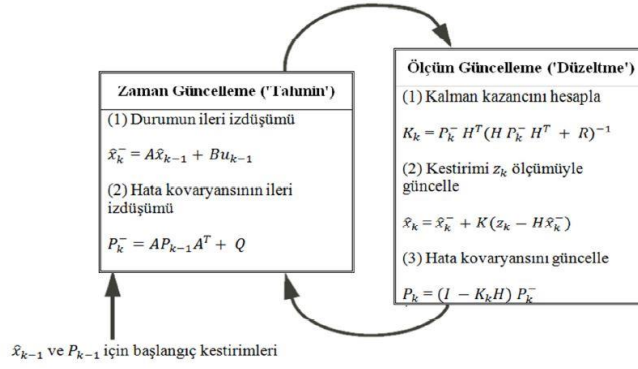
Kalman süzgecine ait zaman ölçüm denklemleri Eş. (2.92)'de verildiği gibidir.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (2.92a)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (2.92b)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (2.92c)$$

Kalman filtresinin çalışma şekli Şekil 2.3 ile özetlenmiştir.



Şekil 2.3. Kalman filtresi algoritmasının işleyişi (Welch ve Bishop 2006)

KF'nin girişi gerilim dalga formuna ait zarf işareti $A(t)$ olup temel frekans etrafındaki harmonik frekans bilgisini içermektedir. $A(t)$ işaretinin matematiksel gösterimi Eş. (2.93) ile verilmiştir. $A(t)$ işareti Kalman filtresi içerisindeki ölçümlere (Eş. (2.86)'deki z_k) denk gelmektedir.

$$A(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (2.93)$$

KF tarafından elde edilen $A(t)$ işaretinin spektral bileşenleri doğrudan f_i frekanslarındaki spektral genliklerini vermektedir. Sinüzoidal gerilim işaretinden her birisi için eş-evreli ve dördün-evreli bileşen olmak üzere iki adet bileşen söz konusu olup bu iki bileşen Kalman filtresinde iki adet durum değişkeniyle ifade edilmekte ve a_i ilgili frekans bileşenine ait genlik olmak üzere gerilim işareti Eş. (2.94)'te olduğu gibi elde edilmektedir (Chen 2014).

$$a_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i) = a_i \cos(\phi_i) \cos(2\pi f_i t) - a_i \sin(\phi_i) \sin(2\pi f_i t) \quad (2.94)$$

Burada x_1 , eş-evreli sinüzoidal gerilim bileşeni ($a_i \cos(\phi_i)$); x_2 , dördün-evreli sinüzoidal gerilim bileşenidir ($a_i \sin(\phi_i)$, $i = 1, 3, 5, \dots, k$). Kalman filtresinde durum vektörü \bar{x}_k ise Eş. (2.95) ile tanımlanmıştır.

$$\bar{x}_k = [x_{1,1} \ x_{2,1} \ x_{1,2} \ x_{2,2} \ \dots \ x_{1,k} \ x_{2,k}]_k^T \quad (2.95)$$

Eş. (2.95)'te T üst indisi parantez içerisindeki vektörün devriğinin alınacağını göstermekte ve $f_i=50,150,250,\dots,k$ Hz olmak üzere, $x_{1,i} = f_i$ frekansındaki eş-evreli sinüzoidal gerilim bileşeni, $x_{2,i} = f_i$ frekansındaki dördün-evreli sinüzoidal gerilim bileşenidir. KF modeline ait durum geçiş matrisi ise Eş. (2.96) ile verilmiştir. KF'ye ait ölçüm denklemi Eş. (2.97)'de verilmiştir.

$$\bar{x}_k = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \bar{x}_k + \bar{w}_k \quad (2.96)$$

$$z_k = \beta \bar{x}_k + v_k \quad (2.97)$$

Eş. (2.97)'de β , ilgili ölçüm vektörü olup Eş. (2.98) ile açık hali verilmiştir.

$$\beta = [\cos(2\pi f_1 t) \quad -\sin(2\pi f_1 t) \quad \cos(2\pi f_3 t) \quad \sin(2\pi f_3 t) \quad \dots \\ \cos(2\pi f_i t) \quad -\sin(2\pi f_i t)] \quad (2.98)$$

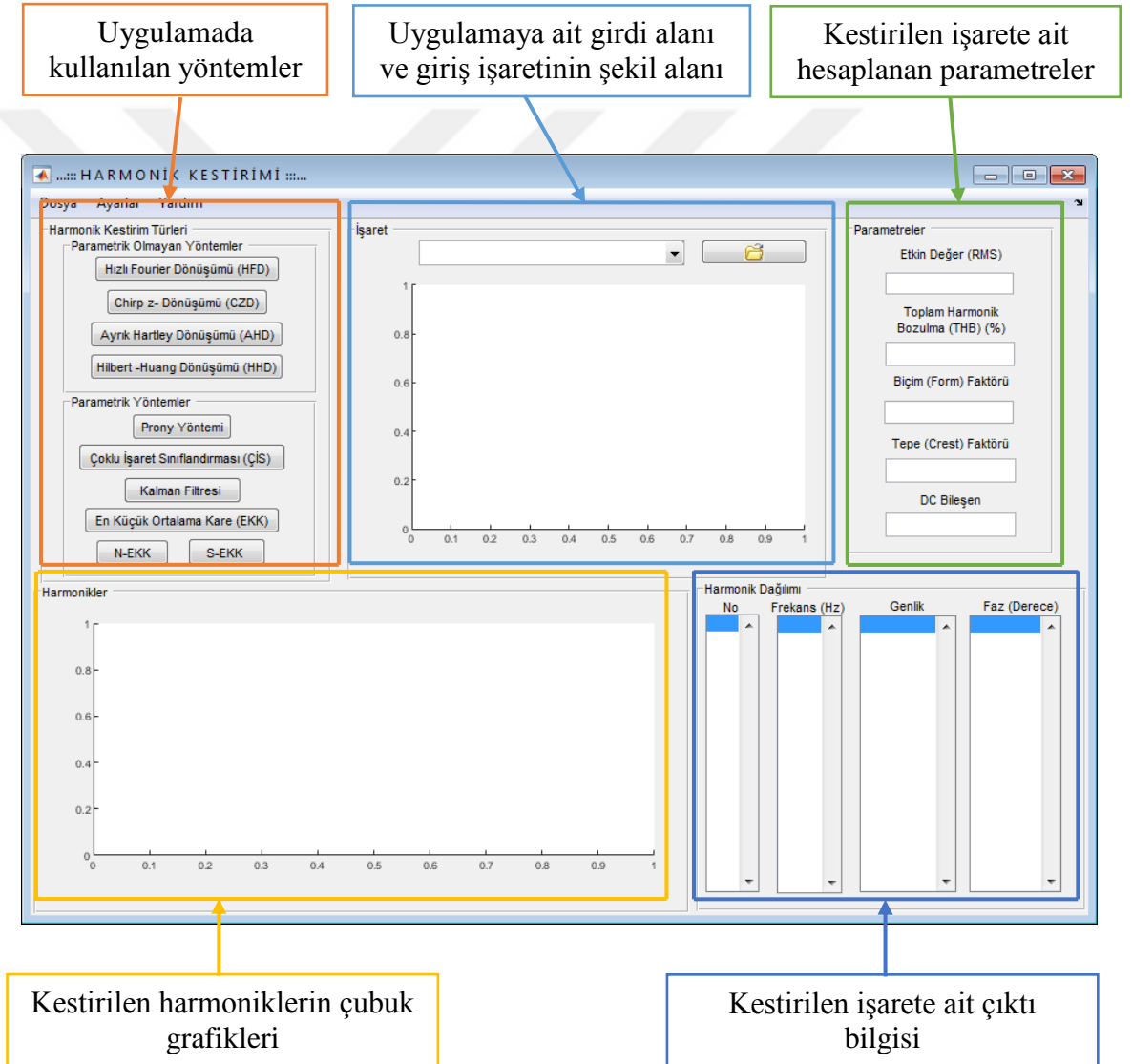
Eş. (2.96)'da verilen \bar{w}_k , süreç gürültü vektörü; v_k ise ölçüm gürültü vektörü olarak adlandırılmaktadır. f_i frekansındaki spektral genlik, $x_{1,i}$ ve $x_{2,i}$ durum değişkenleri kullanılarak elde edilmekte olup her bir değer için hesaplanmaktadır. f_i frekansında ilgili bölgeye denk gelen spektral genlik ve açısı Eş. (2.99)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Chen 2014).

$$a_i = \sqrt{\hat{x}_{1,i}^2 + \hat{x}_{2,i}^2} \quad (2.99a)$$

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{\hat{x}_{2,i}}{\hat{x}_{1,i}}\right) \quad (2.99b)$$

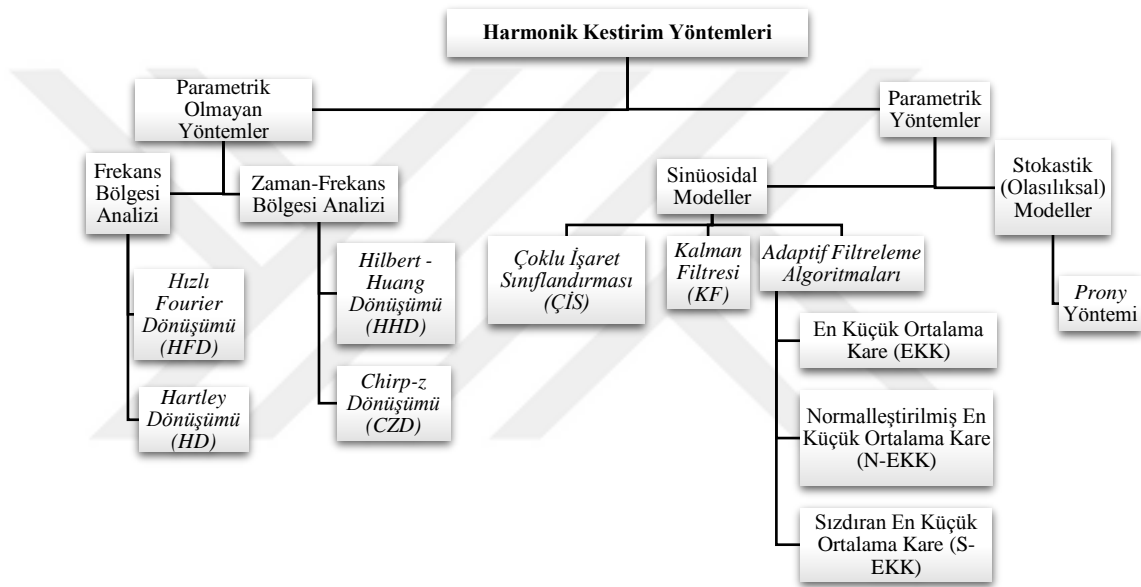
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada MATLAB (R2017a) kullanılarak tasarlanan etkileşimli grafiksel ara yüz programında (GUI); örnek benzetim işaretleri seçilerek veya işaret değerleri çevre birimlerden programa yüklenerek harmonik analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Analiz sonucunda harmoniklerin frekansları, genlikleri ve faz açıları listelenmekte, frekans bileşenleri hem sayısal hem de grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekil 3.1’de programın ekran görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.1: Harmonik kestirimi uygulamasının ekran görüntüsü

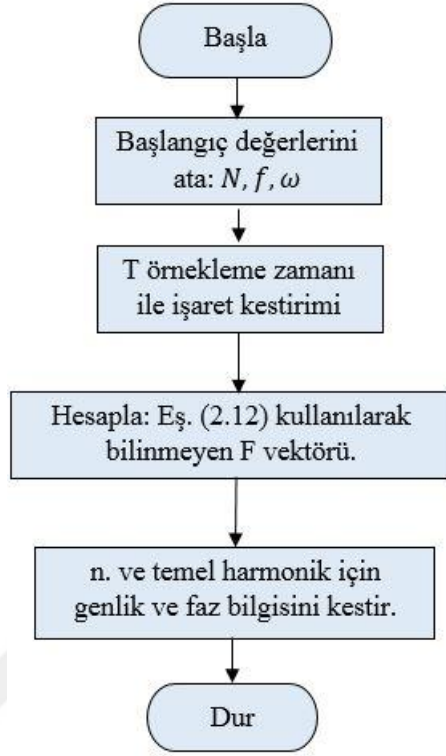
Bölüm 2’te açıklanan yöntemlere ait algoritma seçim bilgisi, harmonik kestirim türleri panelinde; örnek işaretlerin giriş bilgisi olarak gösterildiği bilgi işaret panelinde, çıkış işlemlerine ait gerekli bilgiler harmonikler, harmonik dağılımı ve parametreler panelinde yer almaktadır. Harmonik kestirim türleri panelinde yer alan yöntemler, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir. Bu yöntemler, kuramsal temeller bölümünde yer alan yöntemlere ait eşitlikler göz önüne alınarak yöntemlerin akış diyagramları ve işleyişleri oluşturulmuştur.



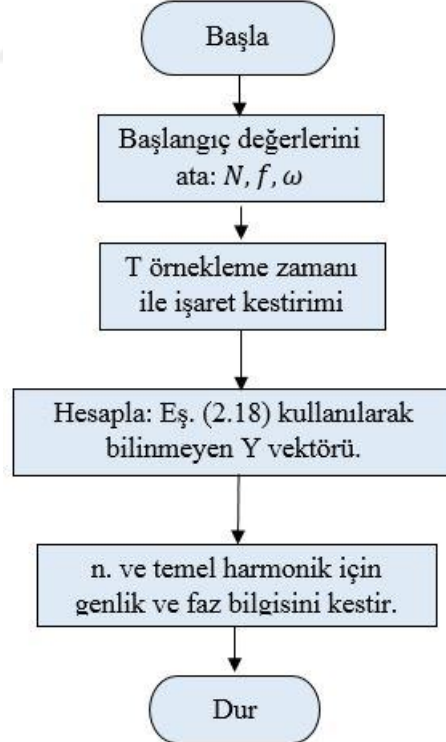
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan yöntemlerin sınıflandırılması (Jain ve Singh 2011)

Hızlı Fourier dönüşümü algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.3’te görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.12), kuramsal temeller bölümünde yer alan Fourier dönüşümü başlığında yer almaktadır. Chirp z-dönüşümü algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.4’te görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.18), kuramsal temeller bölümünde yer alan Chirp z-dönüşümü başlığında yer almaktadır.

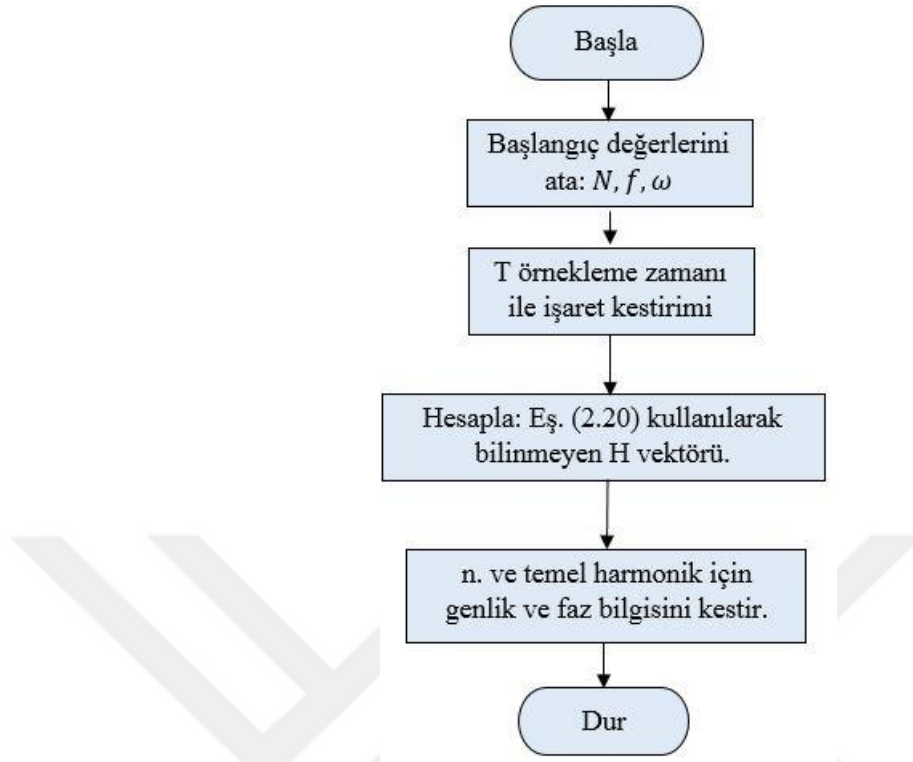
Ayrık Hartley dönüşümü algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.5’te görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.20), kuramsal temeller bölümünde yer alan Hartley dönüşümü başlığında yer almaktadır.



Şekil 3.3. Hızlı Fourier dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı



Şekil 3.4. Chirp z - dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı

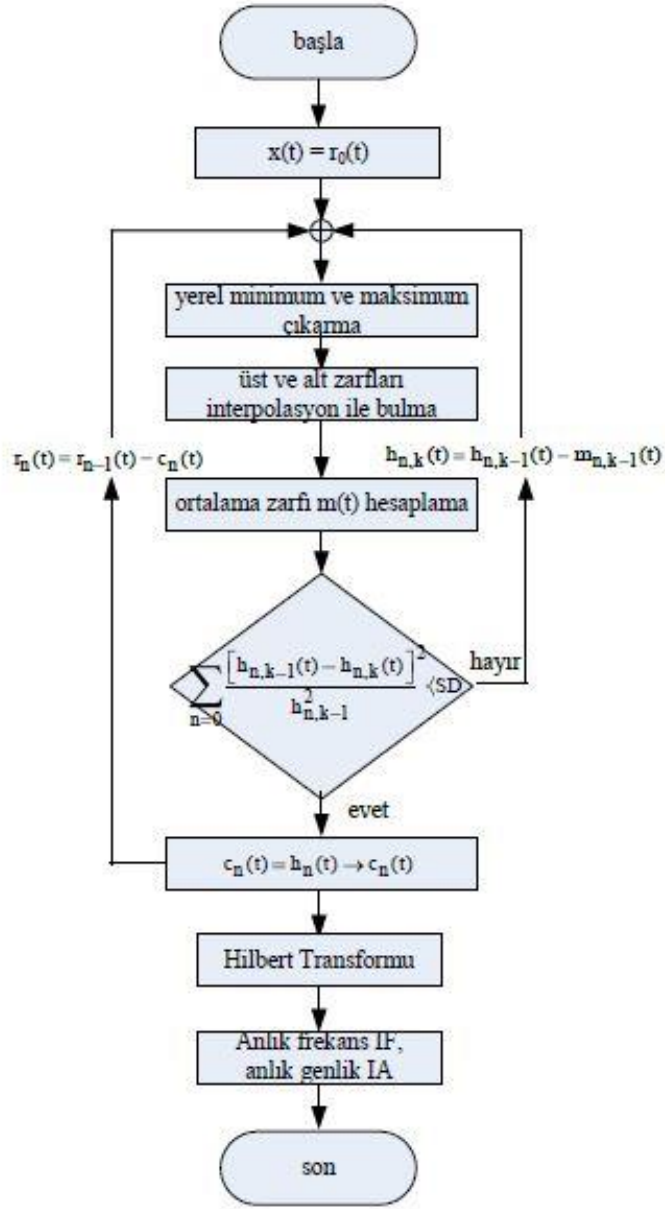


Şekil 3.5. Ayrık Hartley dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı

Hilbert-Huang dönüşümü algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.6'da görülmektedir. Hesaplama kullanılan eşitlikler, kuramsal temeller bölümünde yer alan Hilbert-Huang dönüşümü başlığında yer almaktadır.

Prony yöntemi algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.7'de görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.30) – (2.36), kuramsal temeller bölümünde yer alan Prony yöntemi başlığında yer almaktadır.

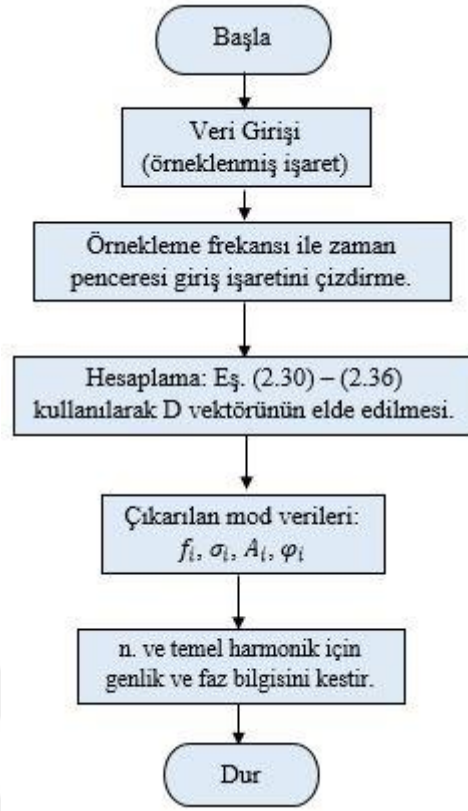
Çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.8'de görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.43) – (2.55), kuramsal temeller bölümünde yer alan ÇİS yöntemi başlığında yer almaktadır.



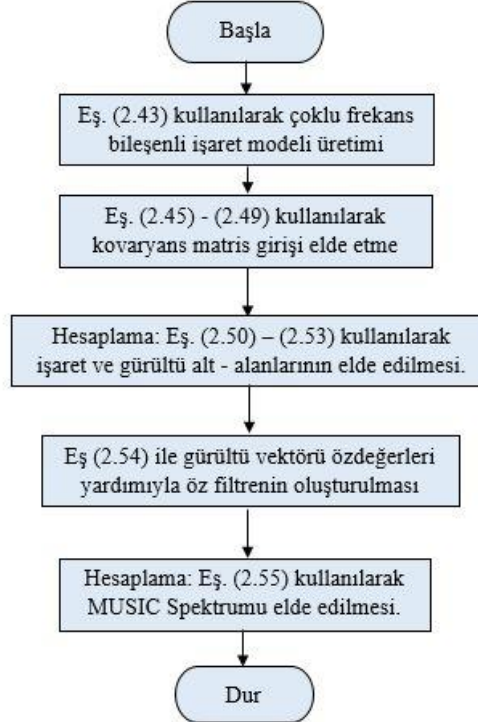
Şekil 3.6. Hilbert – Huang dönüşümü algoritmasına ait akış diyagramı (Önal 2011)

En Küçük Ortalama Kare algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.9’da görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.68), kuramsal temeller bölümünde yer alan En Küçük Ortalama Kare yöntemi başlığında yer almaktadır.

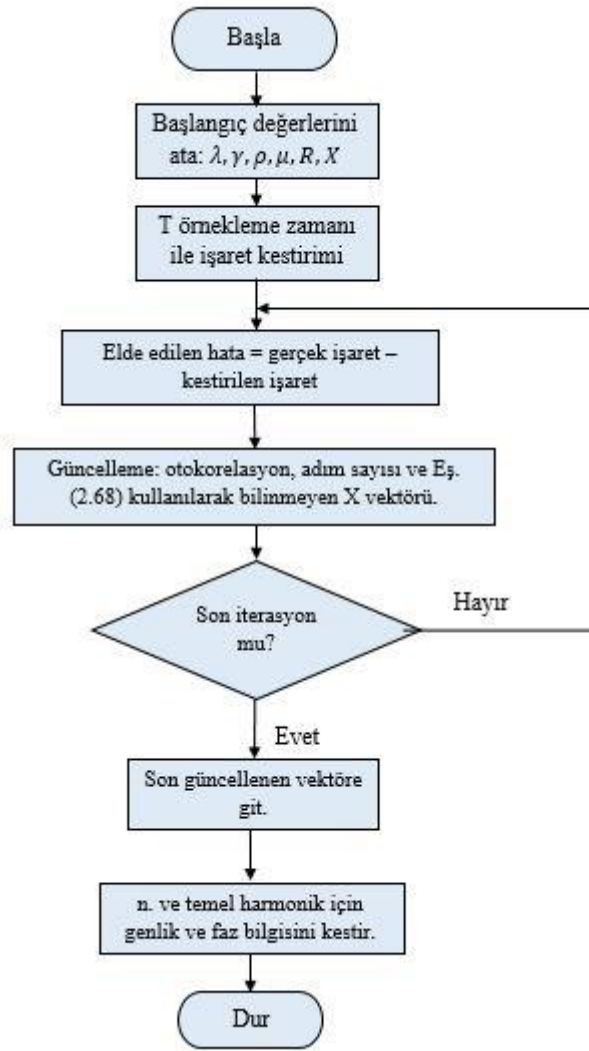
Normalleştirilmiş en küçük ortalama kare yöntemi algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.10’da görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.69), kuramsal temeller bölümünde yer alan normalleştirilmiş en küçük ortalama kare yöntemi başlığında yer almaktadır.



Şekil 3.7. Prony yöntemi algoritmasına ait akış diyagramı



Şekil 3.8. Çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) algoritmasına ait akış diyagramı



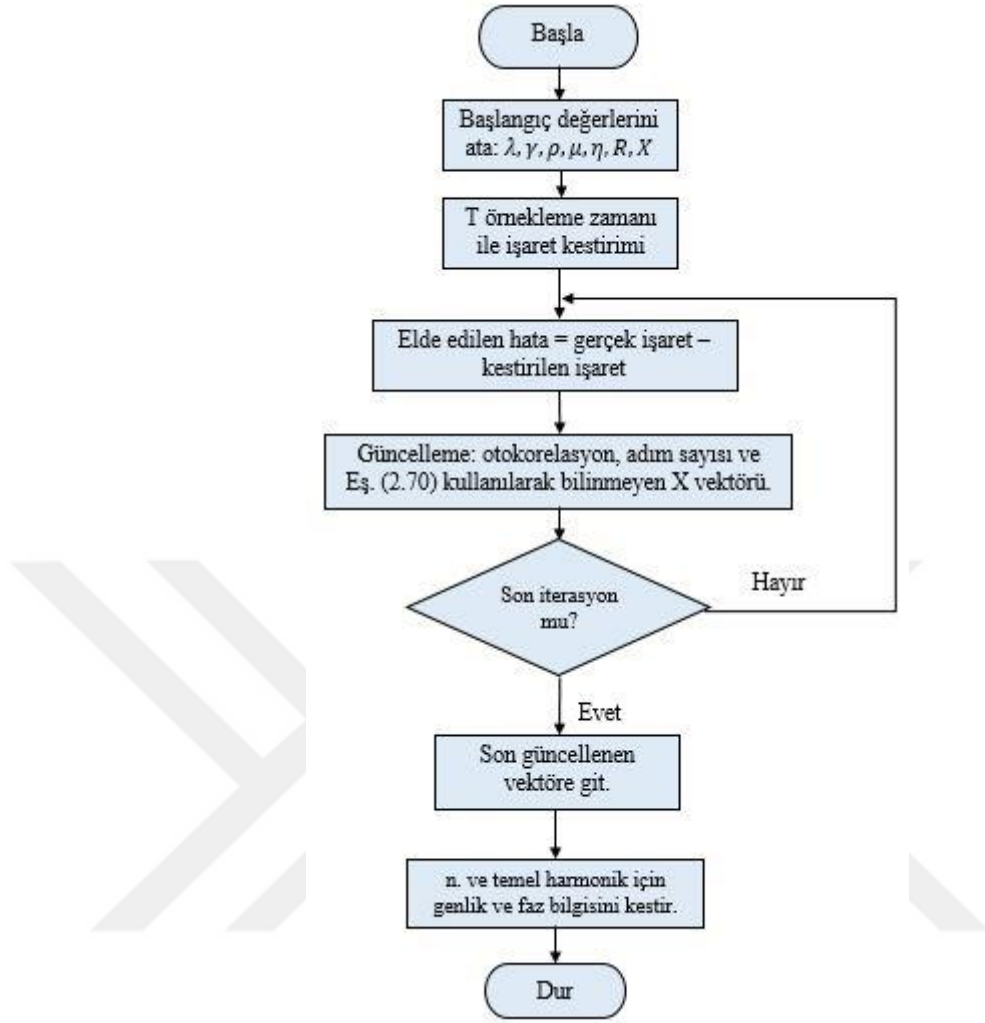
Şekil 3.9. En küçük ortalama kare algoritmasına ait akış diyagramı

Sızdıran en küçük ortalama kare algoritmasına dair akış diyagramı Şekil 3.11’de görülmektedir. Hesaplama kullanılan Eş. (2.70), kuramsal temeller bölümünde yer alan sızdıran en küçük ortalama kare yöntemi başlığında yer almaktadır.

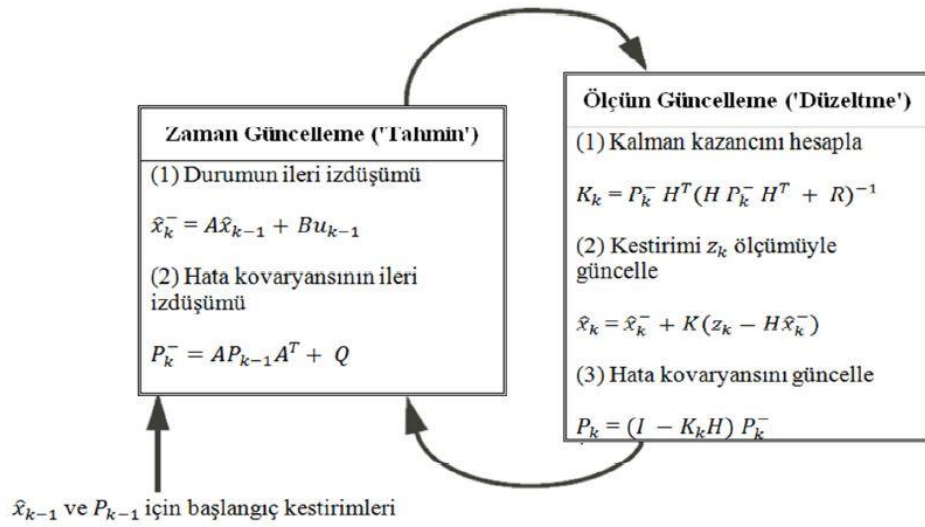
Kalman filtresi algoritmasının işleyişi Şekil 3.12’de görülmektedir. Hesaplama kullanılan kestirim ve güncelleme tanımlarına ilişkin detaylar, kuramsal temeller bölümünde yer alan Kalman filtresi başlığında yer almaktadır.



