

**HARMONİK KESTİRİMİNDE YENİ
HİBRİT YAKLAŞIMLAR**

Nedim Aktan YALÇIN



T.C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK KESTİRİMİNDE YENİ HİBRİT YAKLAŞIMLAR

Nedim Aktan YALÇIN

0000-0002-0049-7841

Prof. Dr. Fahri VATANSEVER

(Danışman)

DOKTORA TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

HARMONİK KESTİRİMİNDE YENİ HİBRİT YAKLAŞIMLAR

Nedim Aktan YALÇIN

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fahri VATANSEVER

İşaret parametrelerinin kestirimi, birçok alanda ve uygulamada önemli yer tutmaktadır. Güç sistemlerinde meydana gelen harmonik ve ara-harmoniklerin kestirimi, güç kalitesinin takibi ve iyileştirilmesi açısından da büyük önem arz etmektedir. Ancak, Fourier dönüşümü gibi geleneksel yöntemler, işaretin ana frekansının tam sayı katlarını ortaya çıkarabildikleri için harmonik kestiriminde başarılı olmalarına rağmen, ara-harmonik kestiriminde bazen yetersiz kalmaktadırlar. Bu dezavantajlarından dolayı, ara-harmoniklerin tespiti amacıyla alternatif yöntemler geliştirilmiş ve başka alanda geliştirilen yöntemler uyarlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, parametrik yöntemlerden Prony ve alt uzay analiz yöntemlerinden MUSIC algoritmalarının ayrık Haar dönüşümü ile gerçekleştirilmesi hususunda yeni yaklaşımlar önerilmektedir. Prony ve ayrık Haar dönüşümü ile türetilen ve hibrit bir yöntem olan önerilen metod, Prony yönteminin uygulanmasında kullanılan matrislerin eleman sayılarını azalttığı gibi, frekansları bulmakta kullanılan polinomun derecesini de düşürebilmektedir. Matris eleman sayısının azlığı hızlı yakınsamayı garanti ederken, diğer yandan polinom derecesinin düşüklüğü, ilgili polinomun köklerinin gürültüden daha az etkilenmesini sağlamaktadır. Ayrık Haar katsayılarının kullanılmasıyla Prony yöntemi, işaretin genlik, faz ve frekans bilgisini düşük bir bağıl hata oranıyla tespit edebilmektedir. Öte yandan, önerilen birinci yöntemin sonuçları kullanılarak MUSIC algoritmasının da ayrık Haar dönüşüm katsayıları ile gerçekleştirilebileceği gösterilmektedir. Ayrıca bu algoritmada, frekans ve gürültünün korelasyonunu inceleyen frekans vektörünün eleman sayısının azaltılması da hızlı bir yakınsama ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, MUSIC algoritması da daha düşük hata oranıyla işaret frekanslarını bulabilmektedir. İşaret parametrelerinin tahmini için türetilen yöntemlerin, ayrık Haar dönüşümü katsayılarının hem ortalama hem de fark katsayıları ile başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Frekans kestirimi, parametre kestirimi, Prony yöntemi, MUSIC algoritması, ayrık Haar dönüşümü

2021, xv + 228 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

NEW HYBRID APPROACHES IN HARMONIC ESTIMATION

Nedim Aktan YALÇIN

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

Supervisor: Prof. Dr. Fahri VATANSEVER

Estimation of signal parameters has an important place in many fields and applications. The estimation of harmonics and inter-harmonics occurring in power systems is also of great importance in terms of monitoring and improving power quality. However, although traditional methods such as the Fourier transform are successful in harmonic estimation because they can reveal integer multiples of the fundamental frequency of the signal, they are insufficient in inter-harmonic estimation. Due to this shortcoming, alternative methods have been developed for the detection of inter-harmonics and methods created in other fields have been adapted.

In this thesis, new methods are introduced for the implementation of Prony algorithm which belongs to parametric methods and MUSIC algorithm which is one of the subspace analysis methods with discrete Haar transform. The proposed method, which is a hybrid method derived from the Prony and discrete Haar transform, reduces the number of elements of the matrices used in the application of the Prony method, as well as lowering the degree of the polynomial used to find the frequencies. The low number of matrix elements guarantees fast convergence, while the low degree of the polynomial ensures that the roots of the relevant polynomial are less affected by noise. By using discrete Haar coefficients, the Prony method is able to detect the amplitude, phase and frequency information of the signal with a low relative error rate. On the other hand, using the results of the first proposed method, it shows that the MUSIC algorithm can also be implemented with discrete Haar transform coefficients. In addition, reducing the number of elements of the frequency vector, which examines the correlation of frequency and noise, also showed a rapid convergence in this algorithm. By using the discrete Haar coefficients, the Prony method was able to detect the amplitude, phase and frequency information of the signal with a low relative error rate. Similarly, the MUSIC algorithm was able to obtain signal frequencies with a lower error rate. It is observed that the derived methods for the estimation of the signal parameters give successful results with both the approximation and difference coefficients of the discrete Haar transform.