Şekil 3.10. Normalleştirilmiş en küçük ortalama kare algoritmasına ait akış diyagramı



Şekil 3.11. Sızdıran en küçük ortalama kare algoritmasına ait akış diyagramı



Şekil 3.12. Kalman filtresi algoritmasının işleyişi (Welch ve Bishop 2006)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, kuramsal temeller adlı bölümde yer alan yöntemlere ait harmonik kestirimi uygulaması ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları ve sunulan yöntemlerin karşılaştırmaları yer almaktadır. Parametrik olan ve parametrik olmayan yöntemlerin karşılaştırılması alt başlığında, çalışma kapsamında sunulan yöntemlerin kestirim hataları genlik, faz ve frekans kestirim karşılaştırmaları yer almaktadır. Ayrıca güç kalitesi bozulmalarında yer alan parametreler sunulan yöntemlere uygulanmış olup hata oranları verilmiştir. Yöntemlerin ve parametrelerin hata oranları grafikler ile görselleştirilmiştir. Son olarak yöntemlerin giriş işaretindeki gerilim, faz ve frekans bileşenlerini kestirme yetenekleri karşılaştırılmıştır.

Hata; mutlak hata, bağıl hata ve yüzde hata olarak hesaplanmaktadır (Yılmaz 2005). Eş. (4.1)'de yer alan mutlak hata, gerçek değer (A) ile hesaplama sonucu bulunan yaklaşık değer (a) arasındaki farktır. Eş. (4.2)'de yer alan bağıl hata, mutlak hatanın gerçek değere oranı bağıl hatayı vermektedir. Eş. (4.3)'te yer alan yüzde hata, bağıl hatanın 100 ile çarpımı yüzde hatayı vermektedir. Benzetim çalışmalarının sonuçları yüzde bağıl hata olarak sunulmuştur.

$$\Delta a = |A - a| \quad (4.1)$$

$$\delta a = \left| \frac{A - a}{A} \right| \quad (4.2)$$

$$\% \delta a = 100 \times \delta a \quad (4.3)$$

4.1. Hızlı Fourier Dönüşümü Uygulaması

HFD yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.4) ve Eş. (4.5)'de yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıç durumunda kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\}$$
 (4.4)

Uygulama-1 için Eş. (4.4)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz, $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 ile verilmiştir.

Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD), biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %26,4358 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{10 + 110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\}$$
 (4.5)

Uygulama-2 için Eş. (4.5)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz, $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 ile verilmiştir.

Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD), biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %49,8980 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait DA, genlik ve faz bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Yöntem, içerik olarak basit ve hızlıdır. Çok hızlı işlem yaptığından zaman bilgisi kaybolmaktadır, dolayısıyla geçici bilgileri algılayamamaktadır.

Çizelge 4.1. Uygulama-1 için HFD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenlerine ait kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0	50	150	250	350	450
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,000	220,000	50,000	20,000	10,000	5,000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	5,000	220,000	50,000	20,000	10,000	5,000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000
Gerçek Faz [P(°)]	-	30,000	60,000	80,000	-45,000	-36,000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	30,000	60,000	80,000	-45,000	-36,000
Bağlı Hata Oranı (%)	-	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000

Çizelge 4.2. Uygulama-1 için HFD yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,3080	1,3720
Kestirilen Değerler	226,7708	25,0000	1,3080	1,7347
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	26,4358

Çizelge 4.3. Uygulama-2 için HFD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0	60	180	420	900
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,000	22,0000	11,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Gerçek Faz [P(°)]	-	-45,0000	75,0000	30,0000	-15,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	-45,0000	75,0000	30,0000	-15,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Çizelge 4.4. Uygulama-2 için HFD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,9854
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	49,8980

4.2. Chirp Z-Dönüşümü Uygulaması

CZD yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.6) ve Eş. (4.7)'te giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulama örneklerine ait başlangıç durumunda kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\}$$
 (4.6)

Uygulama-1 için Eş. (4.6)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz, $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 ile verilmiştir. Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağlı hata oranı %0,05265, toplam harmonik bozulmada (THD) bağlı hata oranı %0,1084, biçim faktöründe (BF) bağlı hata oranı sıfır ve tepe faktöründe (TF) bağlı hata oranı %26,3702 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{10 + 110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\}$$
 (4.7)

Uygulama-2 için Eş. (4.7)'de yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz, $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 ile verilmiştir.

Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.8'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağıl hata oranı %0,05295, toplam harmonik bozulmada (THD) bağıl hata oranı %0,1018, biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır ve tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %30,5926 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait DA, genlik ve faz bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Uygulamada kullanılan örnekleme işaret sayısı arttıkça doğruluk artarken program için işlem yükü de artmaktadır. Veri örnekleme ve örneklerin sayısında esneklik vardır. Daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Harici veri depolama gereksinimi duymaz.

Çizelge 4.5. Uygulama-1 için CZD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0	50	150	250	350	450
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,00000	20,00000	10,00000	5,000000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	5,0588	220,1018	50,05888	20,02075	10,08347	5,065574
Bağıl Hata Oranı (%)	1,1760	0,0462727	0,11776	0,10375	0,8347000	1,31148
Gerçek Faz [P(°)]	-	30,0000	60,00000	80,0000	-45,0000	-36,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	29,9847	59,8835	79,6687	-44,5277	-35,2230
Bağıl Hata Oranı (%)	-	0,05100	0,1941667	0,4141250	1,0495556	2,1583333

Çizelge 4.6. Uygulama-1 için CZD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,8902	25,0271	1,0308	1,7338
Bağıl Hata Oranı (%)	0,05265	0,1084	0,00000	26,3702

Çizelge 4.7. Uygulama-2 için CZD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0	60	180	420	900
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,00000	110,00000	33,00000	22,00000	11,00000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	10,03150	110,04460	33,01636	22,05458	11,06087
Bağlı Hata Oranı (%)	0,31500	0,0405455	0,0495758	0,2480909	0,5533636
Gerçek Faz [P(°)]	-	-45,00000	75,00000	30,00000	-15,00000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	-45,97680	74,89440	29,91820	-14,91550
Bağlı Hata Oranı (%)	-	2,1706667	0,14080	0,2726667	0,5633333

Çizelge 4.8. Uygulama-2 için CZD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,5101	37,4547	1,0678	1,7297
Bağlı Hata Oranı (%)	0,05295	0,1018	9,37E-03	30,5926

4.3. Hartley Dönüşümü Uygulaması

Hartley dönüşümü kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.8) ve Eş. (4.9)'de yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıç durumunda kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur. Ayrıca giriş işaretinin faz farkı içermesi yöntemin doğruluğunu azalttığından uygulamalarda faz farkı kullanılmamıştır.

$$\text{Uygulama-1: } v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t) + 50\cos(3\omega t) + 20\cos(5\omega t) + 10\cos(7\omega t) + 5\cos(9\omega t)\} \quad (4.8)$$

Uygulama-1 için Eş. (4.8)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz olan şebekede $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 ile verilmiştir.

Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %40,911 olarak bulunmuştur.

$$\text{Uygulama-2: } v(t) = \sqrt{2}\{10 + 110\cos(\omega t) + 33\cos(3\omega t) + 22\cos(7\omega t) + 11\cos(15\omega t)\} \quad (4.9)$$

Uygulama-2 için Eş. (4.9)'da yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz, $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12 ile verilmiştir. Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.12'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %69,097 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait DA ve genlik bileşenini hesaplayabilmektedir. İki aşamalı bir hesaplama gerekmektedir. Bu zorunluluk hesaplama hızına olumsuz etki etmekte ancak sonuçlar doğru olmaktadır. Uygulamada kullanılan örnekleme işaret sayısı arttıkça doğruluk artarken program için işlem yükü de artmaktadır.

Çizelge 4.9. Uygulama-1 için AHD yöntemi ile genlik ve DA bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0	50	150	250	350	450
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Bağıl Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.						

Çizelge 4.10. Uygulama-1 için AHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,9333
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	40,911

Çizelge 4.11. Uygulama-2 için AHD yöntemi ile genlik ve DA bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0	60	180	420	900
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.

Çizelge 4.12. Uygulama-2 için AHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	2,2397
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	69,097

4.4. Hilbert – Huang Dönüşümü Uygulaması

HHD yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.10) ve Eş. (4.11)'de yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıçta kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur. Ayrıca giriş işaretinin faz farkı içermesi yöntemin doğruluğunu azalttığından dolayı uygulamalarda faz farkı kullanılmamıştır.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t) + 50\cos(3\omega t) + 20\cos(5\omega t) + 10\cos(7\omega t) + 5\cos(9\omega t)\}$$
 (4.10)

Uygulama-1 için Eş. (4.10)'da yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz olan şebekede $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz ve 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 ile verilmiştir.

Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.14'te görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağlı hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağlı hata oranı %40,911 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{10 + 110\cos(\omega t) + 33\cos(3\omega t) + 22\cos(7\omega t) + 11\cos(15\omega t)\} \quad (4.11)$$

Uygulama-2 için Eş. (4.11)'de yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz; $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz ve 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16 ile verilmiştir.

Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.16'da görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağlı hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağlı hata oranı %69,097 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait genlik ve frekans bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Uygulama sonucu elde edilen veriyi işleyerek bir sonraki adıma geçmesi zaman açısından olumsuz olarak nitelendirilmesine neden olmaktadır. Temel fonksiyon (ÖKİ) kullanıldığından işlem basamaklarının ayrıntıları analiz edilebilmektedir. İşlem sonucunda dönüştürülmüş parametreler olduğundan yorumlanması için ek fonksiyonlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 4.13. Uygulama-1 için HHD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0	50	150	250	350	450
Kestirilen Frekans (Hz)	0	50	150	250	350	450
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.

Çizelge 4.14. Uygulama-1 için HHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,9333
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	40,911

Çizelge 4.15. Uygulama-2 için HHD yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0	60	180	420	900
Kestirilen Frekansı (Hz)	0	60	180	420	900
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.

Çizelge 4.16. Uygulama-2 için HHD yöntemi ile diğer parametrelerin kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	2,2397
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	69,097

4.5. Prony Yöntemi Uygulaması

Prony yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.12) ve Eş. (4.13)'te yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıçta kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur.

$$\text{Uygulama-1: } v(t) = \sqrt{2}\{220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\} \quad (4.12)$$

Uygulama-1 için Eş. (4.12)'de yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz, $\omega=2\pi 50$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18 ile verilmiştir. Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.18'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağlı hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağlı hata oranı %24,1618 olarak bulunmuştur.

$$\text{Uygulama-2: } v(t) = \sqrt{2}\{110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\} \quad (4.13)$$

Uygulama-2 için Eş. (4.13)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz, $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20 ile verilmiştir.

Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.20'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %40,807 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait frekans, genlik, faz ve sönüm faktörünü hesaplayabilmektedir. Çok yüksek çözünürlükte ve bu yüzden hassas yapıdadır. Gürültü ve örnek uyumsuzluğuna oldukça eğilimli olduğundan dolayı sayısal olarak verimli değildir.

Çizelge 4.17. Uygulama-1 için Prony yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	50,00000	150,00000	250,00000	350,00000	450,00000
Kestirilen Frekans (Hz)	49,999998	150,00000	249,99998	350,000001	450,00000
Bağıl Hata Oranı (%)	0,000004	0,00000	0,000008	0,0000003	0,00000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	220,0000	50,00000	20,00000	10,00000	5,00000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	220,0000	50,00008	20,00010	9,999998	4,999998
Bağıl Hata Oranı (%)	0,00000	0,00016	0,00050	0,00002	0,00004
Gerçek Faz [P(°)]	30,0000	60,00000	80,00000	-45,00000	-36,00000
Kestirilen Faz [P(°)]	30,0001	59,99950	80,00010	-45,00010	-36,00000
Bağıl Hata Oranı (%)	0,0003333	0,0008333	0,0001250	0,0002222	0,00000

Çizelge 4.18. Uygulama-1 için Prony yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,7035
Bağıl Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	24,1618

Çizelge 4.19. Uygulama-2 için Prony yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	60,0000	180,0000	420,0000	900,0000
Kestirilen Frekans (Hz)	60,0000	180,0000	420,0000	900,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Gerçek Faz [P(°)]	-45,0000	75,0000	30,0000	-15,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-45,0000	75,0000	30,0000	-15,0000
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Çizelge 4.20. Uygulama-2 için Prony yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,8650
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	40,807

4.6. Çoklu İşaret Sınıflandırması Uygulaması

Çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.14) ve Eş. (4.15)'de yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıçta kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur. Ayrıca giriş işaretinin faz farkı içermesi yöntemin doğruluğunu azalttığından dolayı uygulamalarda faz farkı kullanılmamıştır. Sunulan yöntem frekans kestirimi yapmaktadır.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{220\cos(\omega t) + 50\cos(3\omega t) + 20\cos(5\omega t) + 10\cos(7\omega t) + 5\cos(9\omega t)\}$$
 (4.14)

Uygulama-1 için Eş. (4.14)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz, $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz ve 2 tam periyot kullanılmıştır. Ayrıca frekans arama fonksiyonu değeri 1,0003 alınmıştır. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.22 ile verilmiştir.

Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.22'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağıl hata oranı %0,0299, toplam harmonik bozulma (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %40,867 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{110\cos(\omega t) + 33\cos(3\omega t) + 22\cos(7\omega t) + 11\cos(15\omega t)\} \quad (4.15)$$

Uygulama-2 için Eş. (4.15)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz; $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz ve 2 tam periyot kullanılmıştır. Ayrıca frekans arama fonksiyonu değeri 1,0003 alınmıştır. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.24 ile verilmiştir.

Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.24'te görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağıl hata oranı %0,02997, toplam harmonik bozulma (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %69,044 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait frekans ve genlik bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Kısa veri uzunluğu ile iyi doğruluk sağlamaktadır. Frekans arama aralığına ilişkin önsel bilgi gerektirmektedir. Yani harici frekans aralığını bulma fonksiyonu kullanımı zorunludur. Harici fonksiyon gereksinimiyle hesaplama süresi artmaktadır.

Çizelge 4.21. Uygulama-1 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile genlik ve frekans bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	50,0000	150,00000	250,00000	350,00000	450,00000
Kestirilen Frekans (Hz)	51,0000	153,0000	255,00000	357,00000	459,00000
Bağlı Hata Oranı (%)	2,0000	2,00000	2,00000	2,00000	2,00000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	220,0000	50,0000	20,00000	10,00000	5,00000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	220,0660	50,01500	20,00600	10,00300	5,00150
Bağlı Hata Oranı (%)	2,0000	2,00000	2,00000	2,00000	2,00000
Giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.					

Çizelge 4.22. Uygulama-1 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,8388	25,0000	1,0308	1,9327
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0299	0,0000	0,0000	40,867

Çizelge 4.23. Uygulama-2 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile genlik ve frekans bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	60,00000	180,00000	420,00000	900,00000
Kestirilen Frekans (Hz)	61,00000	183,00000	427,00000	915,00000
Bağlı Hata Oranı (%)	1,66667	1,66667	1,66667	1,66667
Gerçek Genlik (V_{RMS})	110,00000	33,00000	22,00000	11,00000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	110,03300	33,00990	22,00660	11,003300
Bağlı Hata Oranı (%)	1,66667	1,66667	1,66667	1,66667
Giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.				

Çizelge 4.24. Uygulama-2 için çoklu işaret sınıflandırması (ÇİS) yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4831	37,4166	1,0677	2,2390
Bağlı Hata Oranı (%)	0,02997	0,0000	0,0000	69,044

4.7. En Küçük Ortalama Kare Uygulaması

EKK yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.16) ve Eş. (4.17)'te yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıçta kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\}$$
 (4.16)

Uygulama-1 için Eş. (4.16)'da yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz; $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için kullanılan adım büyüklüğü (μ) parametresi 0,01 olarak belirlenmiştir. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26 ile verilmiştir.

Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.26'da görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağlı hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağlı hata oranı %25,802 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\}$$
 (4.17)

Uygulama-2 için Eş. (4.17)'de yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz; $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için kullanılan adım büyüklüğü (μ) parametresi 0,01 olarak belirlenmiştir. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.28 ile verilmiştir. Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.28'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %27,9275 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Adım büyüklüğünün (μ) ve filtre uzunluğunun (M) belirli değerleri için kestirim başarımlarını sağlamaktadır. Bu değerlerin önceden belirlenmesi için deneme-yanılma yönteminin kullanılması gerekmektedir. Kullanıcı açısından bu durum ek zaman kaybına neden olmaktadır. Filtreye girmeden önce bileşenin filtreye uygun olarak hazırlanması gerekmektedir. Aksi takdirde filtre çalışmadığından sonuç alınamamaktadır.

Çizelge 4.25. Uygulama-1 için EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0,0000	50,0000	150,0000	250,0000	350,0000	450,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	4,2942	220,0027	49,99783	19,99775	10,00463	4,998806
Bağıl Hata Oranı (%)	14,116	0,0012273	0,00434	0,01125	0,0463000	0,02388
Gerçek Faz [P(°)]	-	30,00000	60,00000	80,00000	-45,00000	-36,00000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	30,10910	60,21830	80,28800	-45,18040	-36,08780
Bağıl Hata Oranı (%)	-	0,3636667	0,3638333	0,36000	0,4008889	0,2438889

Çizelge 4.26. Uygulama-1 için EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,7729	24,9988	1,0308	1,7260
Bağlı Hata Oranı (%)	9,26E-04	4,8E-03	0,0000	25,802

Çizelge 4.27. Uygulama-2 için EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0,00000	60,0000	180,0000	420,0000	900,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,00000	110,00000	33,00000	22,00000	11,00000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	11,32320	110,00010	33,00220	21,99807	10,99758
Bağlı Hata Oranı (%)	13,23200	0,0000909	0,0066667	0,0087727	0,02200
Gerçek Faz [P(°)]	-	-45,00000	75,00000	30,00000	-15,00000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	-45,15870	75,26990	30,11780	-15,04660
Bağlı Hata Oranı (%)	-	0,3526667	0,3598667	0,3926667	0,3106667

Çizelge 4.28. Uygulama-2 için EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,6944
Bağlı Hata Oranı (%)	0,0000	0,0000	0,0000	27,9275

4.8. Normalleştirilmiş En Küçük Ortalama Kare Uygulaması

N-EKK yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.18) ve Eş. (4.19)'da yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıçta kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\} \quad (4.18)$$

Uygulama-1 için Eş. (4.18)'de yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz; $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için kullanılan parametreler; adım büyüklüğü $\mu = 0,0566$ ve normalizasyon katsayısı $\varepsilon = 0,01$ olarak belirlenmiştir. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.29 ve Çizelge 4.30 ile verilmiştir. Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.30'da görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %25,809 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\} \quad (4.19)$$

Uygulama-2 için Eş.(4.19)'da yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz; $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; örnekleme frekansı 1 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için kullanılan parametreler adım büyüklüğü $\mu = 0,0566$ ve normalizasyon katsayısı $\varepsilon = 0,01$ olarak belirlenmiştir. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.31 ve Çizelge 4.32 ile verilmiştir. Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.32'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS), toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %27,912 olarak bulunmuştur. Yöntem, işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Adım büyüklüğünün (μ), normalizasyon katsayısının (ε) ve filtre uzunluğunun (M) belirli değerleri için kestirim başarım sağlamaktadır. Bu değerlerin önceden belirlenmesi için deneme-yanılma yönteminin kullanılması gerekmektedir. Kullanıcı açısından bu durum ek zaman kaybına neden olmaktadır. Başarım açısından doğruya en yakın olanıdır fakat çalışma hızı daha yavaştır. Ek işlem yapması doğruluğu sağlarken uygulamaya ek yük getirmektedir.

Çizelge 4.29. Uygulama-1 için N-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0,0000	50,0000	150,0000	250,0000	350,0000	450,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	6,0723	220,0022	50,00259	19,99569	10,00078	4,999296
Bağlı Hata Oranı (%)	21,4460	0,0010	0,00518	0,02155	0,00780	0,01408
Gerçek Faz [P(°)]	-	30,0000	60,0000	80,0000	-45,0000	-36,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	30,1117	60,2163	80,3007	-45,1817	-36,1503
Bağlı Hata Oranı (%)	-	0,3723333	0,36050	0,375875	0,4037778	0,4175

Çizelge 4.30. Uygulama-1 için N-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,7731	25,0001	1,0308	1,7261
Bağlı Hata Oranı (%)	1,014E-03	4E-04	0,0000	25,809

Çizelge 4.31. Uygulama-2 için N-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0,00000	60,0000	180,0000	420,0000	900,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	11,3236	110,0050	32,99908	21,99665	11,00204
Bağlı Hata Oranı (%)	13,236	0,0045455	0,0027879	0,0152273	0,0185455
Gerçek Faz [P(°)]	-	-45,0000	75,0000	30,00000	-15,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	-45,1609	75,2695	30,12270	-15,0457
Bağlı Hata Oranı (%)	-	0,3575556	0,3593333	0,40900	0,3046667

Çizelge 4.32. Uygulama-2 için N-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4518	37,4131	1,0677	1,6942
Bağlı Hata Oranı (%)	3,32E-03	9,35E-03	0,0000	27,912

4.9. Sızdıran En Küçük Ortalama Kare Uygulaması

S-EKK yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.20) ve Eş. (4.21)'de yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıçta kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\}$$
 (4.20)

Uygulama-1 için Eş. (4.20)'de yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz; $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için kullanılan parametreler; adım büyüklüğü $\mu = 0,01$ ve sızdıran faktörü $\eta = 0,0001$ olarak belirlenmiştir. Uygulama-1 için kestirim sonuçları Çizelge 4.33 ve Çizelge 4.34 ile verilmiştir.

Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.34'te görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağlı hata oranı %0,01746, toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağlı hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağlı hata oranı %25,8236 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\}$$
 (4.21)

Uygulama-2 için Eş.(4.21)'de yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz; $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; örnekleme frekansı 1 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için kullanılan parametreler; adım büyüklüğü $\mu = 0,01$ ve sızdıran faktörü $\eta = 0,0001$ olarak belirlenmiştir. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.35 ve Çizelge 4.36 ile verilmiştir.

Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.36'da görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağıl hata oranı %0,01762, toplam harmonik bozulmada (THD) ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı sıfır iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %27,9867 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Adım büyüklüğü (μ), filtre uzunluğu (M) ve sızdırma faktörünün (η) belirli değerleri için kestirim başarımlarını sağlamaktadır. Bu değerlerin önceden belirlenmesi için deneme-yanılma yönteminin kullanılması gerekmektedir. Kullanıcı açısından bu durum ek zaman kaybına neden olacaktır.

Çizelge 4.33. Uygulama-1 için S-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0,0000	50,0000	150,0000	250,0000	350,0000	450,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	4,2939	219,9621	49,99098	19,99282	9,996219	4,998232
Bağıl Hata Oranı (%)	14,122	0,0172273	0,01804	0,0359	0,03781	0,03536
Gerçek Faz [P(°)]	-	30,0000	60,0000	80,0000	-45,0000	-36,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	30,1104	60,2208	80,28460	-45,1427	-36,1427
Bağıl Hata Oranı (%)	-	0,3680	0,3680	0,35575	0,3171111	0,3963889

Çizelge 4.34. Uygulama-1 için S-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	226,7312	24,9990	1,0308	1,7263
Bağlı Hata Oranı (%)	0,01746	1,67E-03	0,0000	25,8236

Çizelge 4.35. Uygulama-2 için S-EKK yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0,00000	60,00000	180,00000	420,00000	900,00000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,00000	110,00000	33,00000	22,00000	11,00000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	11,3219	109,9806	32,99672	21,99376	10,9948
Bağlı Hata Oranı (%)	13,21900	0,0176364	0,0099394	0,0283636	0,0472727
Gerçek Faz [P°]	-	-45,00000	75,00000	30,00000	-15,00000
Kestirilen Faz [P°]	-	-45,1543	75,26180	30,11680	-15,03580
Bağlı Hata Oranı (%)	-	0,3428889	0,3490667	0,3893333	0,2386667

Çizelge 4.36. Uygulama-2 için S-EKK yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3242
Kestirilen Değerler	117,4272	37,4165	1,0677	1,6948
Bağlı Hata Oranı (%)	0,01762	1,67E-04	0,0000	27,9867

4.10. Kalman Filtresi Uygulaması

KF yöntemi kullanılarak 50 Hz ve 60 Hz temel frekansları olmak üzere iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, Eş. (4.22) ve Eş. (4.23)'de yer alan giriş işareti ile oluşturulmuştur. Uygulamalara ait başlangıçta kullanılan veriler, uygulamaların açıklamalarında sunulmuştur.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\} \quad (4.22)$$

Uygulama-1 için Eş.(4.22)'da yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 50 Hz olan şebekede $\omega = 2\pi 50$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz ve 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için ek fonksiyon uygulanmış ve ek parametre, işaretin varyansı $\sigma = 0,28$ belirlenmiştir. Uygulama-1, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.38'de görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağıl hata oranı %0,3741, toplam harmonik bozulmada (THD) bağıl hata oranı %7,2028 ve biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı %0,4074 iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %26,9096 olarak bulunmuştur.

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\} \quad (4.23)$$

Uygulama-2 için Eş. (4.23)'te yer alan giriş işareti kullanılarak temel frekans 60 Hz; $\omega = 2\pi 60$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz ve 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır. Filtre için ek fonksiyon uygulanmış ve ek parametre, işaretin varyansı $\sigma = 0,29$ belirlenmiştir. Uygulama-2 için kestirim sonuçları Çizelge 4.39 ve Çizelge 4.40 ile verilmiştir. Uygulama-2, harmonik kestirimi sırasında etkin değeri (RMS), toplam harmonik bozulmayı (THD), biçim faktörünü (BF) ve tepe faktörünü (TF) hesaplamaktadır. Çizelge 4.40'ta görüldüğü gibi etkin değerinde (RMS) bağıl hata oranı %0,01209, toplam harmonik bozulmada (THD) bağıl hata oranı %1,54583, biçim faktöründe (BF) bağıl hata oranı %0,18731 iken tepe faktöründe (TF) bağıl hata oranı %49,92072 olarak bulunmuştur.

Yöntem, işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Zamana bağlı değişen parametreleri inceleyebilmektedir. Durum değişkenli modelleme önemlidir. Doğru matrislere ulaşmak zaman kaybına yol açmaktadır. Gürültüye karşı dayanıklı olmasına rağmen gürültüye ve sürece ilişkin önsel bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 4.37. Uygulama-1 için KF yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	5	7	9
Harmonik Frekansı (Hz)	0,0000	50,0000	150,0000	250,0000	350,0000	450,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	5,0000	220,0000	50,0000	20,0000	10,0000	5,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	5,0150	220,0777	44,89886	21,55928	10,05342	4,99754
Bağlı Hata Oranı (%)	0,3000	0,0353182	10,20228	7,79640	0,53420	0,0492
Gerçek Faz [P(°)]	-	30,0000	60,0000	80,0000	-45,0000	-36,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	29,27274	66,2277	101,3308	-44,85957	-36,90125
Bağlı Hata Oranı (%)	-	2,4242	10,3795	26,66350	0,3120667	2,5034722

Çizelge 4.38. Uygulama-1 için KF yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	226,7708	25,0000	1,0308	1,3720
Kestirilen Değerler	225,9224	23,1993	1,0266	1,7412
Bağlı Hata Oranı (%)	0,3741	7,2028	0,4074	26,9096

Çizelge 4.39. Uygulama-2 için KF yöntemi ile genlik, DA ve faz bileşenleri kestirim sonuçları

Harmonik Sırası	0	1	3	7	15
Harmonik Frekansı (Hz)	0,0000	60,0000	180,0000	420,0000	900,0000
Gerçek Genlik (V_{RMS})	10,0000	110,0000	33,0000	22,0000	11,0000
Kestirilen Genlik (V_{RMS})	9,9699	109,7769	33,78104	21,85534	10,99501
Bağlı Hata Oranı (%)	0,3010	0,2028182	2,3667879	0,6575455	0,0453636
Gerçek Faz [P(°)]	-	-45,0000	75,0000	30,0000	-15,0000
Kestirilen Faz [P(°)]	-	-43,3162	76,8846	31,7865	-15,28750
Bağlı Hata Oranı (%)	-	3,7417778	2,5128	5,9550	1,9166667

Çizelge 4.40. Uygulama-2 için KF yöntemi ile hesaplanan diğer parametrelere ait kestirim sonuçları

	RMS (V)	THD (%)	BF	TF
Gerçek Değerler	117,4479	37,4166	1,0677	1,3245
Kestirilen Değerler	117,4337	37,9950	1,0697	1,9857
Bağlı Hata Oranı (%)	0,01209	1,54583	0,18731	49,92072

4.11. Parametrik Olmayan ve Parametrik Yöntemlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde, parametrik olmayan ve parametrik yöntemlerin kestirim hataları genlik, faz ve frekans kestirim karşılaştırmaları yer almaktadır. Yöntemlerin ve parametrelerin hata oranları grafikler ile görselleştirilmiştir. Sunulan yöntemler iki uygulama üzerinde tartışıldığından yöntemlerin karşılaştırmaları iki kısım olarak ele alınmıştır.

Uygulama-1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\}$$
 (4.24)

Eş. (4.24)'e ait 5 adet harmonik bileşen olduğu için karşılaştırma çizelgeleri ve grafikleri temel, 3, 5, 7 ve 9. harmonikler için oluşturulmuştur. AHD, HHD ve çoklu işaret sınıflandırması yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.

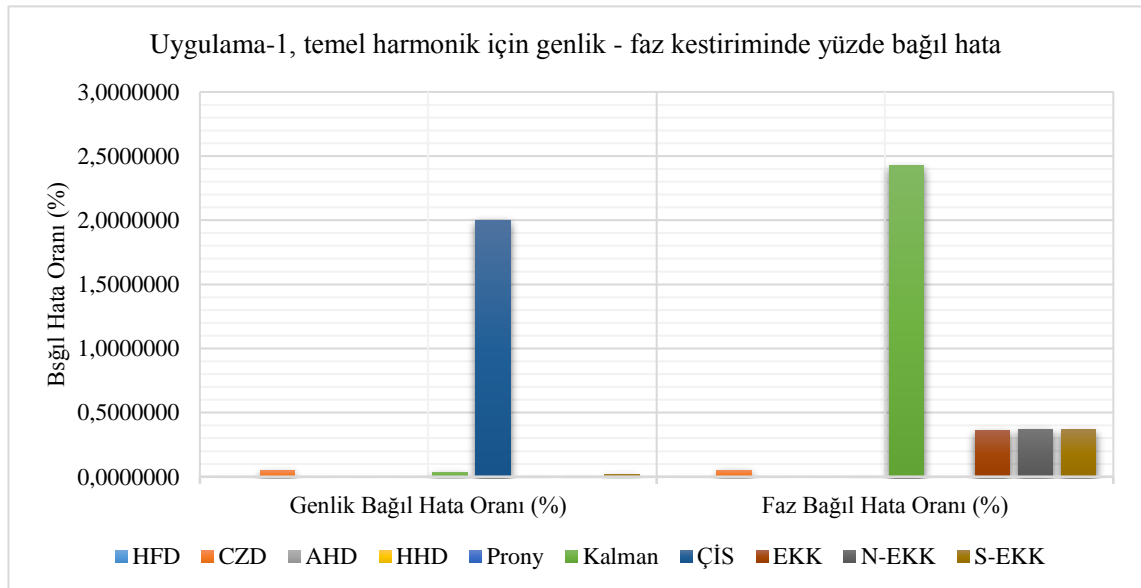
Temel harmonik bileşen için genlik ve faz bileşenlerinin karşılaştırması Çizelge 4.41'de yer almaktadır. Çizelge 4.41'de yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.1 ile verilen temel harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik hatası ÇİS yönteminde iken, en yüksek faz hatası Kalman Filtresi yönteminde görülmektedir (Şekil 4.1). Faz kestirimine uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Yöntemlere ait sonuçlar bir bütün olarak sunulduğundan uygulama süreleri ve sisteme ek yük getirmeleri gibi özelliklerin karşılaştırılması bir sonraki başlıkta yer alacaktır. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.42'de yer alan verilerden frekans bileşeni hatası, Şekil 4.2 ile verilen temel harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan Prony, HHD ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.2).

Çizelge 4.41. Uygulama-1 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	220,0000	220,0000	0,0000000	30,0000	30,0000	0,0000000
CZD	220,0000	220,1018	0,0462727	30,0000	29,9847	0,0510000
AHD	220,0000	220,0000	0,0000000	-	-	-
HHD	220,0000	220,0000	0,0000000	-	-	-
Prony	220,0000	220,0000	0,0000000	30,0000	30,0001	0,0003333
Kalman	220,0000	220,0777	0,0353182	30,0000	29,27274	2,4242000
ÇİS	220,0000	220,0660	2,0000000	-	-	-
EKK	220,0000	220,0027	0,0012273	30,0000	30,1090	0,3633333
N-EKK	220,0000	220,0022	0,0010000	30,0000	30,1112	0,3706667
S-EKK	220,0000	219,9621	0,0172273	30,0000	30,1112	0,3706667

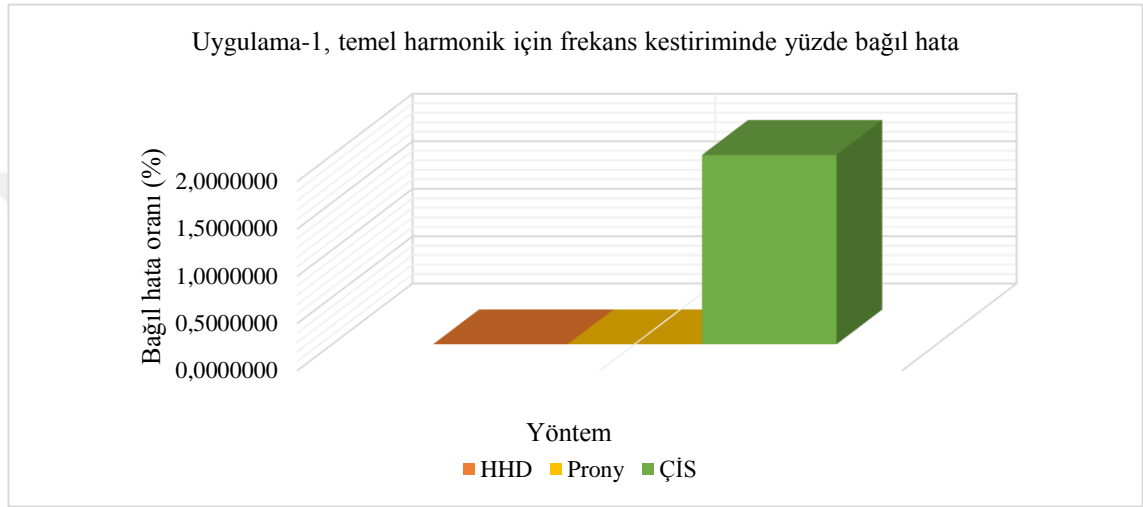
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.



Şekil 4.1. Uygulama-1 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.42. Uygulama-1 için temel harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HHD	50,0000	50,00000	0,0000000
Prony	50,0000	49,99998	0,0000400
ÇİS	50,0000	51,00000	2,0000000



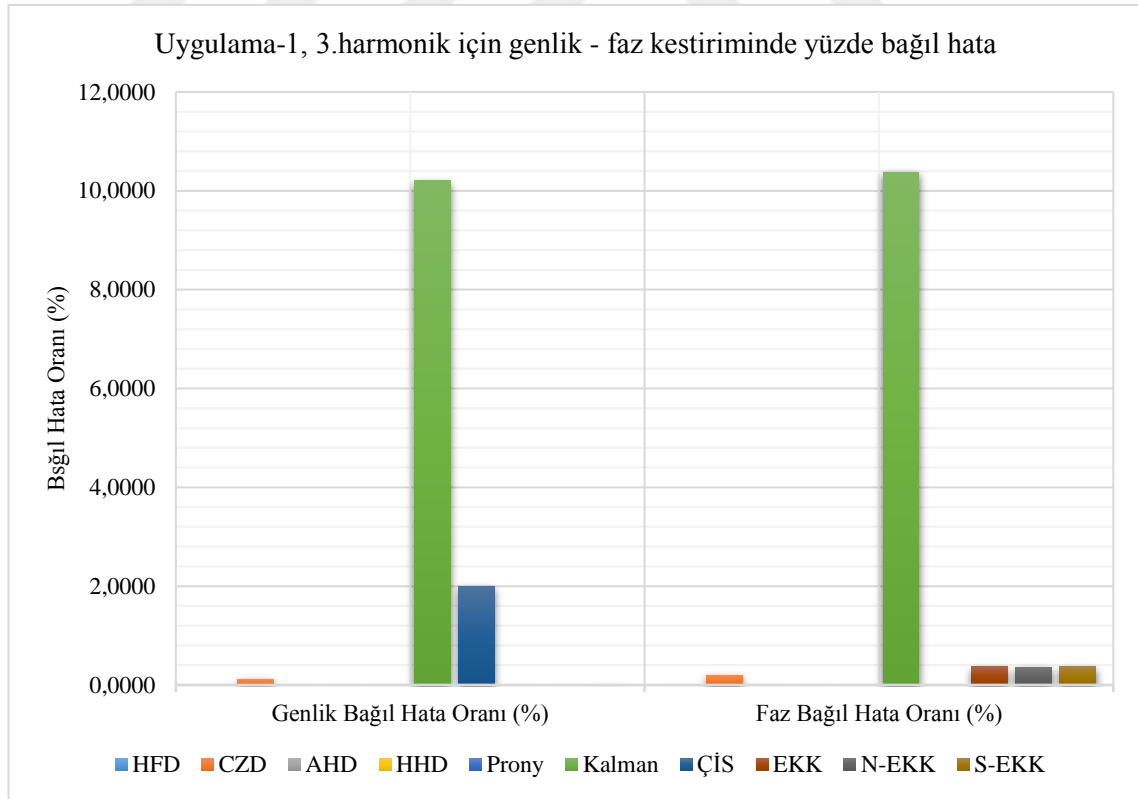
Şekil 4.2. Uygulama-1 için temel harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen 3. harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen verileri Çizelge 4.43'te yer almaktadır. Çizelge 4.43'te yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.3 ile verilen 3. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik ve faz hatası Kalman filtresi yönteminde görülmektedir (Şekil 4.3). Faz kestirimine uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Yöntemlere ait sonuçlar bir bütün olarak sunulduğundan uygulama süreleri ve sisteme ek yük getirmeleri gibi özelliklerin karşılaştırılması bir sonraki başlıkta yer alacaktır. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.44'te yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.4 ile verilen 3. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan Prony, HHD ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.4).

Çizelge 4.43. Uygulama-1 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	50,00000	50,00000	0,0000000	60,00000	60,00000	0,0000000
CZD	50,00000	50,05888	0,1177600	60,00000	59,88350	0,1941667
AHD	50,00000	50,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	50,00000	50,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	50,00000	50,00008	0,0001600	60,00000	59,99950	0,0008333
Kalman	50,00000	44,89886	10,2022800	60,00000	66,22770	10,3795000
ÇİS	50,00000	50,01500	2,0000000	-	-	-
EKK	50,00000	49,99783	0,0043400	60,00000	60,21830	0,3638333
N-EKK	50,00000	50,00259	0,0051800	60,00000	60,21630	0,3605000
S-EKK	50,00000	49,99098	0,0180400	60,00000	60,22080	0,3680000

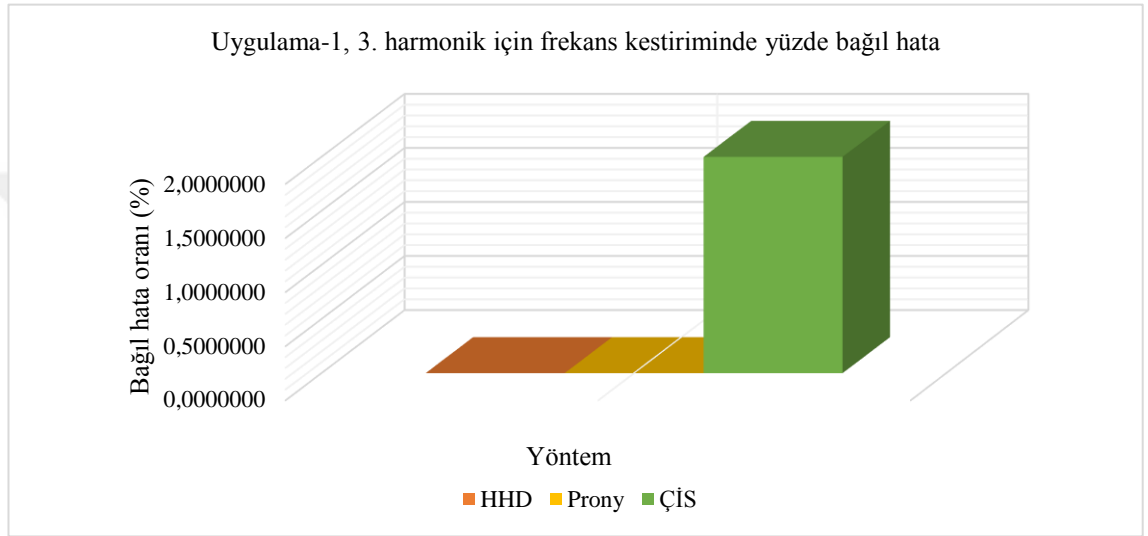
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.



Şekil 4.3. Uygulama-1 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.44. Uygulama-1 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HHD	150,0000	150,0000	0,0000000
Prony	150,0000	150,0000	0,0000000
ÇİS	150,0000	153,0000	2,0000000



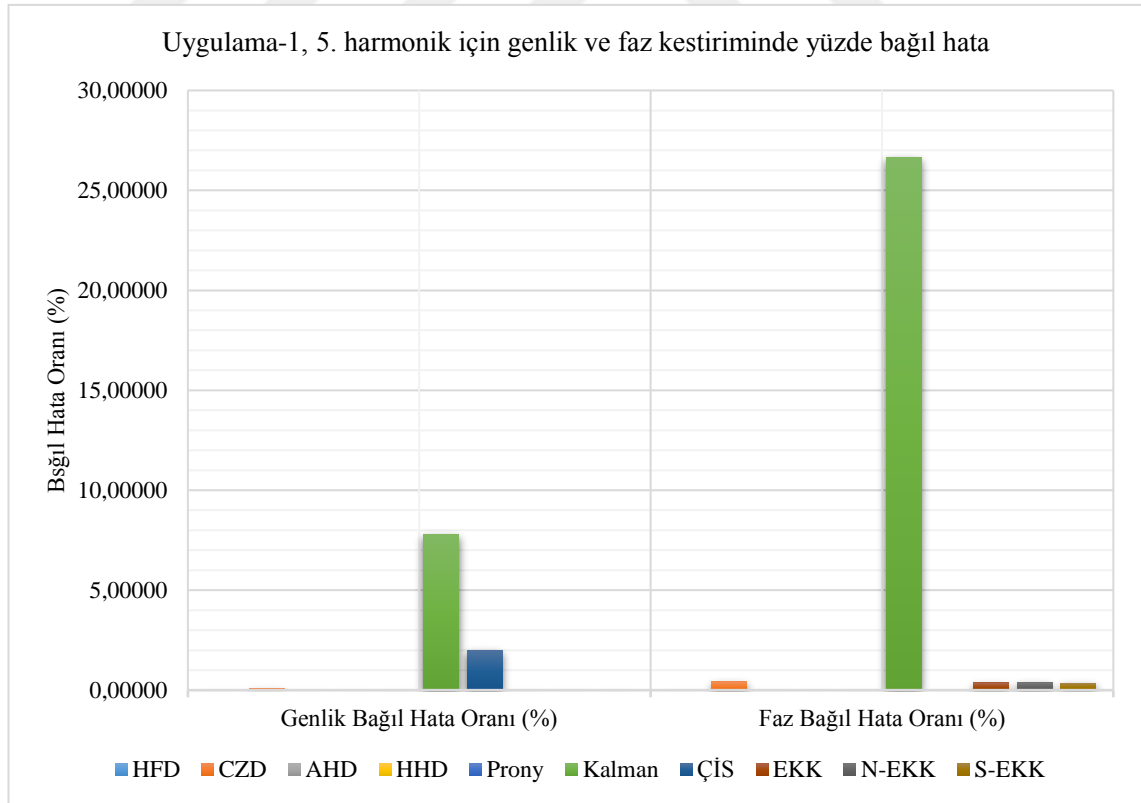
Şekil 4.4. Uygulama-1 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen 5. harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen veriler Çizelge 4.45'te yer almaktadır. Çizelge 4.45'te yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.5 ile verilen 5. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik ve faz hatası Kalman filtresi yöntemlerinde görülmektedir (Şekil 4.5). Faz kestirime uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestirimi için uygulamada Prony, HHD ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.46'da yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.6 ile verilen 5. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan Prony, HHD ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.6).

Çizelge 4.45. Uygulama-1 için 5. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	20,0000	20,00000	0,0000000	80,0000	80,00000	0,0000000
CZD	20,0000	20,02075	0,1037500	80,0000	79,66870	0,4141250
AHD	20,0000	20,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	20,0000	20,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	20,0000	20,00010	0,0005000	80,0000	80,00010	0,0001250
Kalman	20,0000	21,55928	7,7964000	80,0000	101,3308	26,6635000
ÇİS	20,0000	20,00600	2,0000000	-	-	-
EKK	20,0000	19,99775	0,0112500	80,0000	80,28800	0,3600000
N-EKK	20,0000	19,99569	0,0215500	80,0000	80,30070	0,3758750
S-EKK	20,0000	19,99282	0,0359000	80,0000	80,28460	0,3557500

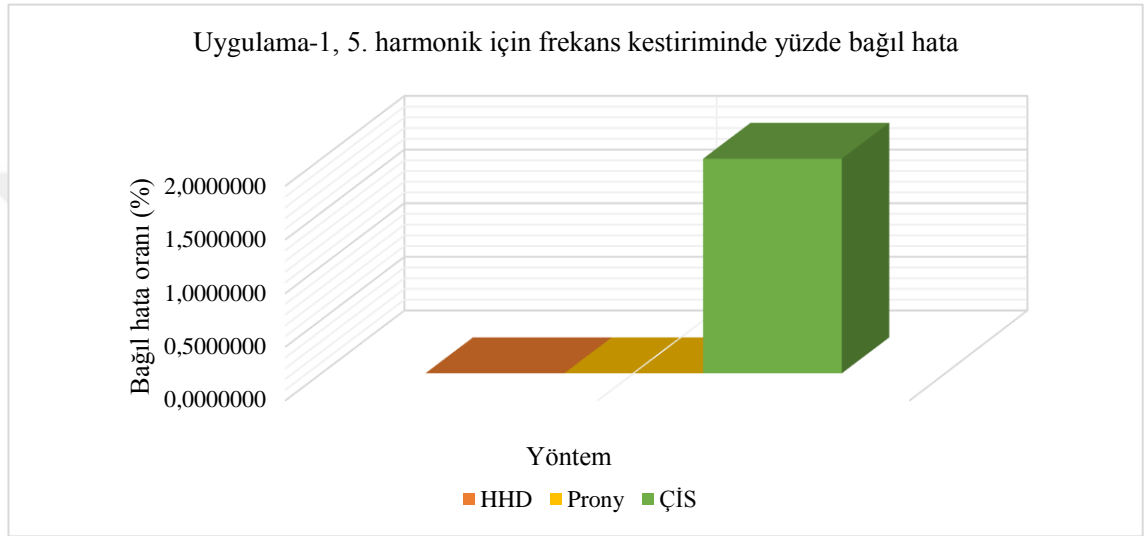
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.



Şekil 4.5. Uygulama-1 için 5. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.46. Uygulama-1 için 5. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HHD	250,0000	250,00000	0,00000
Prony	250,0000	249,99998	0,00001
ÇİS	250,0000	255,00000	2,00000



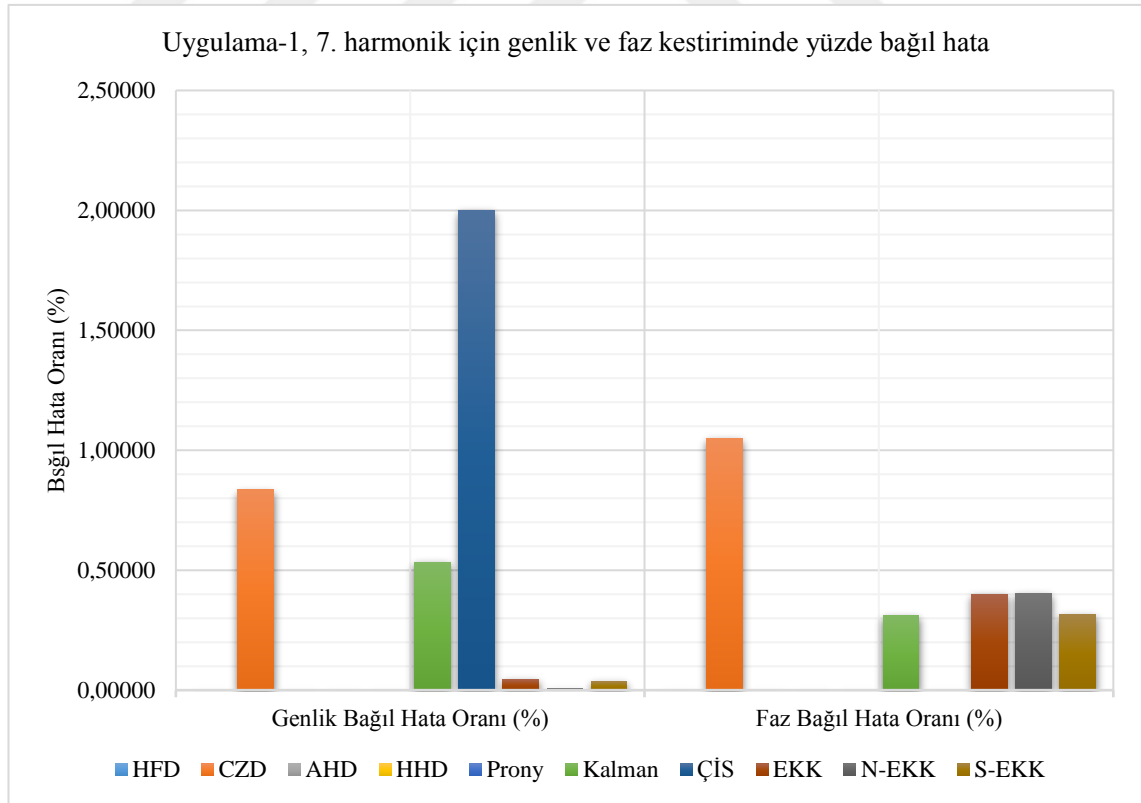
Şekil 4.6. Uygulama-1 için 5. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen 7. harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen veriler Çizelge 4.47’de yer almaktadır. Çizelge 4.47’de yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.7 ile verilen 7. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik hatası ÇİS yönteminde iken, faz hatası CZD yönteminde görülmektedir (Şekil 4.7). Faz kestirime uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.48’de yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.8 ile verilen 7. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.8).

Çizelge 4.47. Uygulama-1 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	10,00000	10,00000	0,0000000	-45,00000	-45,00000	0,0000000
CZD	10,00000	10,08347	0,8347000	-45,00000	-44,52770	1,0495556
AHD	10,00000	10,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	10,00000	10,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	10,00000	9,999998	0,0000200	-45,00000	-45,00010	0,0002222
Kalman	10,00000	10,05342	0,5342000	-45,00000	-44,85957	0,3120667
ÇİS	10,00000	10,00300	2,0000000	-	-	-
EKK	10,00000	10,00463	0,0463000	-45,00000	-45,18040	0,4008889
N-EKK	10,00000	10,00078	0,0078000	-45,00000	-45,18170	0,4037778
S-EKK	10,00000	9,996219	0,0378100	-45,00000	-45,14270	0,3171111

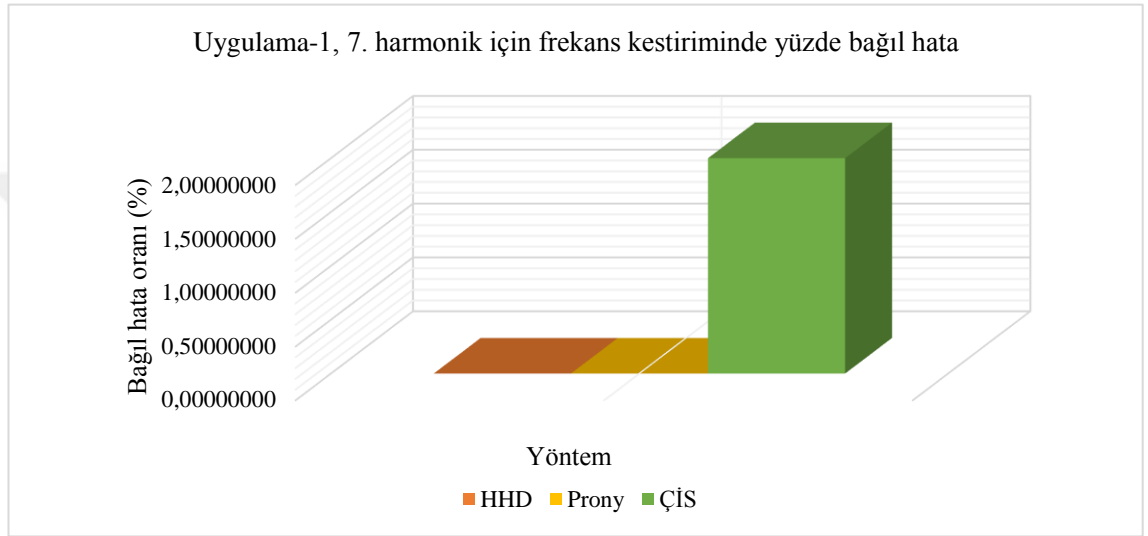
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.



Şekil 4.7. Uygulama-1 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.48. Uygulama-1 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HHD	350,0000	350,0000	0,0000000
Prony	350,0000	350,0000	0,0000000
ÇİS	350,0000	357,0000	2,0000000



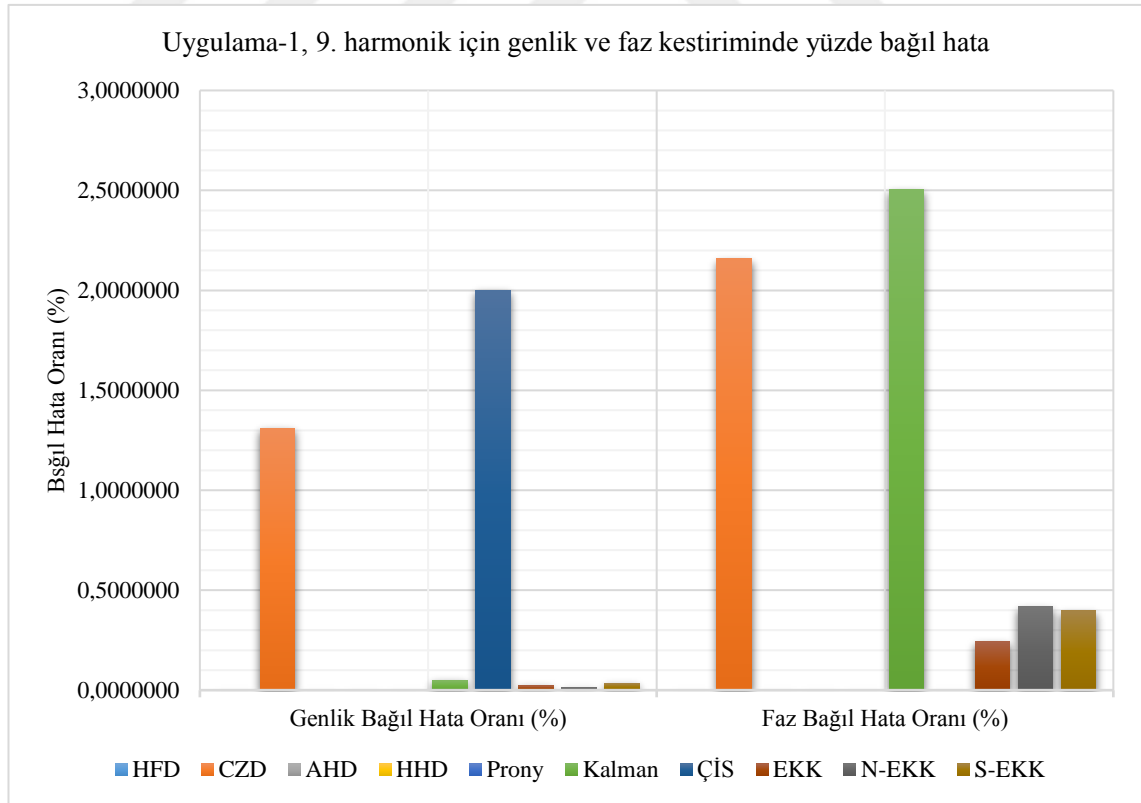
Şekil 4.8. Uygulama-1 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen 9. harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen verileri Çizelge 4.49’da yer almaktadır. Çizelge 4.49’da yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.9 ile verilen 9. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Şekil 4.9’te görüldüğü gibi en yüksek genlik hatası CZD yönteminde iken, faz hatası Kalman filtresi yönteminde görülmektedir (Şekil 4.9). Faz kestirimine uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.50’de yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.10 ile verilen 9. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.10).

Çizelge 4.49. Uygulama-1 için 9. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	5,00000	5,00000	0,0000000	-36,00000	-36,00000	0,0000000
CZD	5,00000	5,065574	1,3114800	-36,00000	-35,22300	2,1583333
AHD	5,00000	5,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	5,00000	5,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	5,00000	4,999998	0,0000400	-36,00000	-36,00000	0,0000000
Kalman	5,00000	4,99754	0,0492000	-36,00000	-36,90125	2,5034722
ÇİS	5,00000	5,00150	2,0000000	-	-	-
EKK	5,00000	4,998806	0,0238800	-36,00000	-36,08780	0,2438889
N-EKK	5,00000	4,999296	0,0140800	-36,00000	-36,15030	0,4175000
S-EKK	5,00000	4,998232	0,0353600	-36,00000	-36,14270	0,3963889

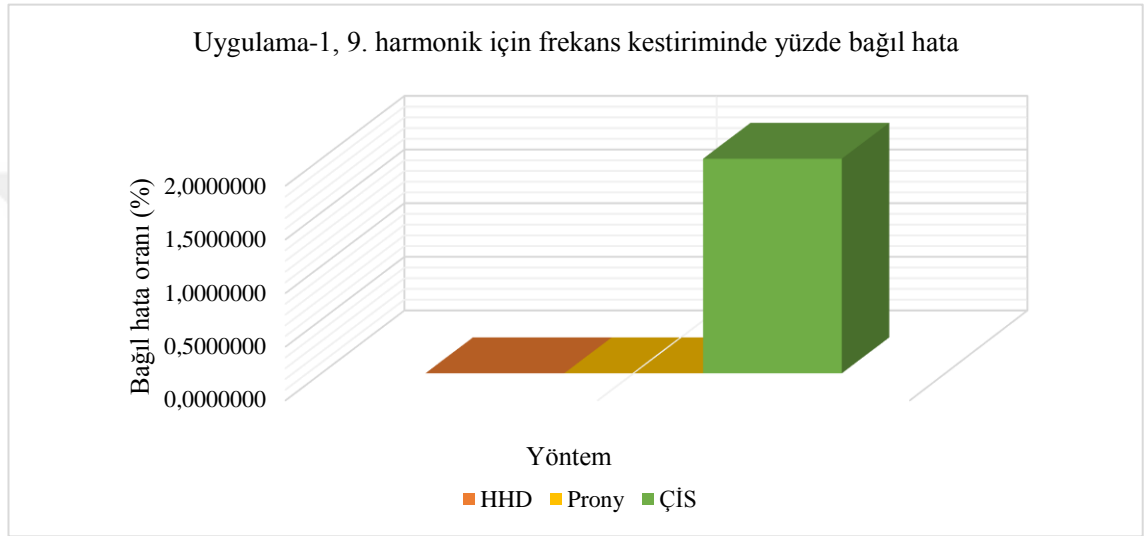
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.



Şekil 4.9. Uygulama-1 için 9. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.50. Uygulama-1 için 9. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HHD	450,0000	450,0000	0,0000000
Prony	450,0000	450,0000	0,0000000
ÇİS	450,0000	459,0000	2,0000000



Şekil 4.10. Uygulama-1 için 9. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Uygulama-1 için verilen grafiklere ait veriler, Ek – 3 içerisinde yer alan uygulamaya ait ekran görüntülerinden elde edilmektedir. Karşılaştırma çizelgelerinin referans çizelgeleri yöntemlerin uygulamalarına ait kestirim sonuçları kısımlarında detaylı olarak verilmiştir. Uygulamanın 2. örneği aşağıda verilmiştir.