Keywords: Frequency estimation, parameter estimation, Prony method, MUSIC algorithm, Discrete Haar Transform.

2021, xv + 228 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın oluşum sürecinde, derin bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, tezin matematiksel temelini güçlendirilmesinde beni yönlendiren, çalıştığım alanda yeni arayışlara yönelmem için beni cesaretlendiren, yayın etiği kurallarının ve bilimsel çalışma disiplininin önemini aşıl原因 danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fahri Vatansever'e teşekkürü bir borç bilirim. Parametre Kestirimi konusunun temellerini öğrendiğim değerli hocam Sayın Prof. Dr. Erdoğan Dilaveroğlu'na teşekkürlerimi sunarım. Tezimin gelişimine katkı sağlayan ve önerileri ile tezimi zenginleştiren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Murat Uyar'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda yardımlarından dolayı Sayın Y. Müh. Meltem Kulu Süpürtülü'ye teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışmam boyunca desteğini hep hissettiğim, varlığıyla hayatıma anlam katan değerli eşim Meltem Yalçın'a, yaşamım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan annem ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Nedim Aktan Yalçın

01/08/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR | iii |
| İÇİNDEKİLER | iv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Parametrik Olmayan Yöntemler | 24 |
| 1.2. Parametrik Yöntemler | 27 |
| 1.3. Hibrit Teknikler | 31 |
| 1.4. Tezin Motivasyonu | 34 |
| 1.5. Tezin Amaç ve Kapsamı | 36 |
| 1.6. Tezin Katkıları | 37 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI | 38 |
| 2.1. Ara-harmonikler ve Ölçüm Zorlukları | 38 |
| 2.2. Ara-harmonik Kaynakları | 41 |
| 2.2.1. Değişken yüklü elektriksel aygıtlar | 41 |
| 2.2.2. Çift katlı dönüşüm sistemleri | 42 |
| 2.2.3. Çevrim çeviriciler | 45 |
| 2.2.4. Zamanla değişen yükler | 47 |
| 2.2.5. Rüzgâr türbinleri | 49 |
| 2.2.6. Güneş pili hücreleri | 49 |
| 2.2.7. Diğer kaynaklar | 51 |
| 2.3. Ara-harmonik Etkileri | 52 |
| 2.4. Ara-harmoniklerin Modellenmesi | 54 |
| 2.4.1. DFT yöntemi | 54 |
| 2.4.2. IEC gruplama yöntemi | 56 |
| 2.5. Frekans Kestirim Yöntemleri | 58 |
| 2.5.1. Fourier analizi | 59 |
| 2.5.2. Prony analizi | 61 |
| 2.5.3. Maksimum olabilirlik yöntemi | 64 |
| 2.5.4. En küçük kareler yöntemi | 66 |
| 2.5.5. ADALINE yöntemi | 69 |
| 2.5.6. Öz-değer ayrıştırma yöntemleri | 74 |
| 2.5.7. MUSIC ve Pisarenko harmonik ayrıştırması | 79 |
| 2.5.8. ESPRIT ve Matrix Pencil algoritması | 80 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 87 |
| 3.1. Önerilen Yöntemler için Öncül Metotlar | 87 |
| 3.1.1. Ayrık Haar dönüşümü | 87 |
| 3.1.2. Prony yöntemi | 88 |
| 3.2. Önerilen AHD Tabanlı Prony Algoritması | 89 |
| 3.2.1. Frekans kestirimi | 90 |
| 3.2.2. Genlik ve faz kestirimi | 95 |