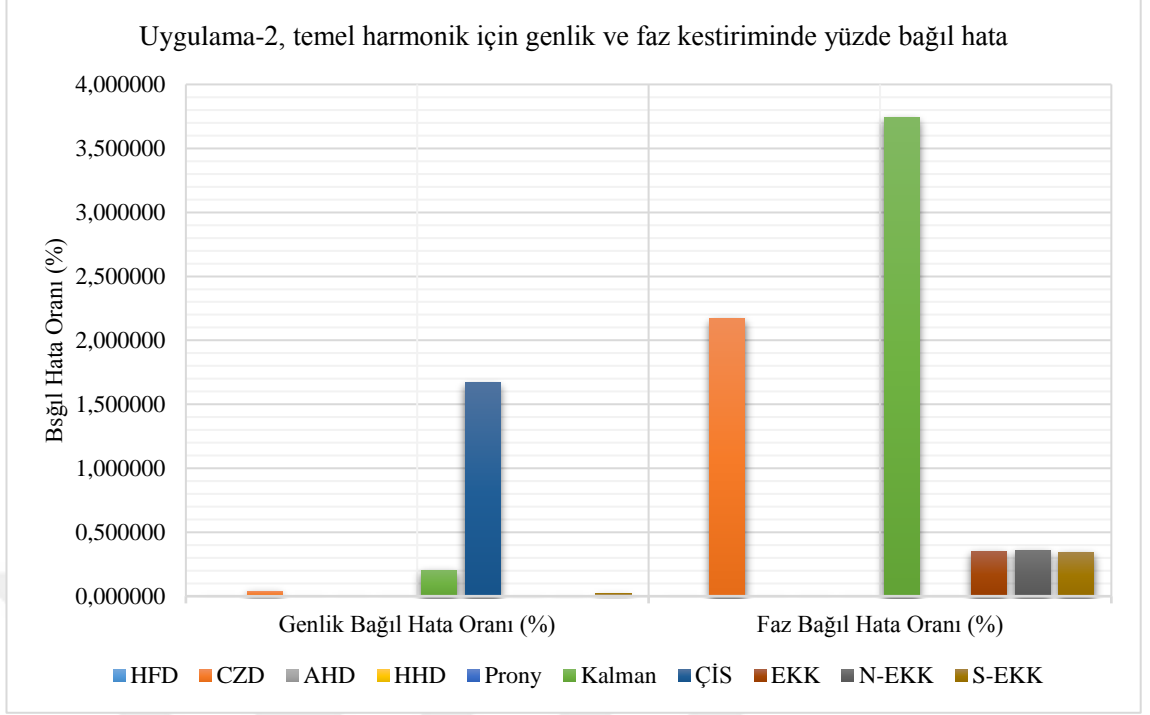
$$\text{Uygulama-2:} \quad v(t) = \sqrt{2}\{10 + 110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\} \quad (4.25)$$

Eş. (4.25)'e ait 4 adet harmonik bileşen olduğu için karşılaştırma çizelgeleri ve grafikleri temel, 3, 7 ve 15. harmonikler için oluşturulmuştur. Ayırık Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü ve çoklu işaret sınıflandırması yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen temel harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen verileri Çizelge 4.51’de yer almaktadır. Çizelge 4.51’de yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.11 ile verilen temel harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik hatası ÇİS yönteminde iken, faz hatası Kalman filtresi yönteminde görülmektedir (Şekil 4.11). Faz kestirimine uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Yöntemlere ait sonuçlar bir bütün olarak sunulduğundan uygulama süreleri ve sisteme ek yük getirmeleri gibi özelliklerin karşılaştırılması bir sonraki başlıkta yer alacaktır. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.52’de yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.12 ile verilen temel harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.12).

Çizelge 4.51. Uygulama-2 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

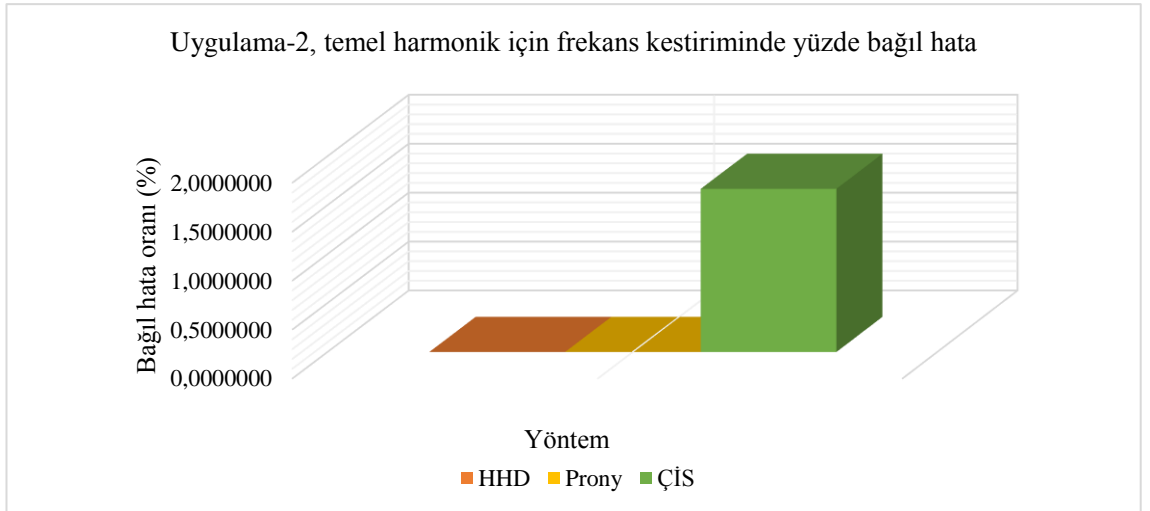
Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	110,00000	110,00000	0,0000000	-45,0000	-45,00000	0,0000000
CZD	110,00000	110,04460	0,0405455	-45,0000	-45,97680	2,1706667
AHD	110,00000	110,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	110,00000	110,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	110,00000	110,00000	0,0000000	-45,0000	-45,00000	0,0000000
Kalman	110,00000	109,77690	0,2028182	-45,0000	-43,31620	3,7417778
ÇİS	110,00000	110,03300	1,6666667	-	-	-
EKK	110,00000	110,00010	0,0000909	-45,0000	-45,15870	0,3526667
N-EKK	110,00000	110,00500	0,0045455	-45,0000	-45,16090	0,3575556
S-EKK	110,00000	109,98060	0,0176364	-45,0000	-45,15430	0,3428889
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.						



Şekil 4.11. Uygulama-2 için temel harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.52. Uygulama-2 için temel harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağıl Hata Oranı (%)
HHD	60,0000	60,0000	0,0000000
Prony	60,0000	60,0000	0,0000000
ÇİS	60,0000	61,0000	1,6666667

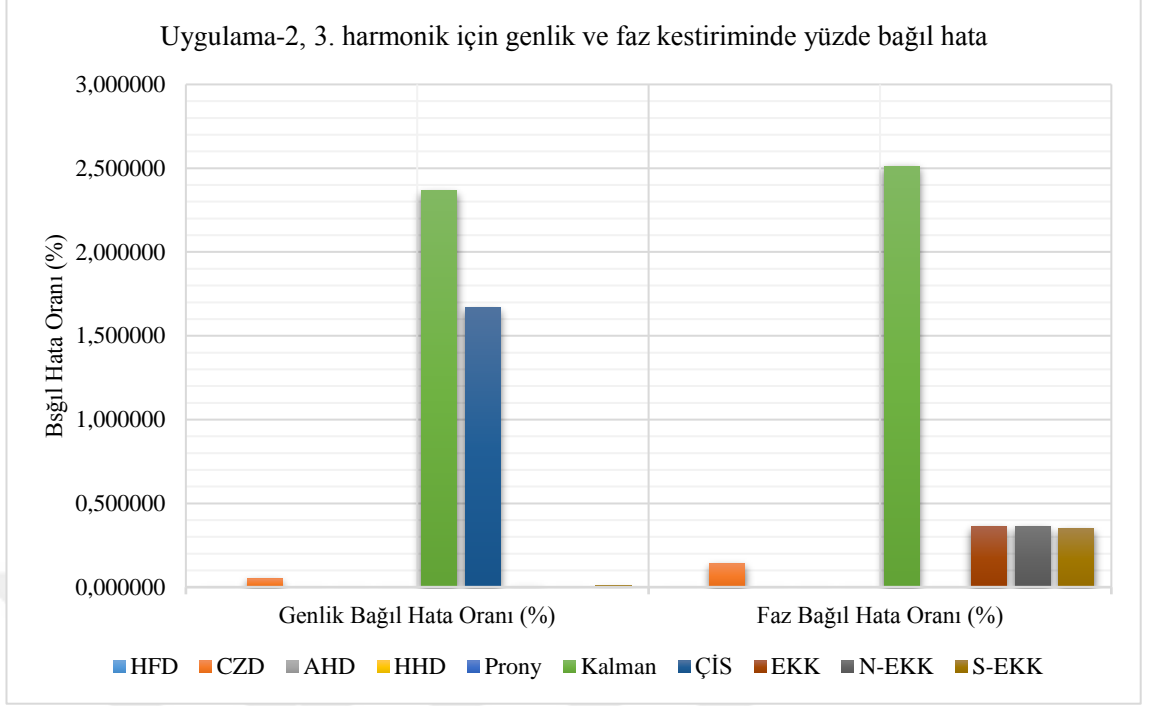


Şekil 4.12. Uygulama-2 için temel harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen 3. harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen verileri Çizelge 4.53'te yer almaktadır. Çizelge 4.53'te yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.13 ile verilen 3. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik ve faz hatası Kalman filtresi yönteminde görülmektedir (Şekil 4.13). Faz kestirimine uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.54'te yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.14 ile verilen 3. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.14).

Çizelge 4.53. Uygulama-2 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

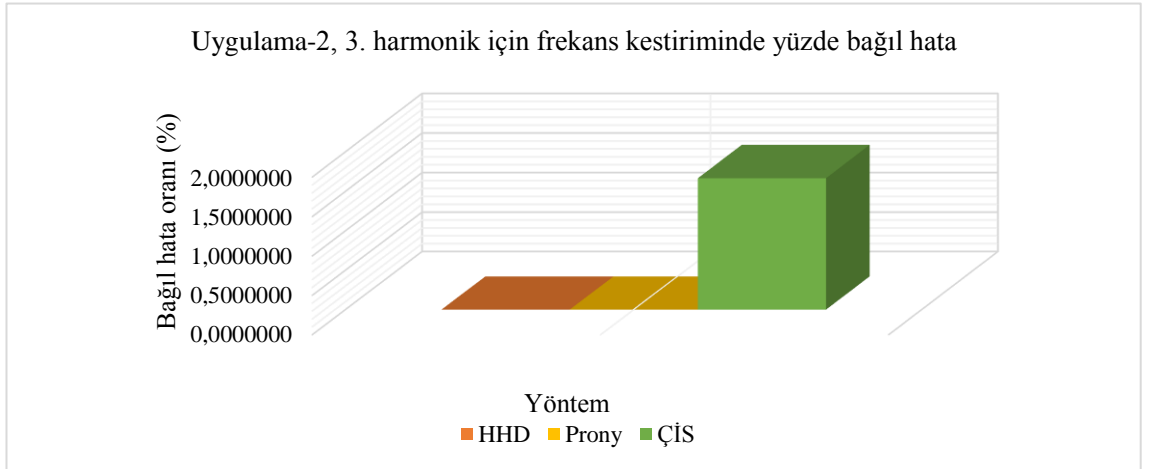
Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	33,00000	33,00000	0,0000000	75,00000	75,00000	0,0000000
CZD	33,00000	33,01636	0,0495758	75,00000	74,89440	0,1408000
AHD	33,00000	33,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	33,00000	33,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	33,00000	33,00000	0,0000000	75,00000	75,00000	0,0000000
Kalman	33,00000	33,78104	2,3667879	75,00000	76,88460	2,5128000
ÇİS	33,00000	33,00990	1,6666667	-	-	-
EKK	33,00000	33,00220	0,0066667	75,00000	75,26990	0,3598667
N-EKK	33,00000	32,99908	0,0027879	75,00000	75,26950	0,3593333
S-EKK	33,00000	32,99672	0,0099394	75,00000	75,26180	0,3490667
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.						



Şekil 4.13. Uygulama-2 için 3. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.54. Uygulama-2 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağıl Hata Oranı (%)
HHD	180,0000	180,0000	0,0000000
Prony	180,0000	180,0000	0,0000000
ÇİS	180,0000	183,0000	1,6666667

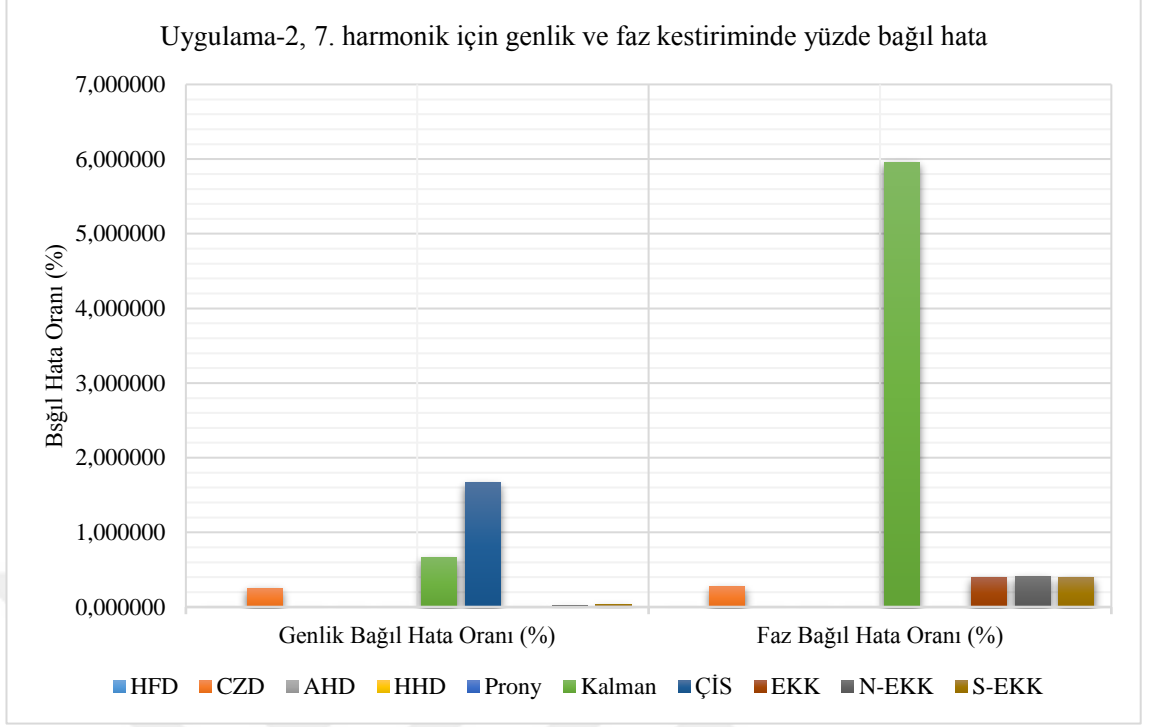


Şekil 4.14. Uygulama-2 için 3. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen 7. harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen veriler Çizelge 4.55’te yer almaktadır. Çizelge 4.55’te yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.15 ile verilen 7. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik hatası ÇİS yönteminde iken, faz hatası Kalman filtresi yönteminde görülmektedir (Şekil 4.15). Faz kestirimine uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.56’da yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.16 ile verilen 7. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.16).

Çizelge 4.55. Uygulama-2 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

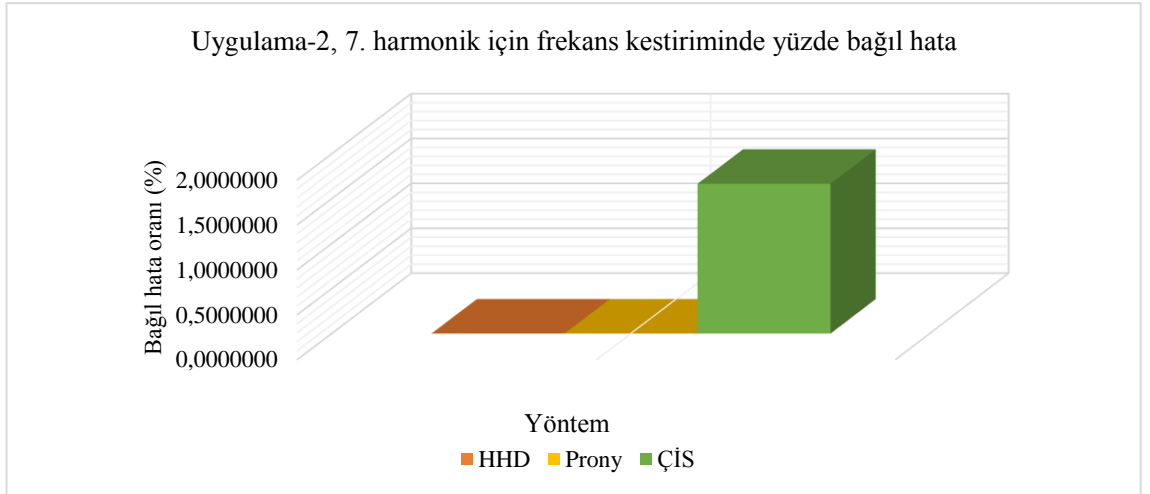
Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	22,00000	22,00000	0,0000000	30,00000	30,00000	0,0000000
CZD	22,00000	22,05458	0,2480909	30,00000	29,91820	0,2726667
AHD	22,00000	22,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	22,00000	22,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	22,00000	22,00000	0,0000000	30,00000	30,00000	0,0000000
Kalman	22,00000	21,85534	0,6575455	30,00000	31,78650	5,9550000
ÇİS	22,00000	22,00660	1,6666667	-	-	-
EKK	22,00000	21,99807	0,0087727	30,00000	30,11780	0,3926667
N-EKK	22,00000	21,99665	0,0152273	30,00000	30,12270	0,4090000
S-EKK	22,00000	21,99376	0,0283636	30,00000	30,11680	0,3893333
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.						



Şekil 4.15. Uygulama-2 için 7. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.56. Uygulama-2 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağıl Hata Oranı (%)
HHD	420,0000	420,0000	0,0000000
Prony	420,0000	420,0000	0,0000000
ÇİS	420,0000	427,0000	1,6666667



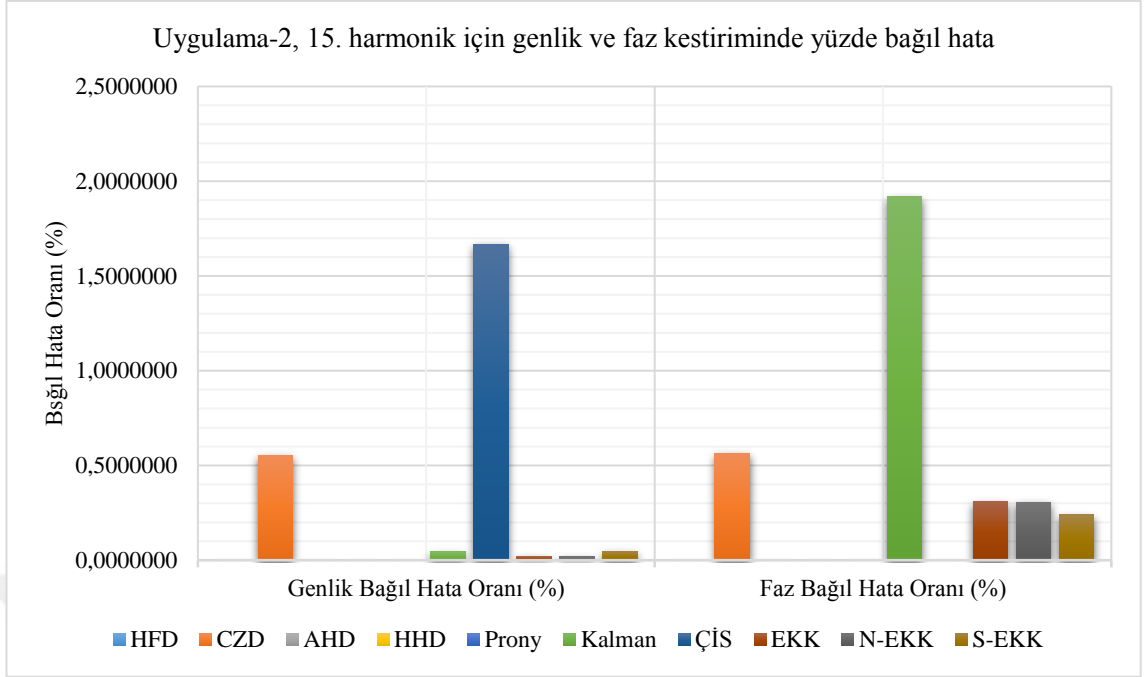
Şekil 4.16. Uygulama-2 için 7. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

Yöntemlerin uygulama sonuçlarından elde edilen 15. harmonik bileşen için genlik ve faz bileşen verilerinin bir bütün olarak sunulması Çizelge 4.57’de yer almaktadır. Çizelge 4.57’de yer alan verilerden genlik ve faz bileşenlerinin hataları grafiği Şekil 4.17 ile verilen 15. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. En yüksek genlik hatası ÇİS yönteminde iken, faz hatası Kalman filtresi yönteminde görülmektedir (Şekil 4.17). Faz kestirimine uygun olmayan yöntemler sırasıyla; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestirimi için uygulamada HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri yer aldığından sadece bu yöntemlere ait frekans kestirimleri sunulmuştur. Çizelge 4.58’de yer alan verilerden frekans bileşeni hatası Şekil 4.18 ile verilen 15. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği oluşturulmasında kullanılmıştır. Frekans kestirim yöntemleri olarak kullanılan HHD, Prony ve ÇİS yöntemleri hata oranı karşılaştırılmasında, HHD daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 5.18).

Çizelge 4.57. Uygulama-2 için 15. harmoniğin genlik ve faz bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	GENLİK (V_{RMS})			FAZ (°)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)	Gerçek	Kestirilen	Bağlı Hata Oranı (%)
HFD	11,00000	11,00000	0,0000000	-15,00000	-15,00000	0,0000000
CZD	11,00000	11,06087	0,5533636	-15,00000	-14,91550	0,5633333
AHD	11,00000	11,00000	0,0000000	-	-	-
HHD	11,00000	11,00000	0,0000000	-	-	-
Prony	11,00000	11,00000	0,0000000	-15,00000	-15,00000	0,0000000
Kalman	11,00000	10,99501	0,0453636	-15,00000	-15,28750	1,9166667
ÇİS	11,00000	11,00330	1,6666667	-	-	-
EKK	11,00000	10,99758	0,0220000	-15,00000	-15,04660	0,3106667
N-EKK	11,00000	11,00204	0,0185455	-15,00000	-15,04570	0,3046667
S-EKK	11,00000	10,99480	0,0472727	-15,00000	-15,03580	0,2386667

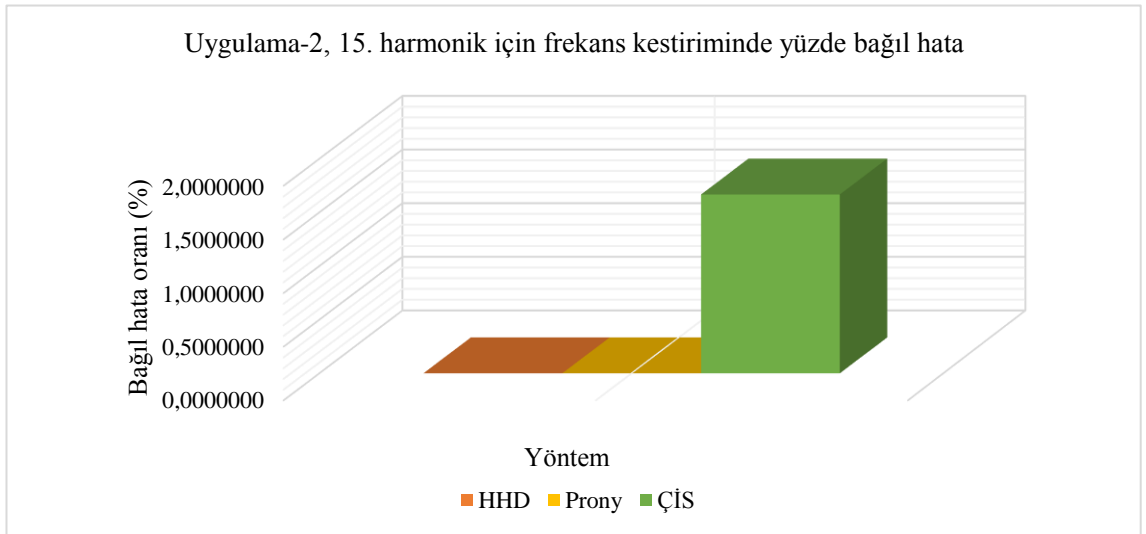
AHD, HHD ve ÇİS yöntemlerinde giriş işaretindeki faz açıları sıfır alınmıştır.



Şekil 4.17. Uygulama-2 için 15. harmoniğin genlik ve faz bileşenlerinin hata grafiği

Çizelge 4.58. Uygulama-2 için 15. harmoniğin frekans bileşeninin karşılaştırılması

Yöntem	FREKANS (Hz)		
	Gerçek	Kestirilen	Bağıl Hata Oranı (%)
HHD	900,0000	900,0000	0,0000000
Prony	900,0000	900,0000	0,0000000
ÇİS	900,0000	915,0000	1,6666667



Şekil 4.18. Uygulama-2 için 15. harmoniğin frekans bileşeninin hata grafiği

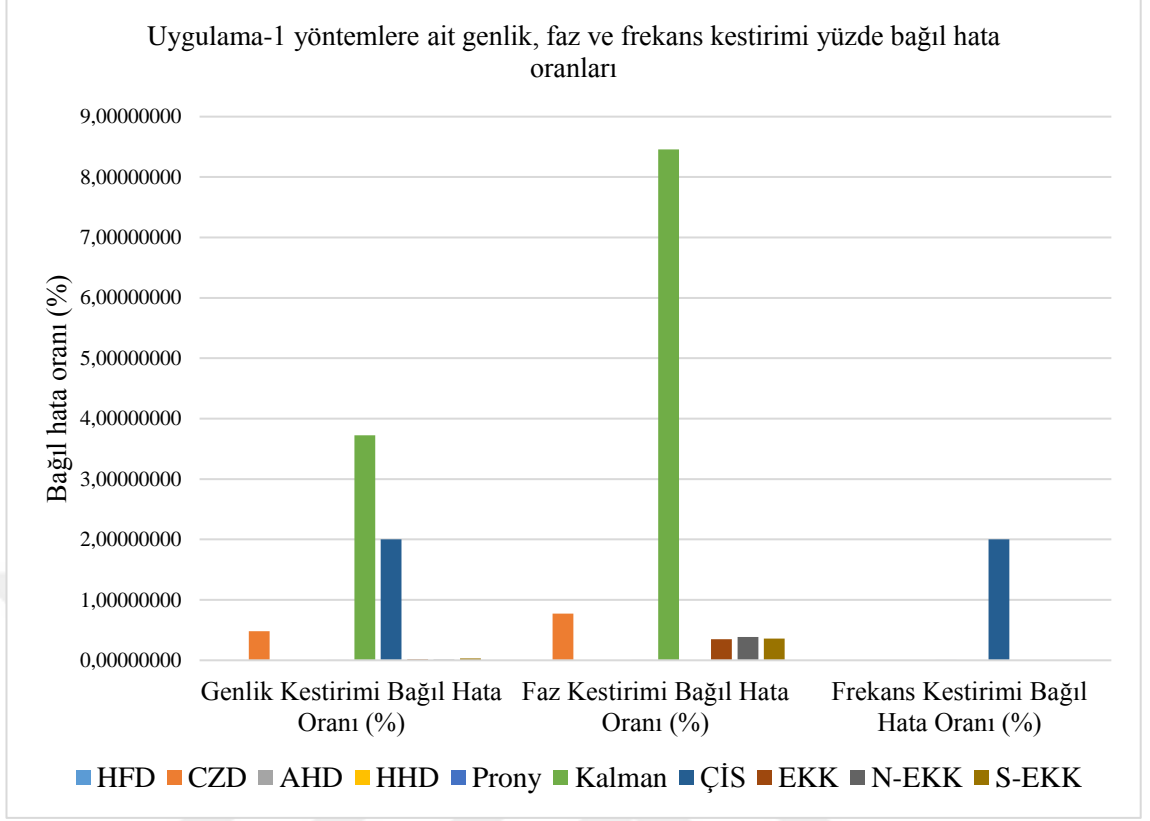
Uygulama-2 için verilen grafiklere ait veriler, Ek – 3 içerisinde yer alan uygulamaya ait ekran görüntülerinden elde edilmektedir. Ayrıca uygulamalara ait genlik, faz ve frekans kestirimlerine ait ortalama bağıl hata oranları da aşağıda yer almaktadır.

Uygulama-1 için genlik, faz ve frekans kestirimleri bağıl oranlarına ait veriler Çizelge 4.59’da yer almaktadır. Çizelge 4.59’daki verilerin grafikleri Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Genlik kestirimi bağıl hatası CZD ve Kalman filtresi yöntemlerinde, faz kestirimi bağıl hatası CZD, Kalman filtresi ve adaptif filtreler yöntemlerinde; faz kestirimi bağıl hatası ise ÇİS yönteminde bulunmaktadır (Şekil 4.19). Faz kestiriminde verisi bulunmayan yöntemler; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestiriminde verisi bulunan yöntemler; HHD, Prony ve ÇİS yöntemleridir. Yöntemlerden genlik, faz ve frekans kestirimini gerçekleştiren Prony yöntemidir. Genlik ve faz kestiriminde bağıl hata oranı sıfır olan HFD yöntemidir. Frekans kestiriminde bağıl hata oranı sıfır olan HHD yöntemidir.

Çizelge 4.59. Uygulama-1 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları

Yöntem	Genlik Kestirimi Bağıl Hata Oranı (%)	Faz Kestirimi Bağıl Hata Oranı (%)	Frekans Kestirimi Bağıl Hata Oranı (%)
HFD	0,00000000	0,00000000	-
CZD	0,48279255	0,77343612	-
AHD	0,00000000	-	-
HHD	0,00000000	-	0,00000000
Prony	0,00014400	0,00030277	0,00000010
Kalman	3,72347964	8,45654778	-
ÇİS	2,00000000	-	2,00000000
EKK	0,01739945	0,34638889	-
N-EKK	0,00992200	0,38566389	-
S-EKK	0,02886745	0,36158333	-

$v(t) = \sqrt{2}\{220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\}$ için temel frekans 50 Hz, $\omega=2\pi 50$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır.



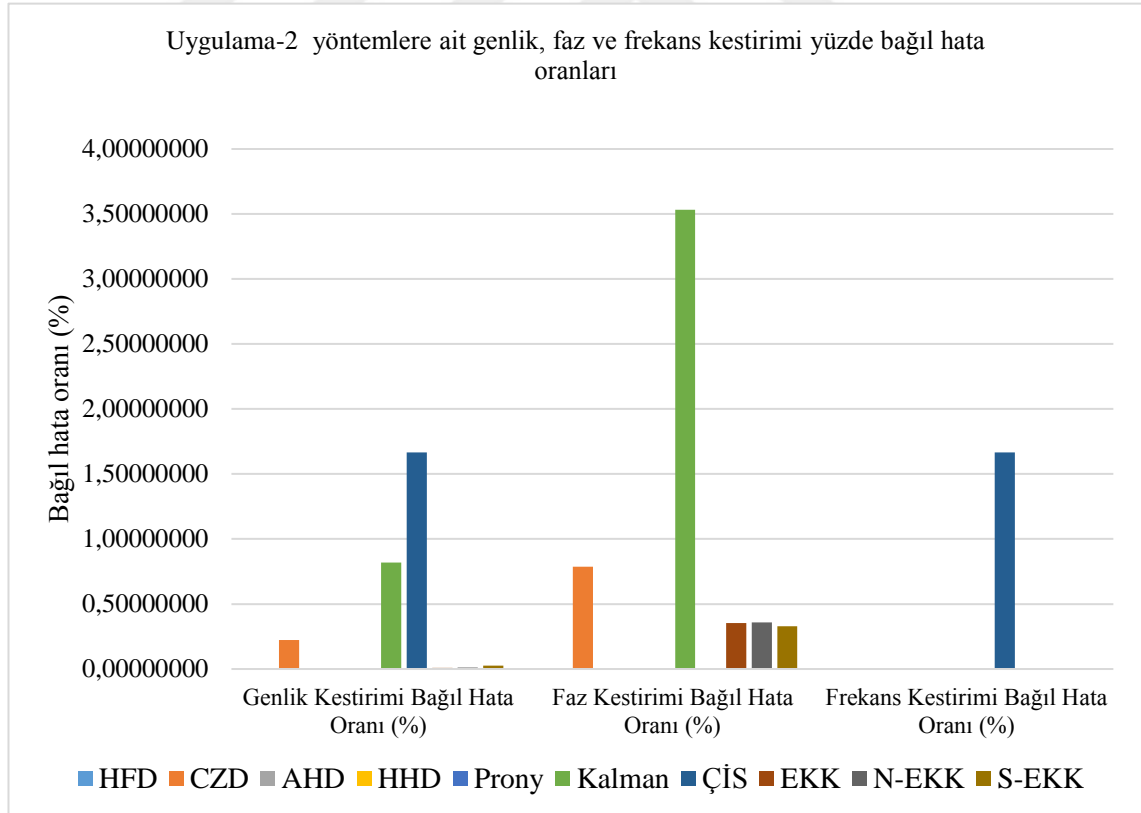
Şekil 4.19. Uygulama-1 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları grafiği

Uygulama-2 için genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl oranlarına ait veriler Çizelge 4.60'ta yer almaktadır. Çizelge 4.60'taki verilerin grafikleri Şekil 4.20'da gösterilmiştir. Genlik kestirimi bağıl hatası CZD, ÇİS ve Kalman filtresi yöntemlerinde; faz kestirimi bağıl hatası CZD, Kalman filtresi ve adaptif filtre yöntemlerinde; faz kestirimi bağıl hatası ise ÇİS yönteminde bulunmaktadır (Şekil 4.20). Faz kestiriminde verisi bulunmayan yöntemler; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Frekans kestiriminde verisi bulunan yöntemler; HHD, Prony ve ÇİS yöntemleridir. Yöntemlerden genlik, faz ve frekans kestirimini gerçekleştiren Prony yöntemidir. Prony yöntemi bu işlemleri sıfır bağıl hata oranı ile gerçekleştirmiştir. Genlik ve faz kestiriminde bağıl hata oranı sıfır olan HFD yöntemidir. Frekans kestiriminde bağıl hata oranı sıfır olan HHD yöntemidir.

Çizelge 4.60. Uygulama-1 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları

Yöntem	Genlik Kestirimi Bağıl Hata Oranı (%)	Faz Kestirimi Bağıl Hata Oranı (%)	Frekans Kestirimi Bağıl Hata Oranı (%)
HFD	0,00000000	0,00000000	-
CZD	0,22289394	0,78686667	-
AHD	0,00000000	-	-
HHD	0,00000000	-	0,00000000
Prony	0,00000000	0,00000000	0,00000000
Kalman	0,81812879	3,53156111	-
ÇİS	1,66666667	-	1,66666667
EKK	0,00938258	0,35396667	-
N-EKK	0,01027652	0,35763889	-
S-EKK	0,02580303	0,32998889	-

$v(t)=\sqrt{2}\{110\cos(\omega t-45^\circ)+33\cos(3\omega t+75^\circ)+22\cos(7\omega t+30^\circ)+11\cos(15\omega t-15^\circ)\}$
için temel frekans 60 Hz, $\omega=2\pi 60$ olmak üzere; örnekleme frekansı 5 kHz, 2000 örnek işaret için 2 tam periyot kullanılmıştır



Şekil 4.20. Uygulama-2 için yöntemlere ait genlik, faz ve frekans kestirimi bağıl hata oranları grafiği

4.12. Güç Kalitesi Parametrelerinin Analizi

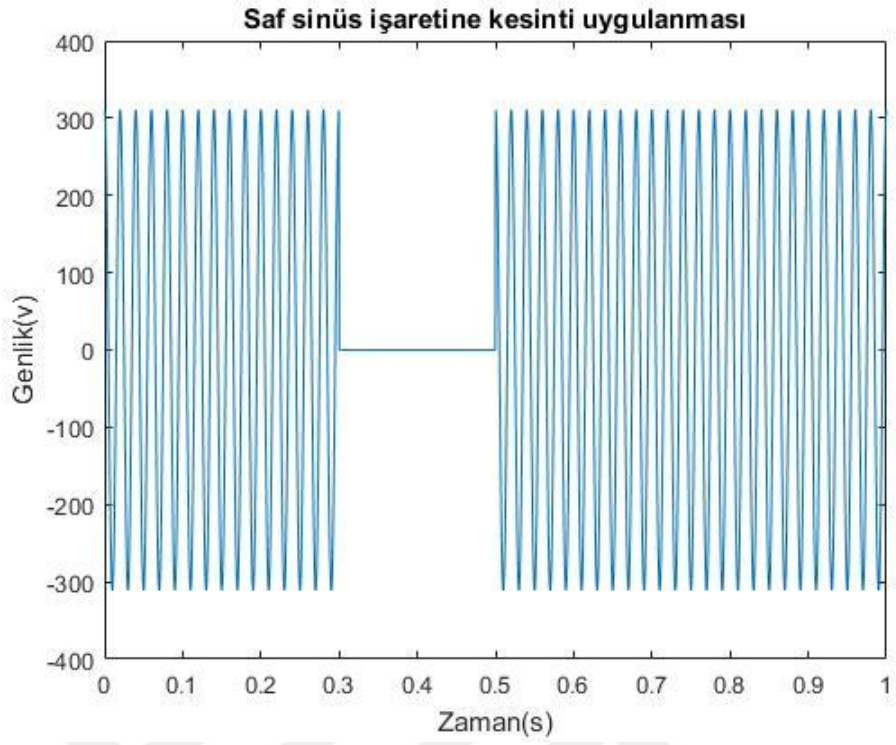
Yaygın olarak kullanılan şekli ile geçici olaylar, bir sistemin bir kalıcı durumdan diğerine geçişi sırasında meydana gelen değişikliklerdir. Farklı bozulma türlerinin büyüklüğü ve süresine göre sınıflandırılması gerekmektedir. IEEE 1159'e göre farklı oluşumların karakteristik matematiksel modelleri kullanılmıştır (IEEE 2019). Çalışma kapsamında yer alan yöntemlerle güç kalitesi bozulma parametrelerinin uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Güç sistemi bozulmaları bu çalışmada kullanılan durumları incelendiğinde işaret modellerine ait faz bilgisi olmadığı durumlarda Hilbert-Huang dönüşümü (HHD) yöntemi hata oranında sıfıra yakınlıkla öne çıkmaktadır. Bu durumların uygulamasına ilişkin aşağıda belirli verilerle benzetim gerçekleştirilmiştir.

Örnek işareti, temel harmonik 220 V efektif değerli genlik ve 50 Hz frekans içerirken 0,3 ile 0,5 s. arasında gerilim kesintisi uygulanmaktadır. Gerilim kesintisi giriş işareti Şekil 4.21'da ve çıkış işaretinin frekans tepkisi Şekil 4.22'de görülmektedir. Gerilim kesintisi 0,301-0,497 s. arasında kesinti uygulandığı görülmektedir (Şekil 4.22). Frekans bu süre zarfında biraz artmış olsa da, gerilim sıfıra düşürüldüğünde ideal kesinti olarak ayarlanmaktadır ve anlık gerilim kesintisini tespit etmek için önemli olan kesintiyi tespit etmektir. Başlangıç ve bitiş zamanında, HHD yöntemi ile anlık gerilim kesintisinin tespit edilmesinin mümkün ve doğru olduğu düşünülebilmektedir.

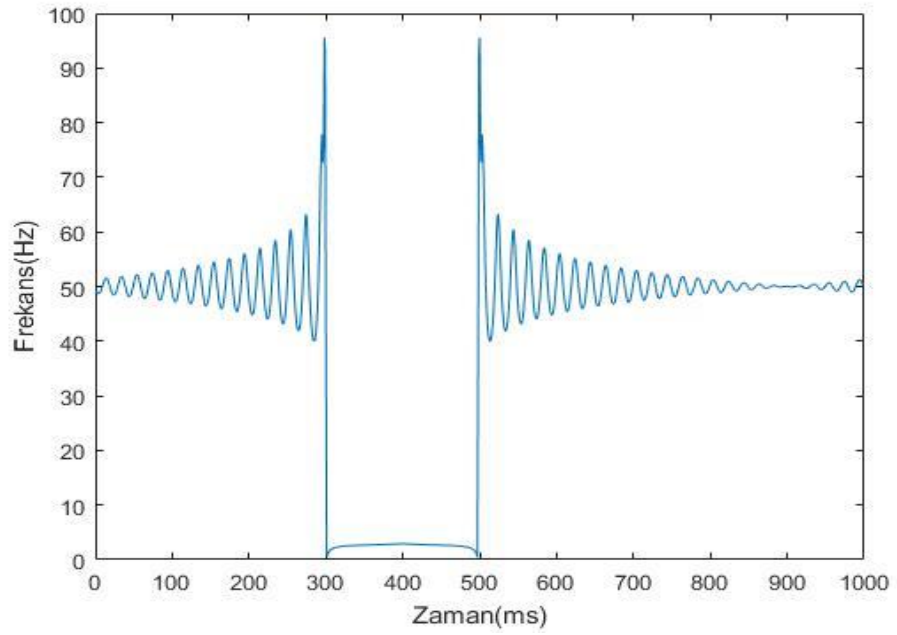
Çizelge 4.61'de çalışmada yer alan yöntemlerin *saf sinüs dalgası* uygulandığı durumdaki hata oranı karşılaştırmaları verilmiştir. Çizelge 4.61'da görüldüğü gibi HFD, AHD, HHD ve Prony yöntemlerinde bağıl hata oranı sıfır olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.62'de çalışmada yer alan yöntemlerin *gerilim çökmesi* işareti uygulandığı durumdaki hata oranı karşılaştırmaları verilmiştir. Çizelge 4.62'de görüldüğü gibi HFD, AHD, HHD ve Prony yöntemlerinde bağıl hata oranı sıfır olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.63'te çalışmada yer alan yöntemlerin *gerilim sıçraması* işareti uygulandığı durumdaki hata oranı karşılaştırmaları verilmiştir. Çizelge 4.63'de görüldüğü gibi HFD, AHD, HHD ve Prony yöntemlerinde bağıl hata oranı sıfır olarak bulunmuştur.

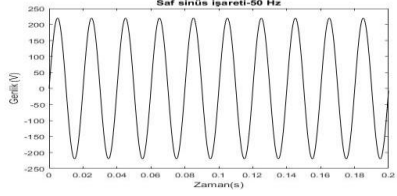


Şekil 4.21. Saf sinüs işaretine kesinti uygulanması



Şekil 4.22. Zaman – frekans karakteristik eğrisi

Çizelge 4.61. Saf sinüs dalgası uygulandığında yöntemlerde oluşan bağıl hata oranları

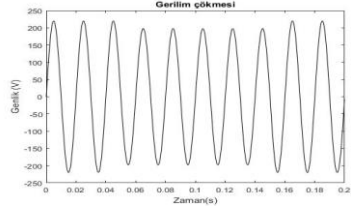
Saf sinüs dalgası			
$v(t)=A(\mu(t-t_1)-\mu(t-t_2))\sin(\omega t)$ Parametreler $f = 50 \text{ Hz}, \omega=2\pi 50$ $A = 220 V_{RMS}, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$			
Yöntem	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağıl hata oranı (%)
HFD	220,0000000	220,0000000	0,0000000
CZD	220,0000000	220,2031000	0,0923182
AHD	220,0000000	220,0000000	0,0000000
HHD	220,0000000	220,0000000	0,0000000
Prony	220,0000000	220,0000000	0,0000000
Kalman	220,0000000	220,0097000	0,0044091
ÇİS	220,0000000	220,0660000	0,0300000
EKK	220,0000000	220,0019000	0,0008636
N-EKK	220,0000000	220,0022000	0,0010000
S-EKK	220,0000000	219,9631000	0,0167727

Çizelge 4.64’te çalışmada yer alan yöntemlerin *harmonik* işareti uygulandığı durumdaki hata oranı karşılaştırmaları verilmiştir. Çizelge 4.64’de görüldüğü gibi HFD, AHD, HHD ve Prony yöntemlerinde bağıl hata oranı sıfır olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.65’te çalışmada yer alan yöntemlerin *gerilim kesintisi* işareti uygulandığı durumdaki hata oranı karşılaştırmaları verilmiştir. Çizelge 4.65’te görüldüğü gibi gerilim kesintisi durumunda tüm yöntemlerde hata oranı gözlemlenmiştir.

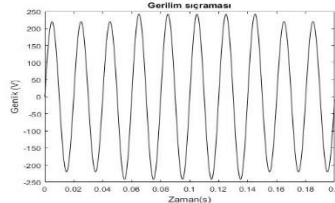
Çizelge 4.66’da çalışmada yer alan yöntemlerin *DA bileşeni* işareti uygulandığı durumdaki hata oranı karşılaştırmaları verilmiştir. Çizelge 4.66’da görüldüğü gibi HFD, AHD, HHD ve Prony yöntemlerinde bağıl hata oranı sıfır olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.62. Gerilim çökmesi işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması

<p>Gerilim çökmesi</p> $v(t)=A \left(1-\alpha(\mu(t-t_1)-\mu(t-t_2))\right) \sin(\omega t)$ <p>Parametreler</p> $f = 50 \text{ Hz}, \omega=2\pi 50, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ $A = 220 V_{RMS}, 0,1 \leq \alpha \leq 0,9$			
Yöntem	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD	198,0000000	198,0000000	0,0000000
CZD	198,0000000	198,1934000	0,0976768
AHD	198,0000000	198,0000000	0,0000000
HHD	198,0000000	198,0000000	0,0000000
Prony	198,0000000	198,0000000	0,0000000
Kalman	198,0000000	198,0122000	0,0061616
ÇİS	198,0000000	198,0594000	0,0300000
EKK	198,0000000	198,0018000	0,0009091
N-EKK	198,0000000	197,9969000	0,0015657
S-EKK	198,0000000	197,9688000	0,0157576
$A = 220 * 0,9 = 198 V_{RMS}$ olarak gerilim uygulanmıştır.			

Çizelge 4.67, Çizelge 4.68 ve Çizelge 4.69’da çalışmada yer alan yöntemlerin *gürültü bileşeni* işareti uygulandığı durumdaki hata oranı karşılaştırmaları verilmiştir. SNR sırasıyla 0, 20, 40, 60 ve 80 olarak seçilmiştir. Çizelge 4.67, Çizelge 4.68 ve Çizelge 4.69’da yer alan hata verileri incelendiğinde temel frekansta iken SNR sırasıyla 0, 20, 40, 60 ve 80 durumlarında yöntemler farklı oranlarda hata vermiştir. Gürültü işaret bileşenine ait gerçek referans değerler HHD yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yüzden HHD yönteminde bağlı hata oranı sıfır bulunmuştur.

Çizelge 4.63. Gerilim sıçraması işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması

Gerilim sıçraması $v(t)=A(1+\alpha(\mu(t-t_1)-\mu(t-t_2)))\sin(\omega t)$ Parametreler $f = 50 \text{ Hz}, \omega=2\pi 50, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ $A = 220 V_{Rms}, 0,1 \leq \alpha \leq 0,9$			
Yöntem	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağıl hata oranı (%)
HFD	242,0000000	242,0000000	0,0000000
CZD	242,0000000	242,2363000	0,0976446
AHD	242,0000000	242,0000000	0,0000000
HHD	242,0000000	242,0000000	0,0000000
Prony	242,0000000	242,0000000	0,0000000
Kalman	242,0000000	241,5355000	0,1919421
ÇİS	242,0000000	242,0726000	0,0300000
EKK	242,0000000	242,0006000	0,0002479
N-EKK	242,0000000	242,0016000	0,0006612
S-EKK	242,0000000	241,9533000	0,0192975
$A = 220 * 1,1 = 242 V_{Rms}$ olarak gerilim uygulanmıştır.			

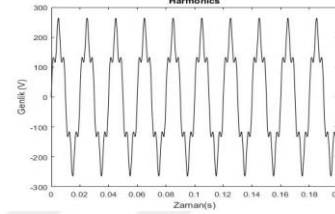
Hareketli ortalama filtresi, gürültülü verileri düzeltmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Ortalamaları hesaplamak için *filter* fonksiyonu ile kullanır (MATLAB 2017). Hareketli ortalama filtresi, veriler boyunca bir uzunluk penceresi (N) kaymaktadır. Her pencerede bulunan verilerin ortalamalarını hesaplamaktadır. Eş. (4.25)'te yer alan fark denklemi, bir vektörün hareketli ortalama filtresini tanımlamaktadır. Burada N , pencere boyutunu temsil etmektedir.

$$y(n) = \frac{1}{N}(x(n) + x(n-1) + \dots + x(n-(N-1))) \quad (4.25a)$$

$$v(t) = A\sin(\omega t) + y(n) \quad (4.25b)$$

220V etkin değerli genlik 50 Hz temel frekanslı işarete 5 kHz örnekleme frekansına sahip 50. harmonik bileşene ait filtre uygulamak için $N = 20$ seçilmiştir (izelge 4.70). Çizelge 4.70'te görüldüğü gibi yöntemlerde hata oranı farklı iken HHD yönteminde hata oranı sıfır olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.64. Harmonikli işaret uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması

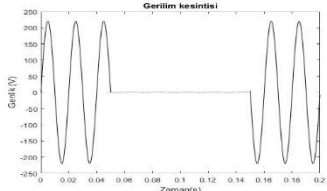
<p>Harmonikli işaret $v(t) = A(\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t))$ Parametreler $f = 50 \text{ Hz}, \omega = 2\pi 50, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ $A = 220 V_{RMS}, 0,05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0,15$</p>			
Yöntem	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD	225,61030000	225,61030000	0,000000
CZD	225,61030000	225,92590000	0,1398872
AHD	225,61030000	225,61030000	0,000000
HHD	225,61030000	225,61030000	0,000000
Prony	225,61030000	225,61030000	0,000000
Kalman	225,61030000	224,69210000	0,4069850
İS	225,61030000	225,67800000	0,0300075
EKK	225,61030000	225,61310000	0,0012411
N-EKK	225,61030000	225,60630000	0,0017730
S-EKK	225,61030000	225,57630000	0,0150702
$A_1 = 220 V_{RMS}$ ve $A_5 = 50 V_{RMS}$ olarak gerilim uygulanmıştır.			

Güç kalitesi bozulma parametrelerinin bu çalışmada kullanılan durumları sırasıyla; gerilim okmesi, gerilim sıçraması, harmonikli bileşen, gerilim kesintisi, gürültü bileşen ve DA bileşenine ait durumlardır. Bu parametrelerin yanı sıra hareketli ortalama filtresi kullanılarak bozulma olan işaretin yöntem uygulamaları yer almaktadır. Güç kalitesi bozulma parametrelerinin bu çalışmada kullanılan durumlarına ait hata oranı grafiği Şekil 4.23'te verilmiştir.

Şekil 4.23'te yer alan hata oranlarına ait sonuçlar incelendiğinde HHD yöntemi tüm durumlara karşı hata oranı en düşük olan yöntem olarak öne çıkmaktadır. ÇİS ve Kalman filtresi yöntemleri bozulmalara karşı en yüksek hata oranını verdiklerinden hassas yöntemler olarak nitelendirilebilir, bozulmaların olmadığı ideal bir ortamda kullanılmaya elverişlidir. Adaptif filtre kestirim yöntemleri incelendiğinde gürültü hassasiyeti oldukça yüksektir. İdeal olmayan durumlarda da çalışabilir.

Yöntemlere ait performanslarını etkileyen özellikler 4. Bölümde kendi başlıklarında verilmiş olup bu bölümde karşılaştırma tablosu sunulmuştur. Çizelge 4.71'de sunulan yöntemlerin genlik, faz ve frekans bileşenlerini hesaplayabilme durumlarına ait bilgiler yer almaktadır.

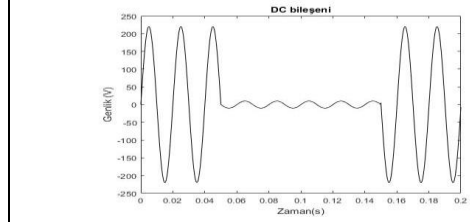
Çizelge 4.65. Gerilim kesintisi işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması

Gerilim kesintisi			
$v(t)=A \left(1-\alpha(\mu(t-t_1)-\mu(t-t_2)) \right) \sin(\omega t)$			
Parametreler			
$f = 50 \text{ Hz}, \omega=2\pi 50, T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$			
$A = 220 V_{RMS}, 0,9 \leq \alpha \leq 1,0$			
Yöntem	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD	0,2200000	0,2250000	2,2727273
CZD	0,2200000	0,2190000	0,4545455
AHD	0,2200000	0,2369000	7,6818182
HHD	0,2200000	0,2328000	5,8181818
Prony	0,2200000	0,2240000	1,8181818
Kalman	0,2200000	0,2419400	9,9727273
ÇİS	0,2200000	0,2201000	0,0454545
EKK	0,2200000	0,2162000	1,7272727
N-EKK	0,2200000	0,2231000	1,4090909
S-EKK	0,2200000	0,2220000	0,9090909
Kesinti katsayısı 10^{-3} olarak seçilmiştir.			

Çizelge 4.66. DA bileşeni işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması

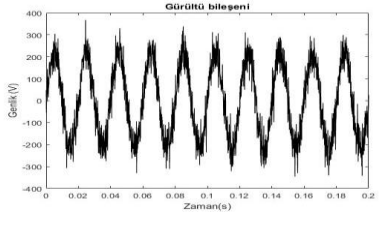
Yöntem		Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD		10,00000000	10,00000000	0,00000000
CZD		10,00000000	10,11720000	1,1720000
AHD		10,00000000	10,00000000	0,00000000
HHD		10,00000000	10,00000000	0,00000000
Prony		10,00000000	10,00000000	0,00000000
Kalman		10,00000000	10,02930000	0,2930000
ÇİS		10,00000000	10,00300000	0,0300000
EKK		10,00000000	10,35770000	3,5770000
N-EKK		10,00000000	10,32930000	3,2930000
S-EKK		10,00000000	10,32920000	3,2920000

$A_{da} = 0,0455$ olarak seçilmiştir.



Çizelge 4.71’de görüldüğü gibi Prony yöntemi işarete ait genlik, faz ve frekans bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Tüm yöntemler genlik kestirimi yapabilmektedir. Ancak faz kestirimi gerçekleştiremeyen yöntemler; AHD, HHD ve ÇİS yöntemleridir. Bu yöntemler içerisindeki AHD, işaret içerisindeki faz bilgisinden etkilendiğinde doğruluk bilgisinden uzaklaşmaktadır. HHD yöntemi ise anlık spektral genlik ve faz bilgisini kestirirken giriş işaretindeki faz bilgisi ile anlık faz bilgisi arasındaki ilişki anlamlandırılmamıştır. Bu yüzden HHD yönteminde faz kestirimi yapılamamıştır. Frekans kestirimi gerçekleştiren yöntemler sırasıyla; HHD, Prony ve ÇİS yöntemleridir. ÇİS yöntemi, temel frekansı kestirimini gerçekleştirmektedir. HHD ve Prony yöntemleri ise tüm bileşenlerdeki frekansın kestirimini gerçekleştirebilmektedir.

Çizelge 4.67. Gürültü bileşeni işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması

Gürültü bileşeni $v(t) = A\sin(\omega t) + \varepsilon(t)$ Parametreler $f = 50 \text{ Hz}, \omega=2\pi 50, A = 220 V_{RMS}$ $SNR=20 \log_{10} \frac{V_{RMS}}{\varepsilon_{RMS}}, SNR < A*0,01$			
Yöntem	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD	247,03750000	233,84900000	5,3386632
CZD	247,03750000	241,18120000	2,3706117
AHD	247,03750000	235,82000000	4,5408086
HHD	247,03750000	247,03750000	0,0000000
Prony	247,03750000	236,53000000	4,2534028
Kalman	247,03750000	230,01330000	6,8913424
ÇİS	247,03750000	229,30880000	7,1765218
EKK	247,03750000	231,03540000	6,4775996
N-EKK	247,03750000	231,03210000	6,4789354
S-EKK	247,03750000	230,28730000	6,7804281
Gerçek referans değerler HHD yöntemi ile belirlenmiştir.			

Hesaplama yükü, gerçek zamanlı uygulamalar için spektral kestirim tekniklerinin uygunluğuna karar veren temel performans değerlendirme kriteri olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada yer alan yöntemlerin nispi hesaplama yükü Çizelge 4.72’de sunulmaktadır. HFD’deki pencereleme ve enterpolasyonu, N . sırasına göre bazı ilave işlemlere ihtiyaç duymaktadır. Parametrik yöntemlerin çoğu, yüksek çözünürlük gerektirir, çünkü özdeş ayrışma ya da matris tersini içerir; her biri, sırasıyla $n \times m$ ve $n \times n$ matrisler için sırasıyla $m^2 n$ ve n^3 gereksinimlere sahiptir (Jain ve Singh 2011). Adaptif filtre uygulamaları ve Kalman filtresinde, giriş işaretindeki bileşenlerin filtreye uygun şekilde düzenlenmesi gerekmektedir.

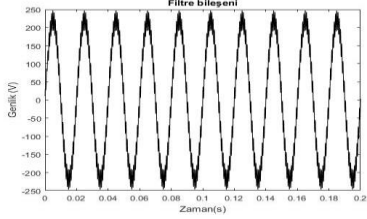
Çizelge 4.68. Gürültü bileşen işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması (devam)

Yöntem	Gürültü (SNR=20)			Gürültü (SNR=40)		
	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD	220,5206	224,47600	1,7936646	219,92690	208,60300	5,1489381
CZD	220,5206	220,40160	0,0539632	219,92690	218,82590	0,5006209
AHD	220,5206	223,73570	1,4579590	219,92690	217,07360	1,2973856
HHD	220,5206	220,52060	0,0000000	219,92690	219,92690	0,0000000
Prony	220,5206	219,29670	0,5550048	219,92690	219,30530	0,2826394
Kalman	220,5206	219,98400	0,2433333	219,92690	220,01850	0,0416502
ÇİS	220,5206	220,19800	0,1462902	219,92690	220,52810	0,2733636
EKK	220,5206	220,04060	0,2176667	219,92690	220,00170	0,0340113
N-EKK	220,5206	219,99880	0,2366219	219,92690	220,00070	0,0335566
S-EKK	220,5206	219,95970	0,2543527	219,92690	219,95820	0,0142320
Gerçek referans değerler HHD yöntemi ile belirlenmiştir.						

Çizelge 4.69. Gürültü bileşen işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması (devam)

Yöntem	Gürültü (SNR=60)			Gürültü (SNR=80)		
	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD	220,002300	220,859500	0,3896323	220,000600	220,878600	0,3990898
CZD	220,002300	220,157900	0,0707265	220,000600	220,158700	0,0718634
AHD	220,002300	222,963800	1,3461223	220,000600	222,963100	1,3465872
HHD	220,002300	220,002300	0,0000000	220,000600	220,000600	0,0000000
Prony	220,002300	219,202500	0,3635417	220,000600	219,102000	0,4084534
Kalman	220,002300	219,927400	0,0340451	220,000600	219,550300	0,2046813
ÇİS	220,002300	221,562400	0,7091290	220,000600	224,533300	2,0603126
EKK	220,002300	220,001600	0,0003182	220,000600	220,001700	0,0005000
N-EKK	220,002300	219,996400	0,0026818	220,000600	219,998600	0,0009091
S-EKK	220,002300	219,968100	0,0155453	220,000600	219,958200	0,0192727
Gerçek referans değerler HHD yöntemi ile belirlenmiştir.						

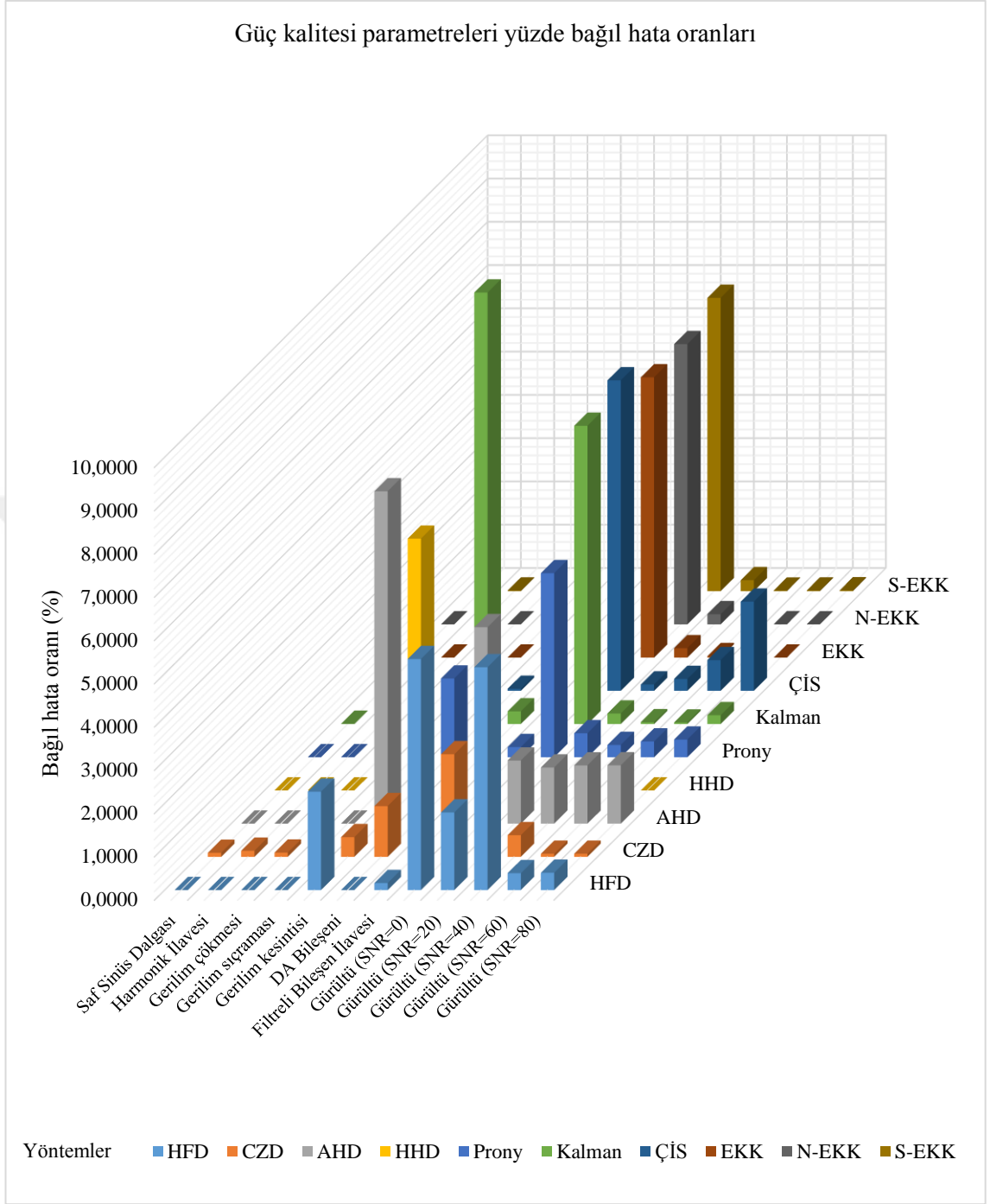
Çizelge 4.70. Filtreli bileşen işareti uygulandığında yöntemlerde oluşan hataların karşılaştırılması

Filtre bileşeni $v(t) = A\sin(\omega t) + y(t)$			
Parametreler $f = 50 \text{ Hz}, \omega = 2\pi 50, A = 220 V_{RMS}$ $y(n) = \frac{1}{N}(x(n) + x(n-1) + \dots + x(n-(N-1))),$ $N = 20$			
Yöntem	Gerçek (V_{RMS})	Kestirilen (V_{RMS})	Bağlı hata oranı (%)
HFD	220,52060000	220,87860000	0,1623431
CZD	220,52060000	220,17600000	0,1562666
AHD	220,52060000	220,17870000	0,1550422
HHD	220,52060000	220,52060000	0,0000000
Prony	220,52060000	220,00000000	0,2360777
Kalman	220,52060000	220,19780000	0,1463809
ÇİS	220,52060000	220,14190000	0,1717300
EKK	220,52060000	220,03730000	0,2191632
N-EKK	220,52060000	220,03850000	0,2186190
S-EKK	220,52060000	220,00540000	0,2336290

Gerçek referans değerler HHD yöntemi ile belirlenmiştir.

Çizelge 4.71. Çalışmada sunulan yöntemlerin parametre hesaplayabilme durumları

Yöntem	Genlik Kestirimi	Faz Kestirimi	Frekans Kestirimi
HFD	√	√	-
CZD	√	√	-
AHD	√	-	-
HHD	√	-	√
Prony	√	√	√
Kalman	√	√	-
ÇİS	√	-	√
EKK	√	√	-
N-EKK	√	√	-
S-EKK	√	√	-



Şekil 4.23. Çalışmada yer alan güç kalitesi parametrelerinin hata grafiği

Hızlı Fourier dönüşümü, spektrum analizinde en kullanışlı araçtır. HFD uygulamaları, çevrim içi ölçme araçlarından çevrim dışı analiz araçlarına kadar değişebilmektedir. HFD, yeterince geniş pencere boyutuna sahipse, uygun örnek sayısı, besleme frekansı ve küçük örnekleme zamanı ile özenle senkronize edilmekte, karşılaştırma ve ölçümleme için referans olarak kullanılabilen en doğru sonuçlara yüksek çözünürlük sağlamaktadır.

Çizelge 4.72. Çalışmadaki bazı yöntemlerin hesaplama karmaşıklığı karşılaştırması.

Yöntem	Hesaplama yükü	Açıklamalar
AFD	N^2	Sayı tabanı-2
HFD	$(N/2)\log_2 N$	Filtre yaklaşımı, sonsuz diziler
CZD	$\log_2(N + M - 1)$	Birim çember sınırları içindeki diziler
AHD	$N\log_2 N$	İki aşamalı hesaplamalı
HHD	N	İşlem sonucu oluşan veri analizi
Prony	N^2	Yüksek hesaplama süresi
ÇİS	N^2	Frekans arama işlemi ile yüksek hesaplama süresi
Kalman	N^2	Önsel bilgi gereksinimi
EKK	$2N + 1$	Kararlılık, yakınsama
N-EKK	$3N + 1$	Yüksek hesaplama süresi
S-EKK	$2N + 1$	Negatif adım büyüklüğü

N , veri örneklerinin sayısı, M , kestirim numarasıdır.

Hilbert-Huang Dönüşümü tekniği doğrusal olmayan ve zamanla değişen işaretlerin oldukça iyi analizini sağlamaktadır. Prony gibi parametrik yöntemler, frekans çözünürlüğünün hesaplama hızından daha önemli olduğu durumlarda uygundur. Bunlar genellikle alt harmonik kestirimi için kullanılmaktadır. Çoklu işaret sınıflandırması özellikle kısa periyotlu verilerin bulunduğu durumlarda uygundur. Fakat veriler, iyi sonuçlar elde etmek için mümkün olduğunca az gürültü içermesi gerekmektedir. Kalman filtresi, gürültüye karşı dayanıklı olmasına rağmen gürültüye ve sürece ilişkin önceden bilgiye ihtiyaç duymaktadır. (Jain ve Singh 2011).

5. SONUÇ

Güç kalitesini etkileyen parametrelerden harmoniklerin belirlenmesi ile ilgili yöntemlerin karşılaştırılması literatürde geniş yer tutmaktadır. Harmonikler ile ilgili araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar genellikle harmoniklerin ölçülmesi, modellenmesi, kestirimi konuları üzerine yoğunlaşmaktadır ve çeşitli öneriler bulunmaktadır. Bu konuda yapılmış çalışmalar sistemdeki akım ya da gerilimi örnekledikten sonra işaretin içerisinde bulunan bileşenlerin genlik, frekans ve faz açılarını bulmayı amaçlamaktadır. Güç sistemi harmonikleri kestirim teknikleri hakkındaki mevcut literatürün kapsamlı bir derlemesi bu çalışmada sunulmuştur. Her yöntemin problemleri, mevcut çözümleri ve zorluklar çok sayıda araştırma makalesinden ortaya çıkarılmıştır. Çalışmada yer alan yöntemlerle ilgili benzetim sonuçları incelendiğinde;

- *Hızlı Fourier dönüşümü* yöntemi, işarete ait genlik, DA ve faz bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Kullanılan örnekleme işaret sayısı arttıkça doğruluk artarken program için işlem yükü de artmaktadır. İçerik olarak basit ve hızlıdır. Çok hızlı işlem yaptığından zaman bilgisi kaybolur, dolayısıyla geçici bilgileri algılayamaz.
- *Chirp z-dönüşümü* yöntemi, işarete ait genlik, DA ve faz bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Kullanılan örnekleme işaret sayısı arttıkça doğruluk artarken program için işlem yükü de artmaktadır. Veri örnekleme ve örneklerin sayısında esnektir. Daha zor bir yapıya sahiptir. Harici veri depolama gereksinimi duymaktadır.
- *Hartley dönüşümü* yöntemi, işarete ait genlik ve DA bileşenini hesaplayabilmektedir. İki aşamalı bir hesaplama gerekmektedir. Bu zorunluluk hesaplama hızına olumsuz etki etmekte ancak sonuçlar doğru olmaktadır. Kullanılan örnekleme işaret sayısı arttıkça doğruluk artarken program için işlem yükü de artmaktadır.

- *Hilbert – Huang dönüşümü* yöntemi, işarete ait genlik ve frekans bileşenlerini hesaplayabilmektedir. İşlem sonucu elde edilen veriyi işleyerek bir sonraki adıma geçmesi zaman açısından olumsuz olarak nitelendirilmesine neden olmaktadır. Temel fonksiyon (ÖKI) kullanıldığından işlem basamaklarının ayrıntıları analiz edilebilmektedir. İşlem sonucunda dönüştürülmüş parametreler olduğundan dolayı yorumlanması için ek fonksiyonlara gerek duyulmaktadır.
- *Prony yöntemi*, işarete ait frekans, genlik, faz ve sönüm faktörünü hesaplayabilmektedir. Çok yüksek çözünürlükte ve bu yüzden hassas yapıdadır. Gürültü ve örnek uyumsuzluğuna oldukça eğilimli olduğundan dolayı sayısal olarak verimli değildir.
- *Çoklu işaret sınıflandırması* yöntemi, işarete ait frekans ve genlik bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Kısa veri uzunluğu ile iyi doğruluk sağlamaktadır. Frekans arama aralığına ilişkin önsel bilgi gerektirir yani harici frekans aralığını bulma fonksiyonu kullanımı zorunludur. Harici fonksiyon gereksiniminden dolayı da hesaplama süresi artmaktadır.
- *En Küçük Ortalama Kare (EKK)* yöntemi, işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Adım büyüklüğünün ve filtre uzunluğunun doğru olarak seçimi önemlidir. Bu değerleri önceden belirlemek kullanıcı için ek zaman kaybına neden olmaktadır. Filtreye girmeden önce bileşeni filtreye uygun olarak hazırlanması gerekmektedir. Aksi takdirde filtre çalışamayacağından sonuç alınamayacaktır.
- *Normalleştirilmiş En Küçük Ortalama Kare (NEKK)* yöntemi, işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Başarım açısından doğruya en yakın olanıdır. Ancak başarım hızı daha yavaştır. Ek işlem yapması doğruluğu sağlarken uygulamaya ek yük sunmaktadır.
- *Sızdıran En Küçük Ortalama Kare (Sızdıran-EKK)* yöntemi ile işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Adım büyüklüğü, filtre

uzunluğunun ve sızdırma faktörünün doğru olarak seçimi önemlidir. Bu değerleri önceden belirlemek kullanıcı için ek zaman kaybına neden olacaktır.

- *Kalman Filtresi* yöntemi, işarete ait genlik, faz ve DA bileşenlerini hesaplayabilmektedir. Zamana bağlı değişen parametreleri inceleyebilmektedir. Durum değişkenli modelleme önemlidir. Doğru matrislere ulaşmak zaman kaybına yol açmaktadır. Gürültüye karşı dayanıklı olmasına rağmen gürültüye ve sürece ilişkin önceden bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak; hızlı Fourier dönüşümü, pencerelemeli enterpolasyon ve eşleme olanaklarıyla en yaygın teknik olarak gösterilmekte, belirli sınırlar içinde doğruluk sağlamaktadır. Ayrıca, depolama ve aktarma amaçları için ölçülen verilerin artan miktarıyla önemli hale gelen geçici bozuklukları ve veri sıkıştırma yöntemini belirleme yeteneğine sahiptir. Model tabanlı parametrik teknikler veri sıkıştırma için de yeterlidir; ancak bunlar yalnızca hesaplama yükünü azaltmak için değil, aynı zamanda gürültüye karşı bağımsızlığı geliştirmek için yoğun araştırmalar gerektirmektedir. KF yaklaşımı basit ve dayanıklıdır, fakat gürültü hakkında önsel bilgi mevcut değilse doğruluk etkilenmektedir. Gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, harmonik bozulma, gerilim kesintisi, DA bileşeni, gürültü, hareketli ortalama filtresi gibi güç kalitesi parametrelerindeki sonuçlar değerlendirildiğinde belirtilen diğer yöntemlere kıyasla Hilbert-Huang dönüşümü yöntemi doğru sonuçlar vermektedir. Eğim düşüm tabanlı adaptif filtrelerle kestirim sağlanırken filtreden önce uygun biçimde veri giriş işlemi gerektirmektedir. Prony yönteminde tüm parametreler kestirilmekte olup ÇİS yöntemiyle frekans kestirimi gerçekleştirilirken frekans arama fonksiyonuna ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada tezin sınırları gereği yöntemlerin ilkel halleri temel alındığından hibrit yöntemler ile ilgili işlem yapılmamıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle yapay zekâ tabanlı uygulamalar geniş yer tutmaktadır. Bu uygulamaları güç sistemi problemlerine göre uyarlayabilir ve harmonik kestirimlerinde daha detaylı çalışmalar gelecek çalışmalarda sunulabilir.

Çizelge 5.1. Parametrik olmayan yöntemlerin karşılaştırılması

Teknik & Yöntem	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları
HFD	+Basit +Hızlı	-Sızıntı ve picket-fence etkisi -Basamaklanma -Zaman bilgisi kaybolur, dolayısıyla geçici bilgileri algılayamaz.	-Sabit temel frekans ile sabit ve lineer işaret
CZD	+Veri örnekleme ve örneklerin sayısında esneklik	-Hesaplama yükü açısından daha zahmetli -Ek veri depolama gereksinimi	- Bir örnek hızından diğerine verilerin zaman enterpolasyonu ile aktarımı - Senkronizasyon
AHD	+ Karmaşık aritmetiği önler. + Kesme ve yuvarlama hatasına yol açabilecek işlemleri azaltır.	-Karmaşık ve gerçek veri dizileri için veri depolama gereksinimi	- Akustik ve ses işleme, güç spektrumu analizi - Adaptif anten dizileri - Güç mühendisliği uygulamaları
HHD	+ İşlem sonucu elde edilen veriyi işleme. + Temel fonksiyon (ÖKİ) uyarlanabilir.	-Dönüştürülmüş parametrelerin yorumlanması için ek araçların gereksinimi	-Doğrusal olmayan ve sabit olmayan işaret -Çevrimdışı analiz

Çizelge 5.2. Parametrik yöntemlerin karşılaştırılması

Teknik & Yöntem	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları
PRONY	+ İşaretin tüm özelliklerini saptayabilir: frekans, genlik, faz ve sönüm faktörü + Çok yüksek çözünürlük	-Hesaplama yükü açısından verimsiz -Gürültü ve örnek uyumsuzluğuna oldukça eğilimli	- Doğrusal davranan veriler için uygun - Hassas çevrim dışı analizi
ÇİS	+ Kısa veri uzunluğu ile iyi doğruluk	- Frekans arama aralığına ilişkin önsel bilgi gereklidir. - Yüksek hesaplama süresi	- Çevrim dışı uygulamalar - Yüksek hassasiyetli frekans tanımlama
KF	+ Gürültüye karşı dayanıklı + Yinelemeli + Zamana bağlı değişen parametreleri izleyebilme	- Durum değişkenli modelleme önemlidir. - Kolayca filtreden çıkma - Gürültüye ve sürece ilişkin önsel bilgi gereklidir.	- Sürece ilişkin yeterli bilgi ile gürültülü zamanla değişen işaret analizi - Çevrim içi kontrol uygulamaları
EKK	+ Basit + Yinelemeli	-Doğru adım sayısının seçilmesi; kararlılık, yakınsama ve sabit durum davranışını etkiler.	
N-EKK	+Giriş işaretinin gücü normalleştirilerek kestirim doğruluğu iyileştirilir.	-Hesaplama yükü açısından verimsiz -Giriş verisinin uygun parametre ihtiyacı	-Sistem tanımlama -İşaret kontrolü -İşaret kestirimi -Haberleşme
S-EKK	+Sürüklenme problemini azaltma +Sızdıran faktörü ile kararlılığa yaklaşma	-Negatif adım büyüklüğü içerir.	

KAYNAKLAR

ABB, 2019. Technical application papers. 8: 64. <https://library.e.abb.com>, Erişim Tarihi: 18.12.2019.

Acha, E, Madrigal, M, 2002. Power system harmonics computer modelling and analysis. Wiley, J-Sons. Press, 217 pp.

Alawadhi, N., Elnady, A., Sinan, S., 2019. Estimation of voltage symmetrical components and current harmonics using multi-output Kalman Filter. Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 26 March-10 April 2019, Dubai, United Arab Emirates.

Alfieri, L. et al., 2013. Waveform distortion assessment in power systems with a new three-step sliding-window method. 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 5-8 May 2013, Wrocław, Poland.

Alfieri, L., 2017. New advanced methods for the spectral analysis of time-varying waveforms in power systems. *Ph.D. Thesis*, University of Naples Federico II, Napoli, Italy.

Alhafadhi L., 2016. Total harmonics distortion reduction using Adaptive, Weiner and Kalman Filters. *Ms.C. Thesis*, Western Michigan University, Kalamazoo, USA.

Arrillaga, J., Watson N.R., 2003. Power system harmonics. Wiley, New York, A.B.D, 176 pp.

Averchenko, A.P., Zhenatov, B.D., 2016. Comparison of computational costs of Hartley transform and Fourier transform. Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2016 13th International Scientific-Technical Conference on. 01:436-438.

Barros, J., Diego, R.I., Apráz, M., 2012. Applications of wavelet transform for analysis of harmonic distortion in power systems: a review. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 61(10):2604–2611.

Batarseh, I., 2004. Power Electronic Circuits. John Wiley, New York, 312 pp.

Beltran-Carbajala, F., Silva-Navarro G., 2017. A fast parametric estimation approach of signals with multiple frequency harmonics. *Electric Power Syst. Res.*, 144(1): 157-162.

Bettayeb, M., Qıdwai, U., 1998. Recursive estimation of power system harmonics. *Electric Power Syst. Res.*, 47(2):143–152.

Bollen, M. H. J., Gu, I. Y. H., 2006. Signal processing of power quality disturbances. Wiley, New York, 144 pp .

Bracewell, R.N., 1984. The Fast Hartley Transform. *Proceedings of the IEEE*, 72(8):1010-1018.

Caramia,P., Carpinelli, G., Verde, P., 2009. Power quality indices in liberalized market. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex (UK), 221 pp.

Carvalho, Janison R. de, Duqueb , Carlos A., Limac, Marcelo A.A., Couryc, Denis V., Ribeiro, Paulo F., 2014. A novel DFT-based method for spectral analysis under time-varying frequency conditions. *Electric Power Systems Research*,108: 74– 81.

Cekli, S., Uzunoglu, C.P., Uğur, M., 2011. Adaptive frequency estimation of distorted power system signals using modified Extended Kalman Filter. *Gazi University Journal of Science*, 24(1): 85-89.

Chang, Y.N., Hsieh Y.C. And Moo C.S., 2000. Truncation effects of FFT on estimation of dynamic harmonics on power system. International Conference on Power System Technology, pp. 1155–1160, 04-07 Aralık 2000, Perth, Avustralya.

Chintakindi, S.,R., Varaprasad, O.V.S.R., Sarma, D.V.S.S.S., 2015. Improved Hanning window based interpolated FFT for power harmonic analysis. TENCON 2015 IEEE Region 10 Conference, 1-4 Nov. 2015, Macao, CHINA.

Chu E., 2008. Discrete and continuous Fourier Transforms analysis: applications and fast algorithms. Taylor & Francis, New York, 151 pp.

Cupertino F., Lavopa E., Zanchetta P., Sumner M., Salvatore L., 2011. Running DFT-based PLL algorithm for frequency, phase, and amplitude tracking in aircraft electrical systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(3):1027–1035.

Dash, P.K., Swam, D.P., Routray, A. And Liew A.C., 1996. Harmonic estimation in a power system using adaptive perceptrons. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 143(6): 565-574.

Erişti H., Demir, Y., 2011. Gerçek zamanlı güç kalitesi izleme sistemleri ile elektrik dağıtım sistemlerindeki güç kalitesinin incelenmesi, Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 351-356.

EPDK 2008. Elektrik piyasasında dağıtım sisteminde sunulan elektrik enerjisinin tedarik sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete, Sayı:27052, 12 Kasım 2008.

Fang, C. And Mu, C., 2008. An embedded interharmonics estimation algorithm based on special approximate ARMA model. International Conference on Computer Science and Software Engineering, 4:158–161, 12-14 Dec. 2008, Wuhan, Çin.

Frickey, D. A., 1995. Using inverse Chirp Z-Transform for time domain analysis of simulated radar signals. Signal Processing Applications and Technology Conference, 18-21 Oct. 1994, Idaho, USA.

Girgis, A.A. and Ham, F.M., 1980. A quantitative study of pitfalls in FFT. *IEEE Transaction on Aerospace Electron Systems*, 16(4): 434–439.

Grady, W.M., Santoso S., 2001. Understanding power system harmonics. *IEEE Power Engineering Review*, 21(11): 8–11.

Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R.J., et al., 2011. Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 5(4): 519-529.

Hou, H.S., 1987. The Fast Hartley Transform algorithm. *IEEE Transactions on Computer*, 36(2): 147 – 156.

IEC Std. 61000-4-7, 2002. General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.

IEEE Std 1159-2019. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. (Revision of IEEE Std 1159-1995), 81 pp.

Jain, S. K., Singh S.N., 2011. Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges. *Electric Power Systems Research*, 81(9): 1754-1766.

Jensen, J.R., Chistensen, M.G., Jensen, S.H., 2010. Fundamental frequency estimation using polynomial rooting of a subspace-based method. European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2010, pp.502-506, 23-27 Aug. 2010, Aalborg, Denmark.

Joorabian, M., Mortazavğ, S.S. And Khayyamı A.A., 2009. Harmonic estimation in a power system using a novel hybrid least squares-Adaline algorithm. *Electric Power Systems Research*, 79(1): 107–116.

Kabalci, Y., Kocan, S., 2017. A differential search algorithm application for solving harmonic estimation problems. 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 8-17 pp. 29 June-1 July 2017, Targoviste, Romania.

Kay, S.M., 1988. Modern spectral estimation: theory and application. Prentice-Hall, New Jersey, 364 pp.

Kennedy B. W., 2000. Power quality primer. McGraw-Hill Comp., New York, 149 pp.

Köse N., Salor, Ö., Leblebicioğlu, K., 2010. Interharmonics analysis of power signals with fundamental frequency deviation using Kalman filtering. *Electric Power Systems Research*, 80:1145–1153.

Laughton, M. A., Warne, D. F., 2003. Electrical Engineer's Reference Book, Stones, J., Section H. Power Systems, 43. Power Quality, 2-9, Elsevier.

Leonowicz, Z., 2006. Parametric methods for time-frequency analysis of electric signals. Wroclaw University of Technology, Poland, 40-45 pp .

Lin, H. C., 2012. Power harmonics and interharmonics measurement using recursive group-harmonic power minimizing algorithm. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59(2):1184-1193.

Liu, J., Shao, Y., Quin, X., Lu, X., 2019. Interharmonics parameter detection based on interpolation FFT and multiple signal classification algorithm. The 31th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 3-5 June 2019, Nanchang, China.

Lobos, T., Rezmer, J., Schegner, P., 2003. Parameter estimation of distorted signals using Prony method. IEEE Bologna Power Tech Conference, 23-26 June 2003, Bologna, Italy.

Lu, Y., 2006. Clock steering system making use of GPS time transfer. *BSc. Thesis*, Institute of Communications and Navigation of Technischen Universität München (TUM), München, Germany.

MATLAB, 2017. version 17.a. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

Mayyas, K., Aboulnasr, T., 1997. Leaky LMS algorithm: MSE analysis for Gaussian data. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45(4): 927-934.

Menguc, E.C., 2019. Güç sistemi harmoniklerinin adaptif kestirimi: eğitim düşünüm tabanlı adaptif algoritmaların başarımların analizi. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 8(1): 69-80.

Moravej, Z., Enayati, J., 2014. A hybrid least squares-clonal selection based algorithm for harmonics estimation. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 24(1): 1-15.

Morsi, W. G., El-Hawary, M. E., 2008. A new perspective for the IEEE Standard 1459 2000 via stationary wavelet transform in the presence of nonstationary power quality disturbance. *IEEE Trans. Power Del.*, 23(4):2356–2365.

N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Royal Society*, 454: 903-995.

Namdar, M., Sahin, B., İlhan, H., Durak Ata, L., 2012. Chirp-Z Transform based spectrum sensing via energy detection. 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 18-20 April 2012, Mugla, Turkey.

Ngo, Q.N., 2015. Optical Chirp Z-Transform processor: design and application. *Journal Of Lightwave Technology*, 33(11): 2213-2221.

Nguyen, T. T., 1997. Parametric harmonic analysis. *IEEE Proc.: Gener. Transm. Distrib.*, 144(1): 21–25.

Ompokov, V.D., Boronoev, V. V., 2019. Mode Decomposition and the Hilbert Huang Transform. 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), 1-6 July 2019, Kazan, Russia.

Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., 1989. Discrete-time signal processing. Prentice-Hall, New Jersey, 459 pp.

Ozgonenel, O., Yalcin, T., Guney I, Kurt, U., 2013. A new classification for power quality events in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 95:192-199.

Önal, Y., 2011. Bir güç kalitesi problemi olan kırpışmanın Hilbert–Huang Dönüşümü kullanılarak belirlenmesi ve kısa dönem şiddetinin hesaplanması. *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Piccinin, F., 1988. The Fast Hartley Transform as an alternative to the Fast Fourier transform. Technical Memorandum, Department of Defence Defence Science and Technology Organisation, Salisbury Surveillance Research Laboratory South Australia.

Pisarenko, V.F., 1973. The retrieval of harmonics from a covariance function. *Geophysics. J. Roy. Astron. Soc.*, 347–366 pp.

Poularikas, A.D., Ramadan, Z. M., 2006. Adaptive filtering primer with MATLAB. Taylor & Francis Group, New York, 291 pp.

Qi, L., Qian, L., Woodruff, S., Cartes, D., 2007. Prony analysis for power system transient harmonics. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*.

Rabiner, L. R., Schafer, R. W. and Rader, C. M., 1969. The chirp z-transform. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 17(2).

Rilling G., Flandrin P., Gonvalves P., 2003. On empirical mode decomposition and its algorithms. *IEEE-Eurasip workshop on nonlinear signal and image processing (NSIP '03)*, 1 June 2003, 8-11 pp.

Ruan, M., Cheng, Y., Zhang, T., Wang, A., Xue, H., 2019. Improved Prony method for high-frequency-resolution harmonic and interharmonic analysis. *IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET)*, 10-13 May 2019, Chengdu, China.

S. Haykin, S., 2001. Adaptive filter theory. Fourth edition, Prentice Hall, 245- 270 pp.

Salciç, Z., Li, Z., Annakkage, U.D., Pahalawaththa, N., 1998. A comparison of frequency measurement methods for underfrequency load shedding. *Electric Power System Research*, 45: 209-219.

Sayed, A.H., 2008. Fundamental of adaptive filtering. John Wiley & Sons, New Jersey, 121-130 pp.

Schmidt, R.O., 1981. A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation. *Ph.D. Thesis*, Stanford University, Stanford, CA.

Singh, S.K., Goswami, A.K., Sinha, N., 2014. Application of volterra-series algorithm for power system harmonic estimation. First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES) ACES 2014, 1-2 Feb. 2014, Hooghy, India.

Skodras, A.N., Aburdene, M.F., Nandi, A.K., 2015. Two-band fast Hartley Transform. *Electronics Letters, IEEE*, 51(1): 57–59.

Tartan, E.O., Erdem, H., 2012. A hybrid least squares-differential evolution based algorithm for harmonic estimation. 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 18-20 April 2012, Mugla, Turkey.

Tartan, E.O., Erdem, H., 2013. Fundamental frequency and interharmonic estimation by differential evolution-least squares based hybrid algorithm. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 13-17 May 2013, Istanbul, Turkey.

Tartan, E.O., Erdem, H., 2016. A simple population based hybrid harmonic estimation algorithm. ICIS 2016, 26-29 June 2016, Okayama, Japan.

Tekin, M., Yilmaz, A.S., 2015. The analysis of power system harmonics via Hartley Transform. *KSU Journal of Engineering Sciences*, 18(1):1-8.

Uzunoğlu, C.P., 2012. Frequency estimation of distorted power system signals using multiple signal classification algorithm. *IU-JEEE*, Vol. 12(2):1499-1503.

Varaprasad, O.V.S.R., Panda, R.K., Sarma, D.V.S.S.S., 2013. A novel synchronous sampling algorithm for power system harmonic analysis. Annual IEEE India Conference (INDICON), 13-15 Dec. 2013, Mumbai, India.

Vatanserver, F., Yalcin, N.A., 2018. The design of harmonic simulator based on Hartley Transform. 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), 09-11 November 2018, Antalya, Turkey.

Wang, M., Sun, Y., 2006. A practical method to improve phasor and power measurement accuracy of DFT algorithm. *IEEE Trans. Power Del.*, 21(3):1054–1062.

Wang, T., 1990. The segmented chirp-z transform and its application in spectrum analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 39(2): 318-323.

Wang, Z., Li, Y., Zhang, H., 2019. Harmonic detection method based on windowed double-spectrum interpolation FFT. International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS), Haikou, China.

Welch, G., Bishop, G., 2006. An introduction to the Kalman filter. Technical Report, University of North Carolina at Chapel Hill, 127-145.

Wen, H., Zhang, J., Yao,W., 2018. FFT-based amplitude estimation of power distribution systems signal distorted by harmonics and noise. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4):1447-1455.

Wiczynski G., 2008. Analysis of voltage fluctuations in power networks. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 57(11): 2655–2664.

Widlund, E.,2012. Power quality disturbances in production facilities. *Ms.C. Thesis*, Chalmers University of Technology, Department of Energy & Environment Division of Electric Power Engineering, Göteborg, Sweden.

Wylie, S., Tiwari, P., 2014. Harmonics detection using prony frequency analysis algorithm in transformer inrush current generation after fault clearance. *International Journal Of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation And Control Engineering*, 2(12):2270-2274.

Xu, Y., Liu, Y., Lu, M., 2017. Improved harmonic analysis based on quadruple spectrum-line interpolation FFT with multiple cosine window. First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS), 3-5 June 2017, Harbin, China.

Yılmaz, S., 2005. Bilgisayar İle Sayısal Çözümleme, Kocaeli Üniv. Yayınları, No:168, Kocaeli.

Zhou, Z., So, H.C., Chan F.K.W., 2012. Optimally weighted music algorithm for frequency estimation of real harmonic sinusoids. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 25-30 March 2012, Kyoto, Japan.

EKLER

- EK 1** Yönetmelik ve standartlarda Tanımlı Limit Değerler
EK 2 Uygulamada yer alan parametrelerin matematiksel hesabı
EK 3 Benzetim sonuçlarına ait ekran görüntüleri



EK 1. Yönetmelik ve Standartlarda Tanımlı Limit Değerler

Şebeke yönetmeliğine göre 400 kV, 154 kV ve 66 kV altı gerilim seviyesi için gerilim harmoniği sınır değerleri ve toplam harmonik bozulma sınır değerleri sırasıyla Çizelge EK 1.1, Çizelge EK 1.2 ve Çizelge EK 1.3'te verilmiştir (IEEE 2019).

Çizelge EK 1.1. 400 kV gerilim seviyesi için gerilim harmoniği sınır değerleri (IEEE 2019)

Tek Harmonikler (3'ün Katı Olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün Katı Olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)
5	3.0	3	1.7	2	1.0
7	1.5	9	0.5	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.5			10	0.4
19	0.5			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
THBv:%3.5					

Çizelge EK 1.2. 154 kV gerilim seviyesi gerilim için harmoniği sınır değerleri (IEEE 2019)

Tek Harmonikler (3'ün Katı Olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün Katı Olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)
5	4.0	3	2.0	2	1.0
7	2.	9	1.	4	0.8
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1.0			10	0.4
19	1.0			12	0.2
23	0.7			>12	0.2
25	0.7				
THBv:%5.0					

Çizelge EK 1.3. 66 kV ve altı gerilim seviyesi için gerilim harmoniği sınır değerleri (IEEE 2019)

Tek Harmonikler (3'ün Katı Olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün Katı Olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No	Harmonik Gerilim (%)
5	5.0	3	3.0	2	1.9
7	4.0	9	1.3	4	1.0
11	3.0	15	0.5	6	0.5
13	2.5	21	0.5	8	0.5
17	2.5			10	0.5
19	2.5			12	0.5
23	2.5			>12	0.5
25	2.5				
THBv:%8					

Şebeke yönetmeliğine göre çeşitli gerilim seviyeleri için akım harmoniği sınır değerleri ve toplam talep bozulumu sınır değerleri Çizelge EK 1.4'te verilmektedir.

Çizelge EK 1.4. Akım harmonikleri sınır değerleri (IEEE 2019)

Harmonik Sırası		1 kV < V ≤ 34.5 kV				
Grup	No	I_K / I_L				
		< 20	20 - 50	50 - 100	100 - 1000	> 1000
Tek Harmonikler	$h < 11$	4.0	7.0	10.0	12.0	15.0
	$11 \leq h < 17$	2.0	3.5	4.5	5.5	7.0
	$17 \leq h < 23$	1.5	2.5	4.0	5.0	6.0
	$23 \leq h < 35$	0.6	1.0	1.5	2.0	2.5
	$h \geq 35$	0.3	0.5	0.7	1.0	21.4
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.						
TTB		5.0	8.0	12.0	15.0	20.0
Harmonik Sırası		34.5 kV < V ≤ 154 kV				
Grup	No	I_K / I_L				
		< 20	20 - 50	50 - 100	100 - 1000	> 1000
Tek Harmonikler	$h < 11$	2.0	3.5	5.0	6.0	3.5
	$11 \leq h < 17$	1.0	1.8	2.3	2.8	3.5
	$17 \leq h < 23$	0.8	1.25	2.0	2.5	3.0
	$23 \leq h < 35$	0.3	0.5	0.75	1.0	1.25
	$h \geq 35$	0.15	0.25	0.35	0.5	0.7
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.						
TTB		2,5	4.0	6.0	7.5	10.0
Harmonik Sırası		V > 154 kV				
Grup	No	I_K / I_L				
		< 20	20 - 50	50 - 100	100 - 1000	> 1000
Tek Harmonikler	$h < 11$	1.0	1.8	2.5	3.0	3.8
	$11 \leq h < 17$	0.5	0.9	1.2	1.4	1.8
	$17 \leq h < 23$	0.4	0.6	1.0	1.25	1.3
	$23 \leq h < 35$	0.15	0.25	0.4	0.5	0.6
	$h \geq 35$	0.75	0.12	0.17	0.25	0.35
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.						
TTB		1.3	2.0	3.0	3.75	5.0

EK 2. Uygulamada yer alan parametrelerin matematiksel hesabı.

Uygulama - 1:
$$v(t) = \sqrt{2}\{5 + 220\cos(\omega t + 30^\circ) + 50\cos(3\omega t + 60^\circ) + 20\cos(5\omega t + 80^\circ) + 10\cos(7\omega t - 45^\circ) + 5\cos(9\omega t - 36^\circ)\} \quad (1)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^N V_k^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (220^2 + 50^2 + 20^2 + 10^2 + 5^2)} = 226.7708 V \quad (2)$$

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N V_k^2}}{V_{1RMS}} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N (50^2 + 20^2 + 10^2 + 5^2)}}{220} = \% 25 \quad (3)$$

$$BF = \frac{V_{RMS}}{V_1} = \frac{226.7708}{220} = 1.030776 \cong 1.03078 \quad (4)$$

$$TF = \frac{V_m}{V_{RMS}} = \frac{220\sqrt{2}}{226.7708} = 1.37198 \cong 1.372 \quad (5)$$

Uygulama-2:
$$v(t) = \sqrt{2}\{110\cos(\omega t - 45^\circ) + 33\cos(3\omega t + 75^\circ) + 22\cos(7\omega t + 30^\circ) + 11\cos(15\omega t - 15^\circ)\} \quad (6)$$

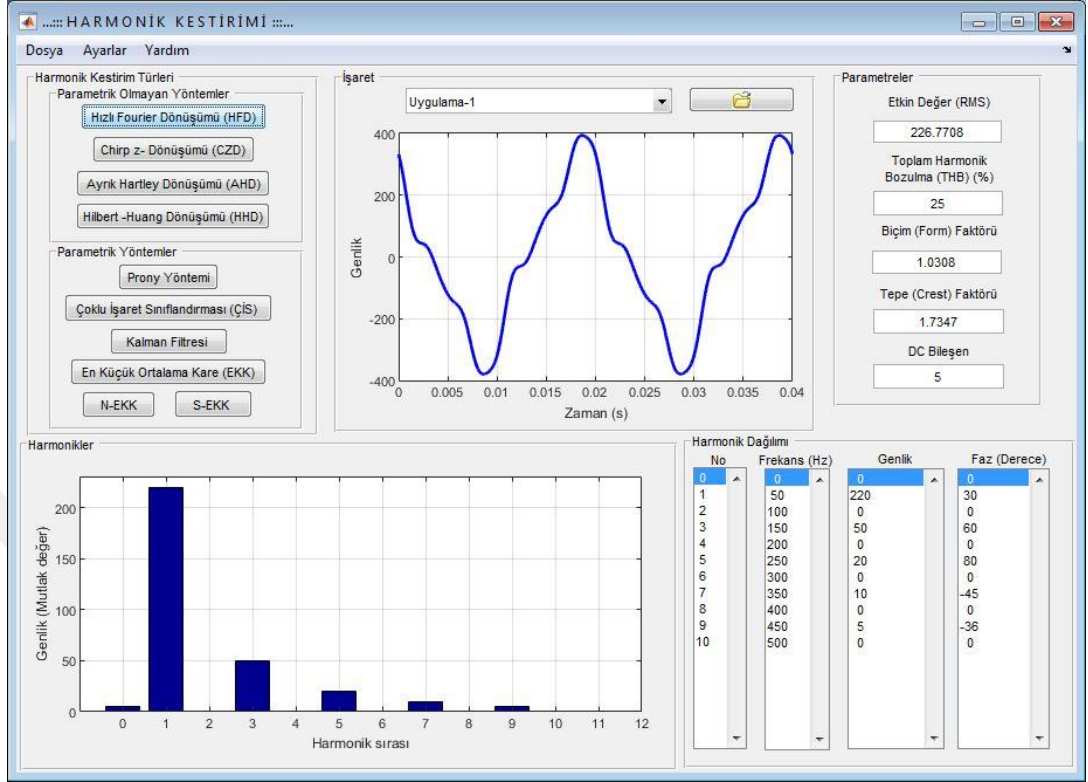
$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^N V_k^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (110^2 + 33^2 + 22^2 + 11^2)} = 117.4478 V \quad (7)$$

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N V_k^2}}{V_{1RMS}} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N (33^2 + 22^2 + 11^2)}}{110} = \% 37.4166 \quad (8)$$

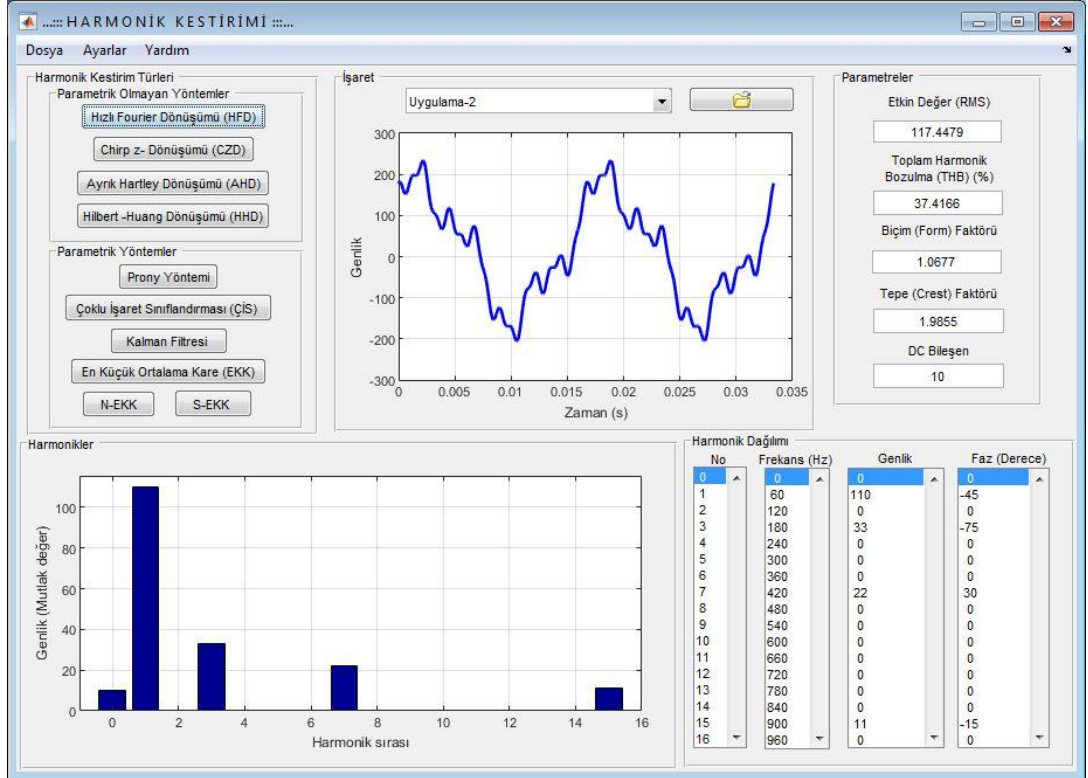
$$BF = \frac{V_{RMS}}{V_1} = \frac{117.4478}{110} = 1.0677 \quad (9)$$

$$TF = \frac{V_m}{V_{RMS}} = \frac{110\sqrt{2}}{117.4478} = 1.3245 \quad (10)$$

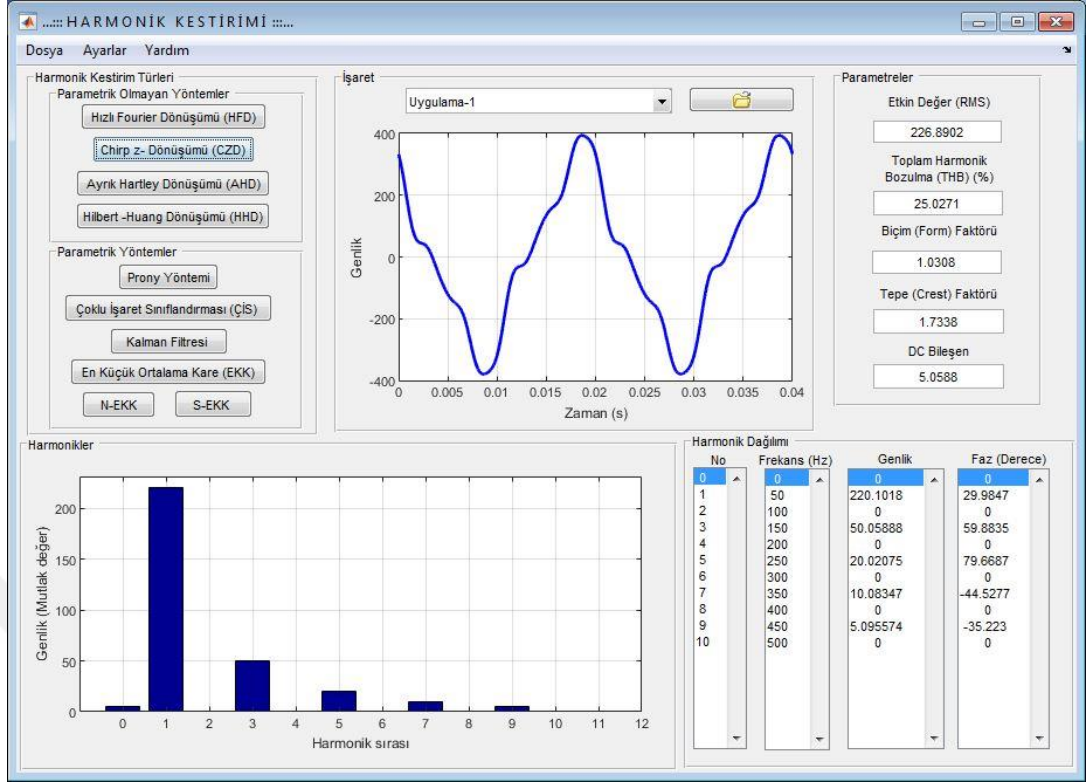
EK 3. Benzetim sonuçlarına ait ekran görüntüleri



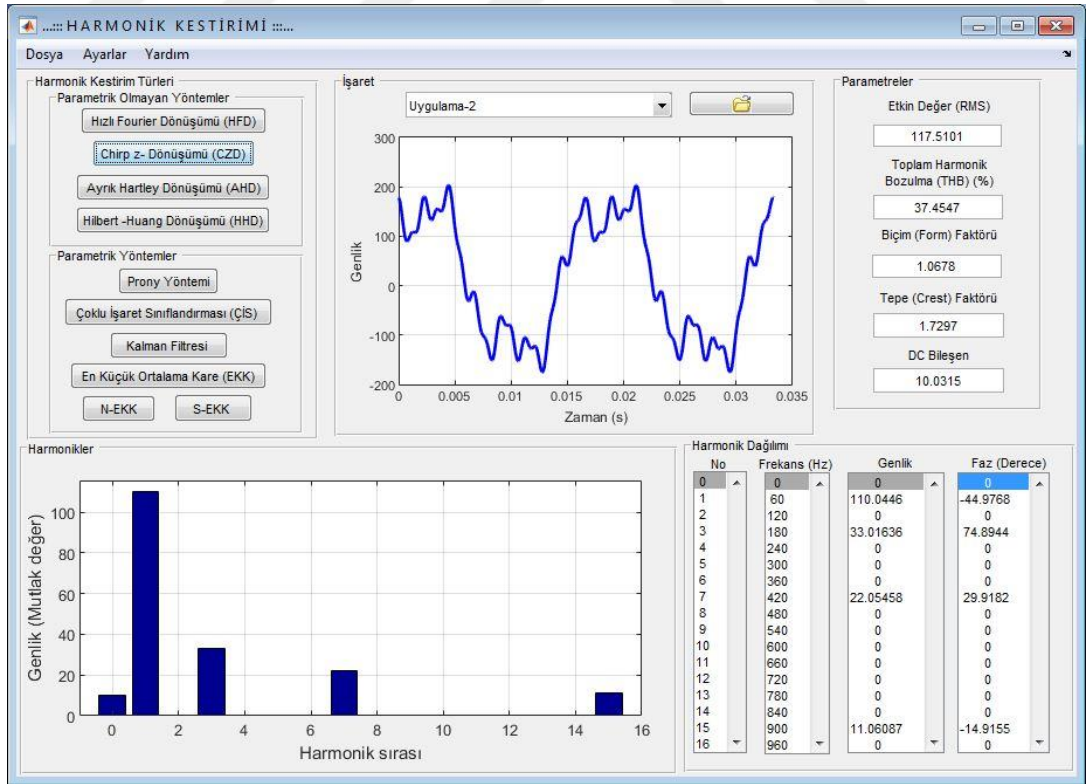
Şekil EK 3.1. Hızlı Fourier dönüşümü yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



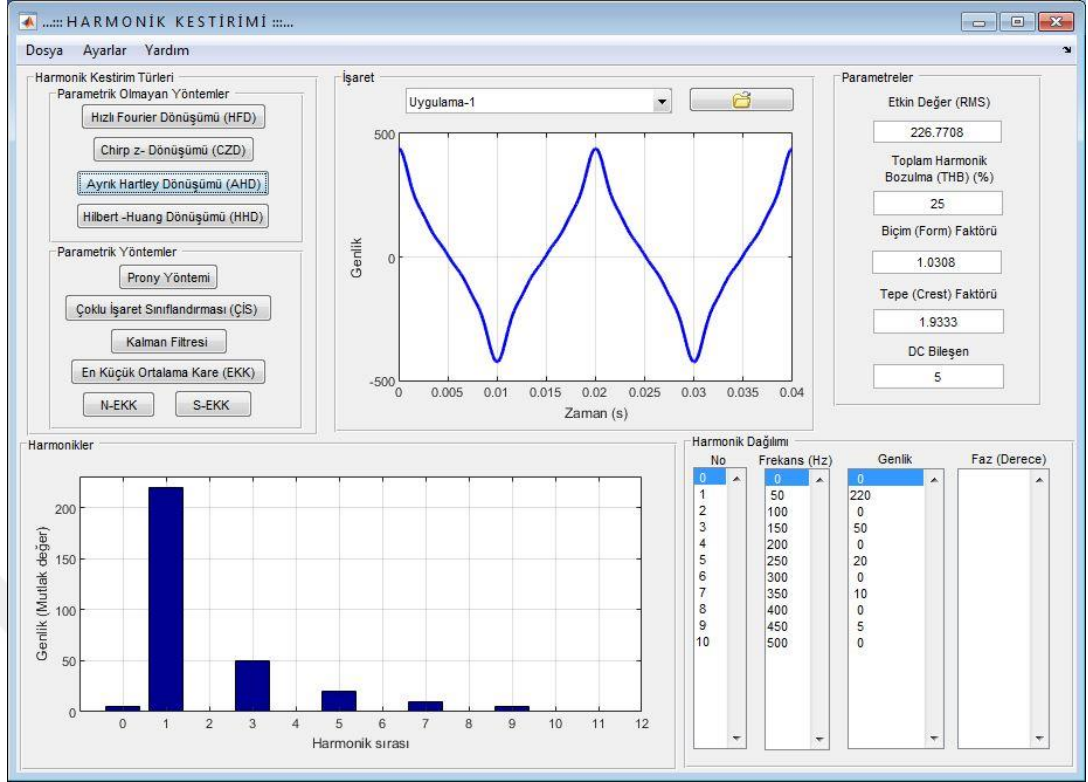
Şekil EK 3.2. Hızlı Fourier dönüşümü yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



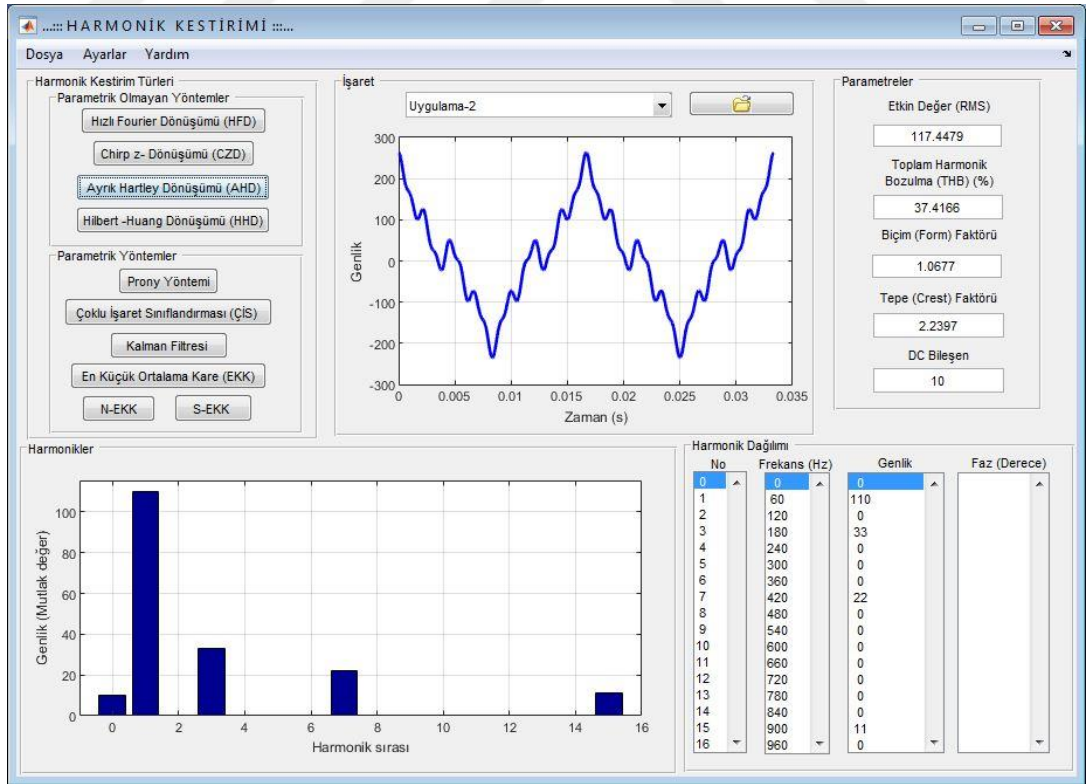
Şekil EK 3.3. Chirp z-dönüşümü yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



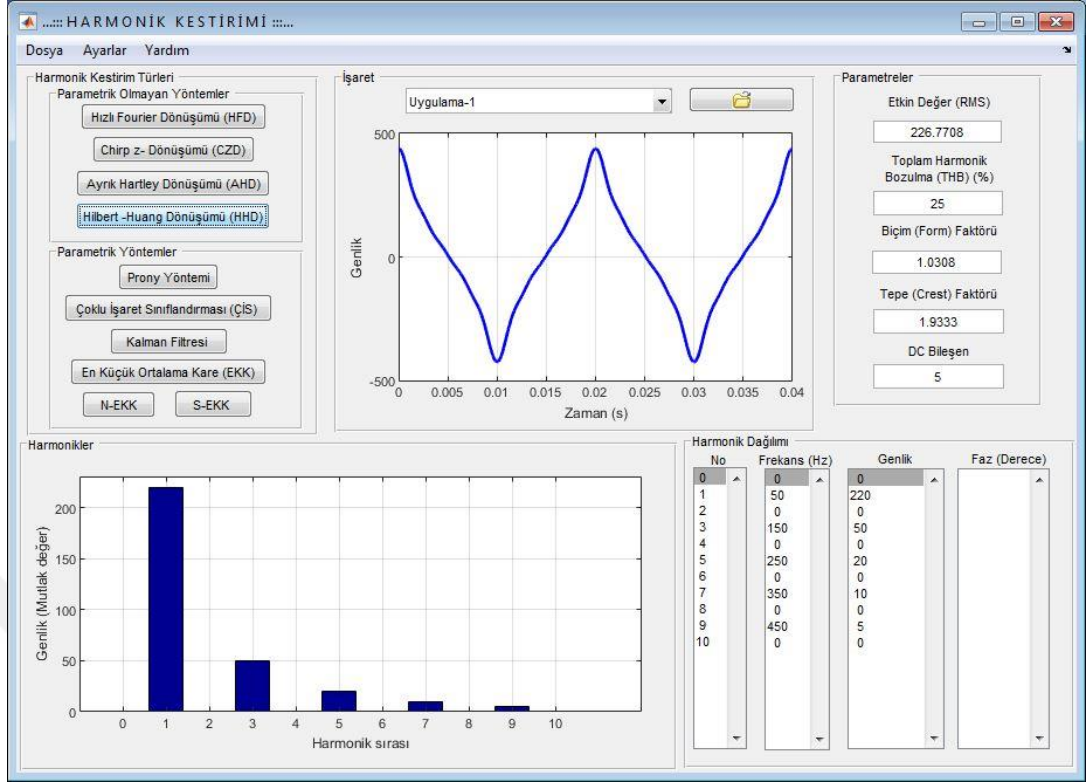
Şekil EK 3.4. Chirp z-dönüşümü yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



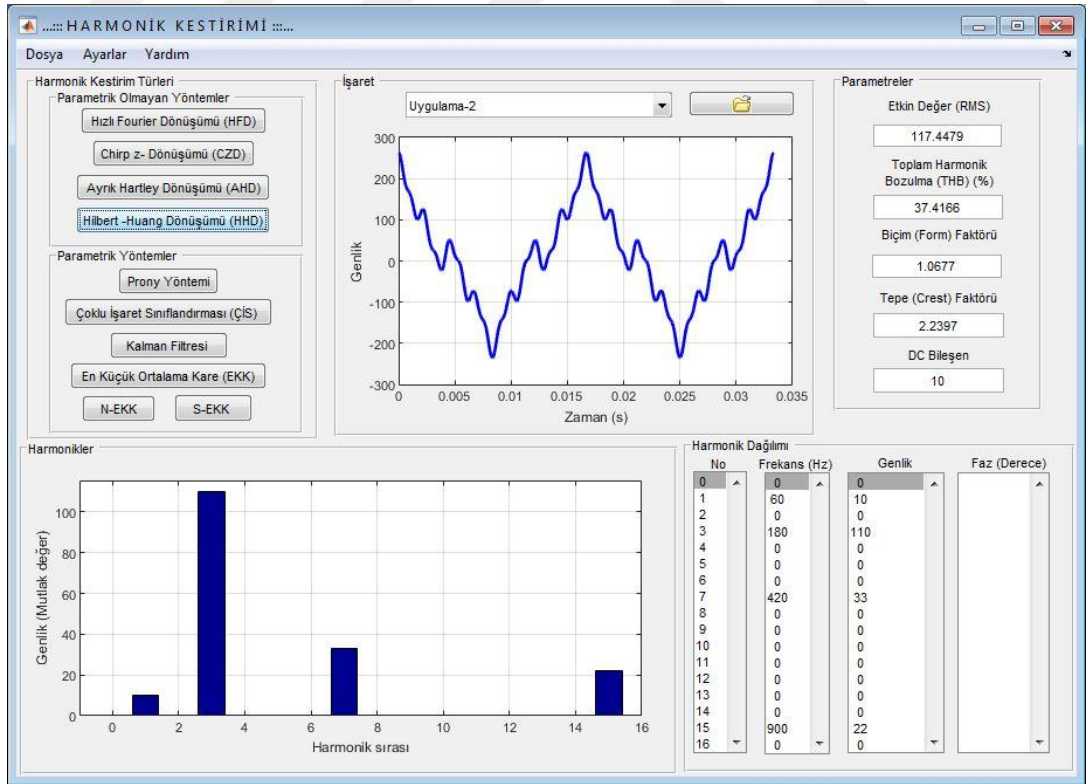
Şekil EK 3.5. Ayrık Hartley dönüşümü yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



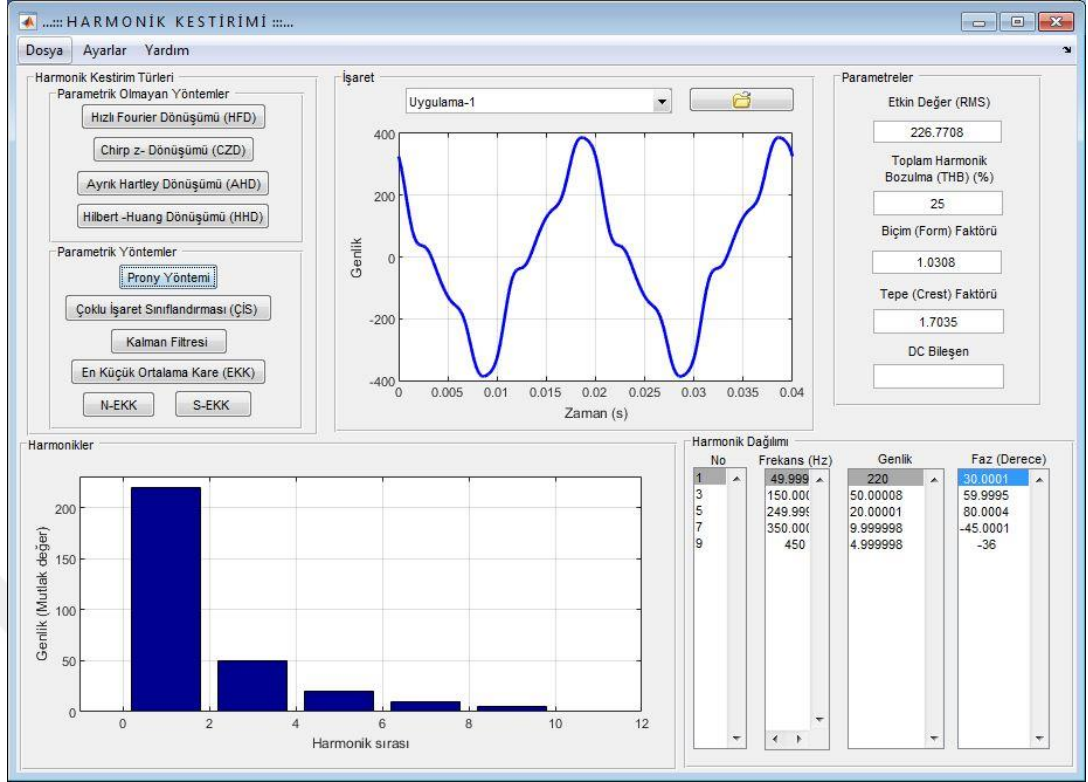
Şekil EK 3.6. Ayrık Hartley dönüşümü yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



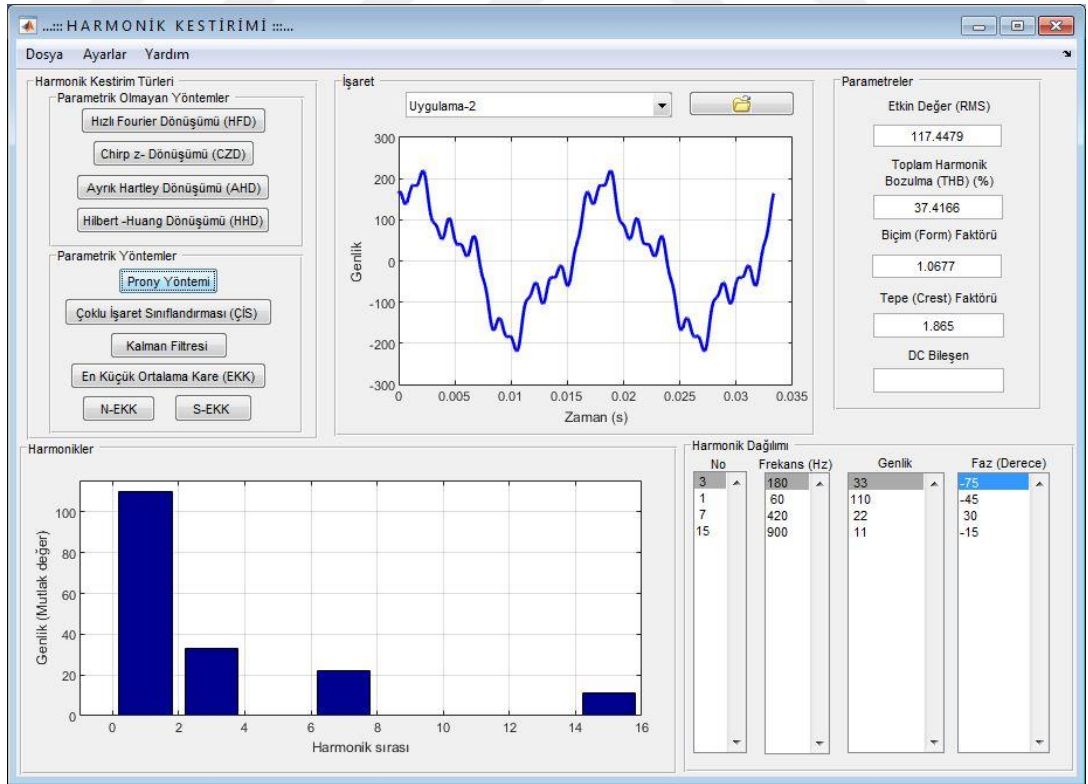
Şekil EK 3.7. Hilbert – Huang dönüşümü yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



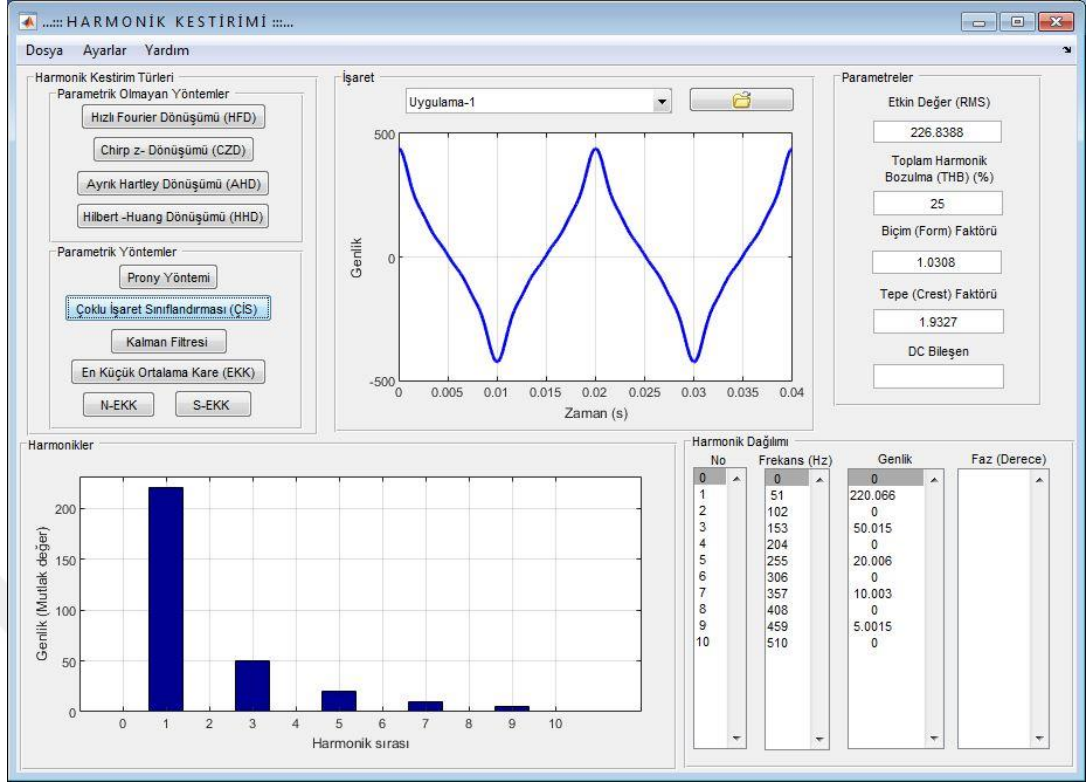
Şekil EK 3.8. Hilbert – Huang dönüşümü yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



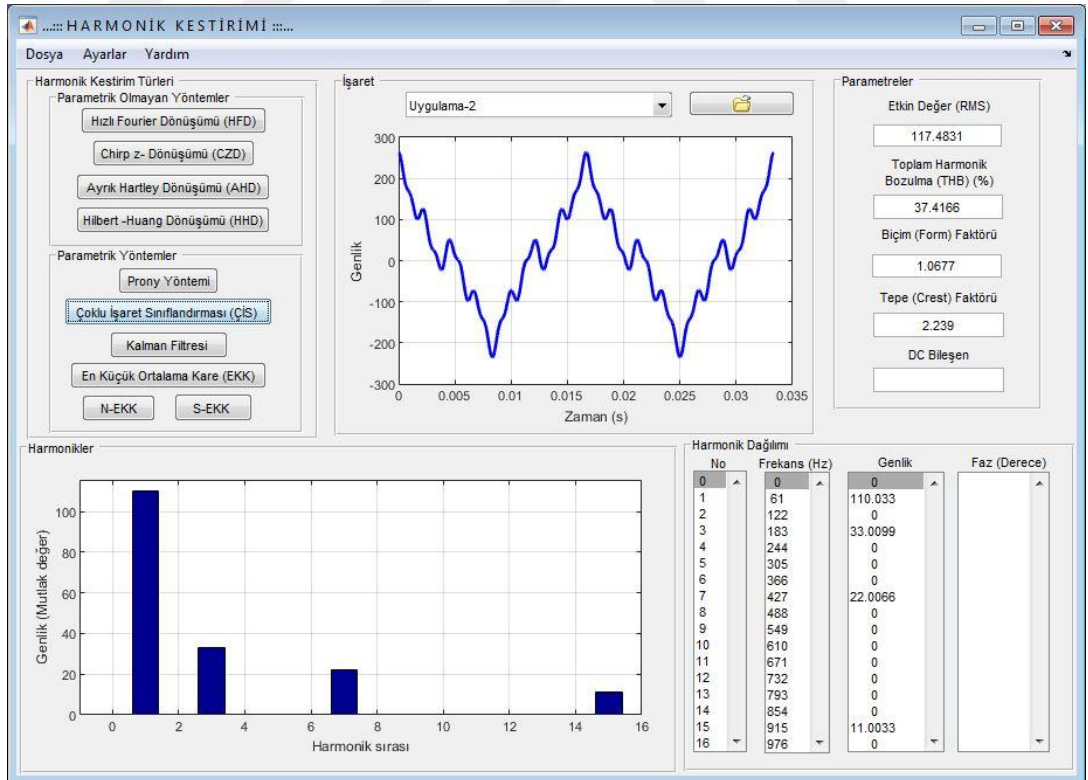
Şekil EK 3.9. Prony yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



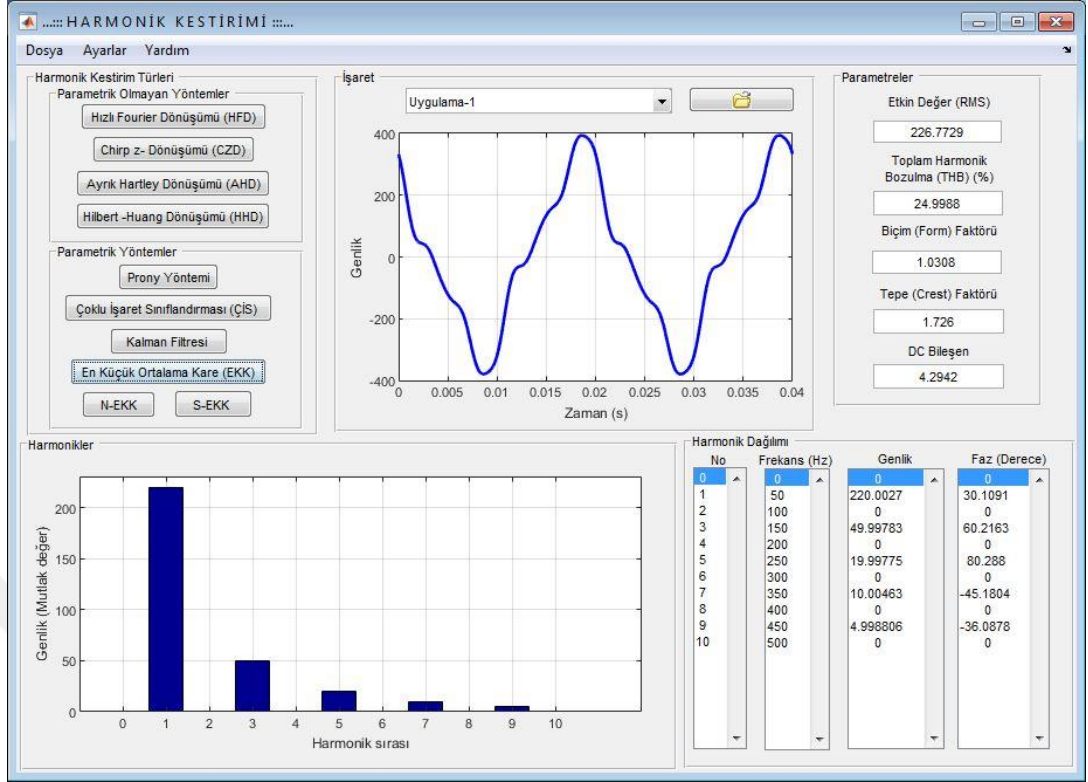
Şekil EK 3.10. Prony yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



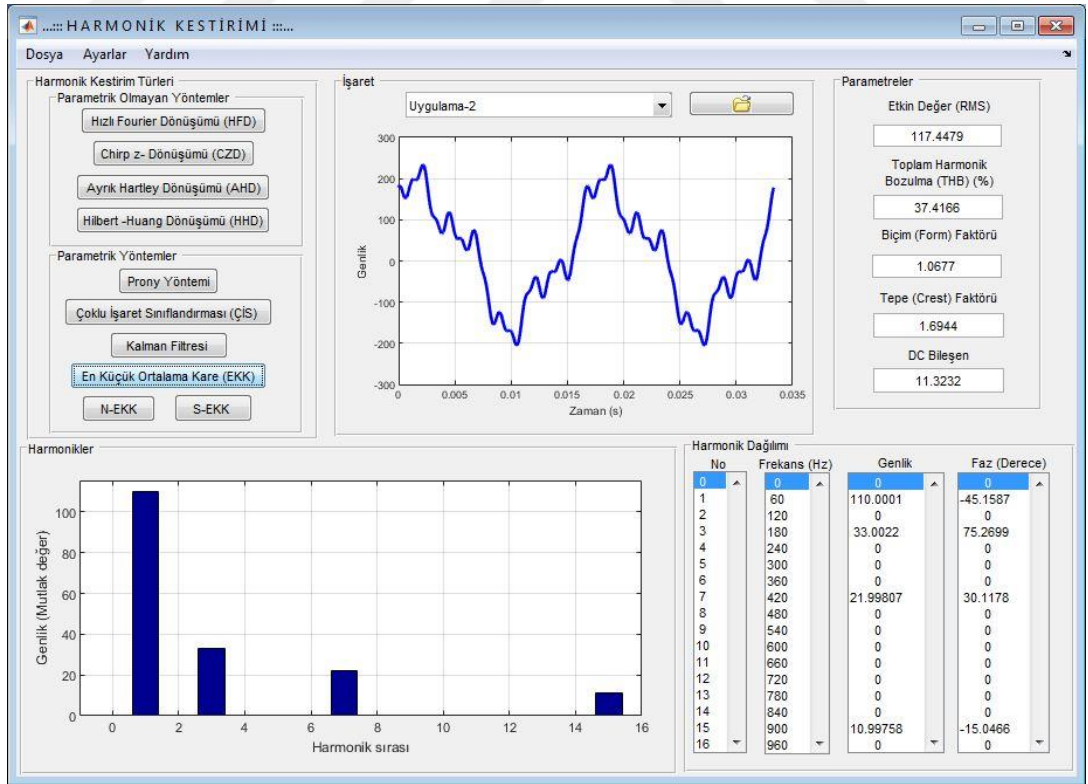
Şekil EK 3.11. Çoklu işaret sınıflandırması yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



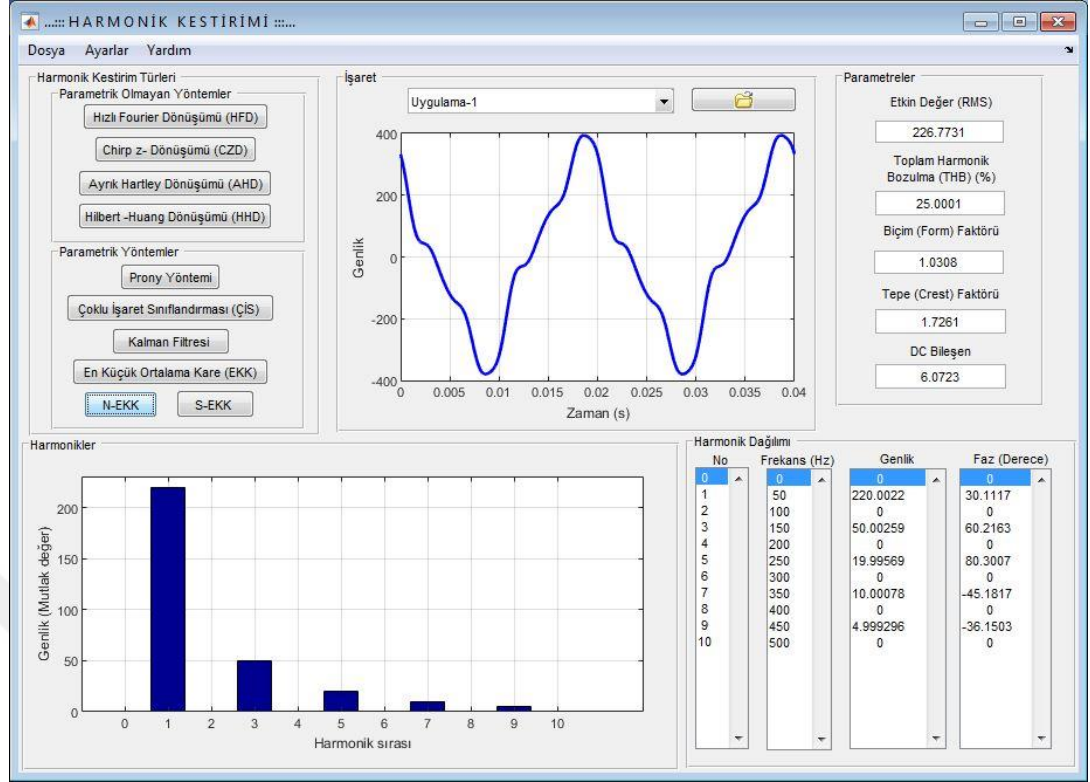
Şekil EK 3.12. Çoklu işaret sınıflandırması yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



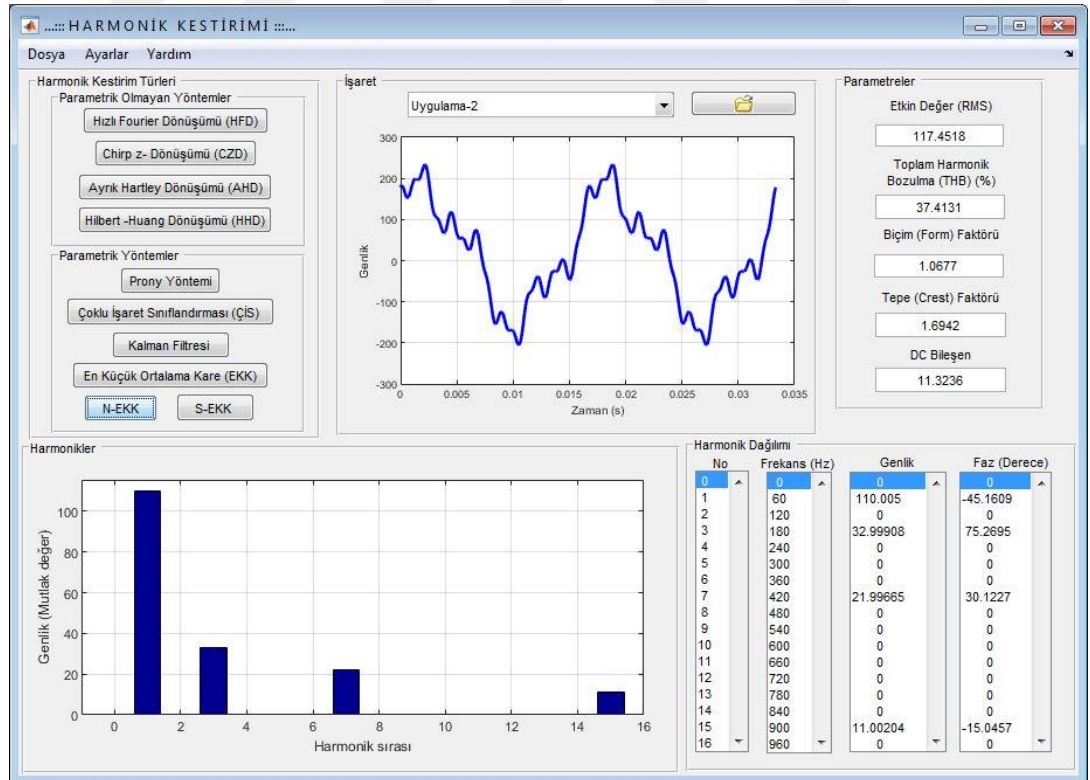
Şekil EK 3.13. EKK yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



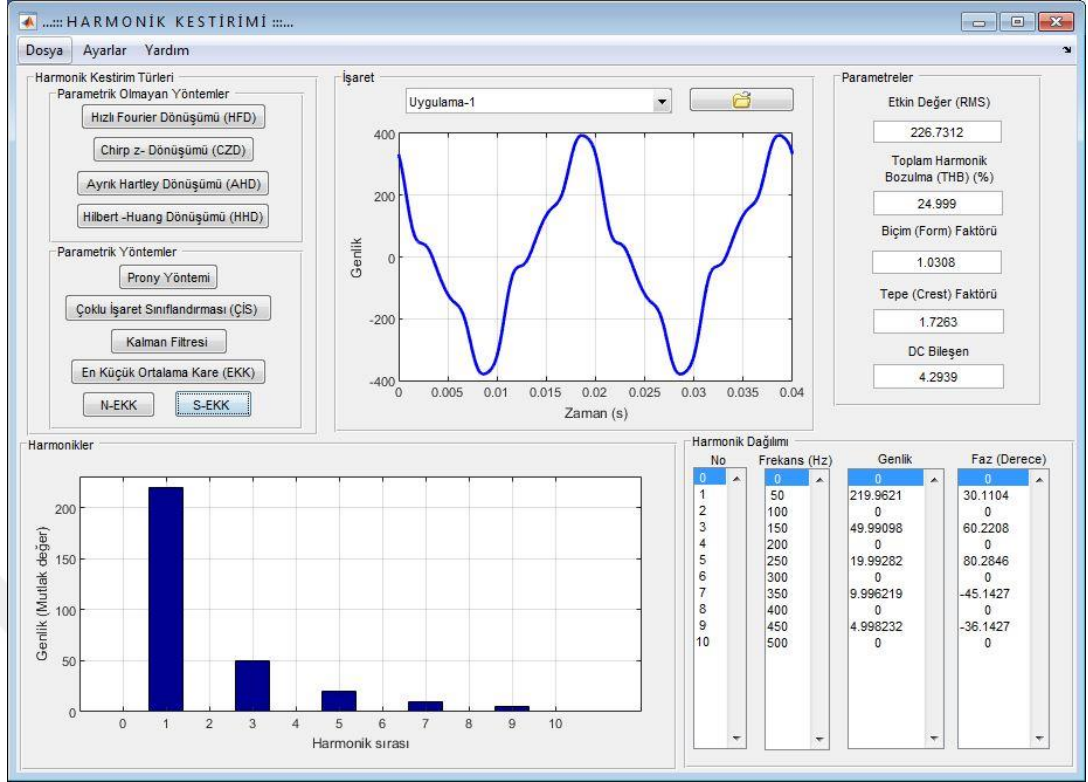
Şekil EK 3.14. EKK yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



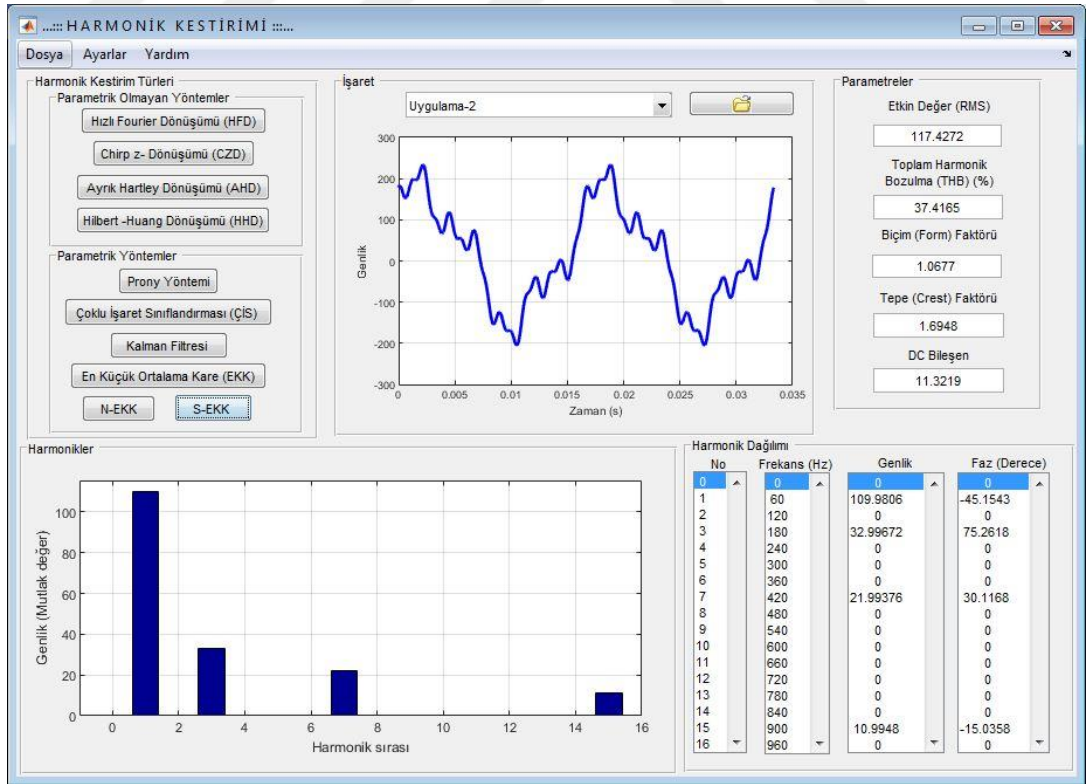
Şekil EK 3.15. Normalleştirilmiş - EKK yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



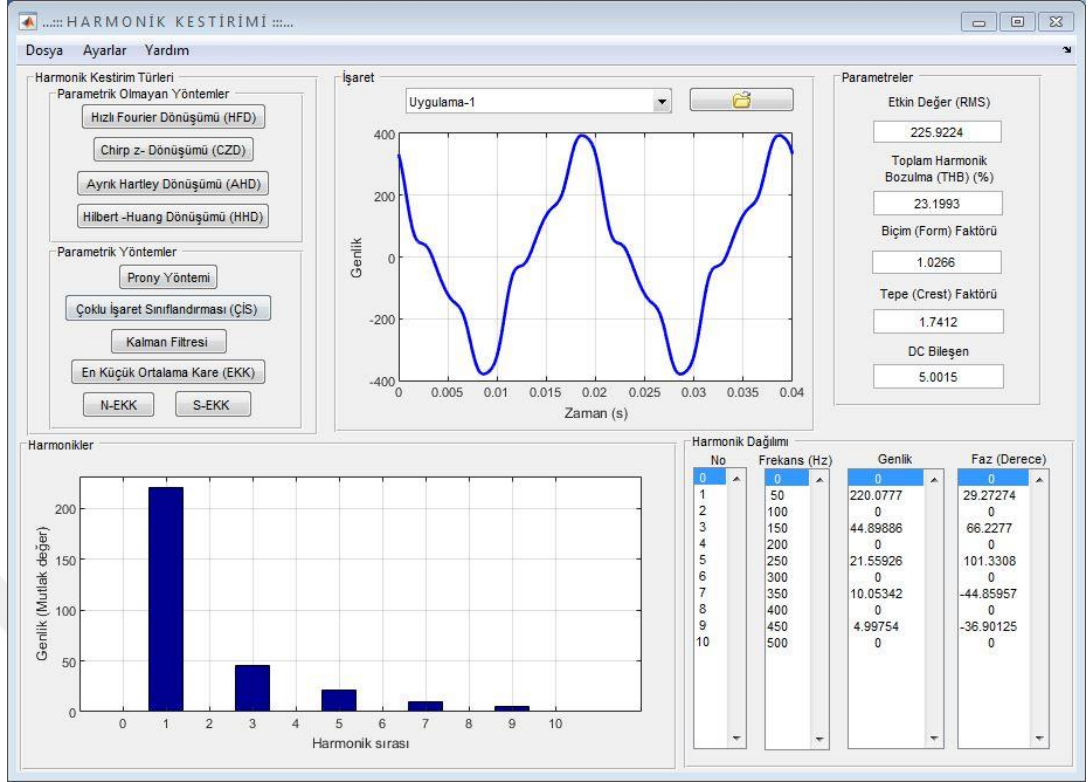
Şekil EK 3.16. Normalleştirilmiş - EKK yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



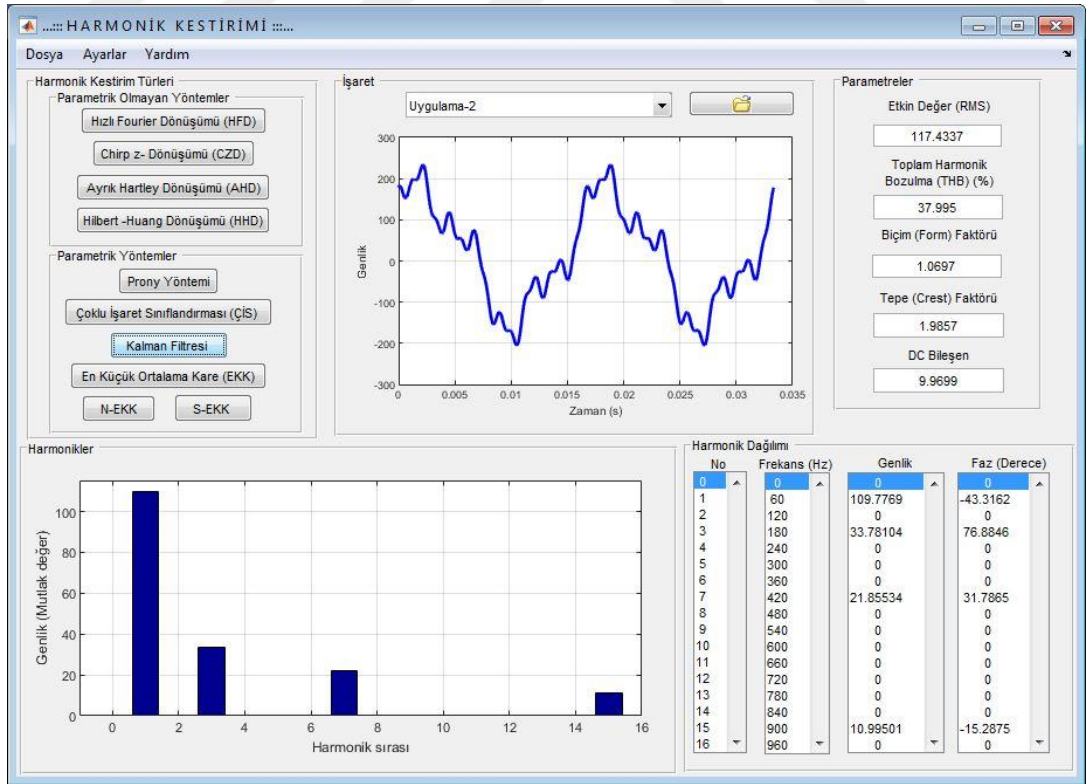
Şekil EK 3.17. Sızdıran – EKK yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



Şekil EK 3.18. Sızdıran – EKK yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı



Şekil EK 3.19. Kalman filtresi yöntemiyle uygulama – 1 program çıktısı



Şekil EK 3.20. Kalman filtresi yöntemiyle uygulama – 2 program çıktısı

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Meltem KULU
Doğum Yeri ve Tarihi : Osmangazi, 17.09.1991
Yabancı Dil : İngilizce, Almanca

Eğitim Durumu
Lise : Ahmet Vefik Paşa Anadolu Lisesi, 2009

Lisans : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği, 2014

Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi
Elektronik Mühendisliği, 2020

İletişim (e-posta) : meltemkulu@gmail.com