| | |
|---|---|
| 3.2.3. Önerilen AHD tabanlı Prony algoritması için karmaşıklık analizi | 98 |
| 3.3. Önerilen AHD Tabanlı Prony Algoritmasının Genelleştirilmesi..... | 99 |
| 3.3.1. Frekans kestirimi | 100 |
| 3.3.2. Genlik ve faz kestirimi | 103 |
| 3.4. Önerilen AHD Tabanlı Prony Algoritması İçin Gürültü Analizi..... | 104 |
| 3.5. Önerilen Yöntemin Frekans Kestirimi Açısından Sonuçları ve Diğer Yöntemler | 108 |
| 3.6. Frekans spektrumu dağılımının MUSIC ve ESPRIT yöntemlerine uyarlanması .. | 111 |
| 4. BULGULAR..... | 117 |
| 4.1. Güneş Paneli Sistemi Harmonik/Ara-harmonik Modeli..... | 117 |
| 4.2. P&O MPPT ile sürülen PV sistem modeline dayalı üretilen güç işaretleri | 119 |
| 4.3. Prony Yöntemi ve Önerilen AHD Tabanlı Prony Yöntemi ile Analizler | 133 |
| 4.4. MUSIC Yöntemi ve Önerilen AHD Tabanlı MUSIC Yöntemi..... | 186 |
| 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 199 |
| KAYNAKLAR | 204 |
| ÖZGEÇMİŞ | Hata! Yer işareti tanımlanmamış. |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| | |
|-----------------------|--|
| i | Akım |
| i_g | Şebeke Akımı |
| v | Gerilim |
| f_0 | Temel Frekans |
| f_n | İşaretin n . Harmoniğinin Frekans Bileşeni |
| ω | Açısal Frekans |
| T | Temel Periyot |
| A_0 | İşaretin DA Bileşeni |
| A_n | İşaretin n . Harmoniğinin Genlik Bileşeni |
| θ_n | İşaretin n . Harmoniğinin Faz Açısı Bileşeni |
| \mathbb{C}_S^m | Sinyal Alt Uzayı |
| \mathbb{C}_N^m | Gürültü Alt Uzayı |
| \mathbf{v} | Öz Vektör |
| λ | Öz Değer |
| $1/\hat{g}_m(\omega)$ | MUSIC Spektrumu |
| ϵ_t | Beyaz Gauss Gürültüsü |
| σ^2 | Varyans |
| μ | Ortalama Değer |
| $r_y(u)$ | Y sinyalinin AFC'si |

Kısaltmalar

| | |
|---------|---|
| AA | Alternatif Akım |
| ADALINE | Adaptif Lineer Nöron |
| ADD | Ayrık Dalgacık Dönüşümü |
| ADPD | Ayrık Dalgacık Paket Dönüşümü |
| AFD | Ayrık Fourier Dönüşümü |
| AHD | Ayrık Haar Dönüşümü |
| BBA | Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu |
| CZD | Chirp-Z Dönüşümü |
| DA | Doğru Akım |
| DGM | Darbe Genişlik Modülasyonu |
| DPD | Dalgacık Paket Dönüşümü |
| ESPRIT | Rotasyonel Değişmezlik Tekniğiyle İşaret Parametrelerinin Kestirimi |
| EKMDY | En Küçük Mutlak Değer Yöntemi |
| EKY | En Küçük Kareler Yöntemi |
| EVD | Öz-değer Ayırıştırması |
| FIR | Sonlu Darbe Yanıtı |
| GA | Genetik Algoritma |
| GKF | Genişletilmiş Kalman Filtre |

| | |
|----------|--|
| GSO | Ateş Böceği Sürü Optimizasyonu |
| HFD | Hızlı Fourier Dönüşümü |
| HHD | Hilbert-Huang Dönüşümü |
| KDFD | Kısa Dönem Fourier Dönüşümü |
| KF | Kalman Filtre |
| MLE | Maksimum Olabilirlik Kestiricisi |
| MUSIC | Çoklu İşaret Sınıflandırma |
| PHA | Pisarenko Harmonik Ayrıştırması |
| PLL | Faz Kilitleme Döngüsü |
| PSO | Parçacık Sürü Optimizasyonu |
| PV | Fotovoltaik |
| P&O MPPT | Tedirget-Gözlemle Azami Güç Noktası İzleyicisi |
| RFCA | Recursive Cyclotomic Factorization Algorithm |
| RMS | Etkin Değer |
| SDD | Sürekli Dalgacık Dönüşümü |
| TDA | Tekil Değer Ayrıştırması |
| WGN | Beyaz Gauss Gürültüsü |
| YSA | Yapay Sinir Ağı |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|-----|
| Şekil 2.1. Motor fazlarındaki akım ve gerilimlerin spektral analizi (a) tüm akım spektrumu, (b) ana frekans kaldırıldığında elde edilen akım spektrumu (c) tüm gerilim spektrumu, (d) ana frekans kaldırıldığında elde edilen gerilim spektrumu((Hanzelka ve Bien 2004a)'den değiştirilerek alınmıştır). | 42 |
| Şekil 2.2. İnvörtör sistemleri çıkışlarındaki ara-harmonikler (a) CSI (b) VSI ((Testa ve diğerleri, 2007)'den değiştirilerek alınmıştır.) | 44 |
| Şekil 2.3. PV sistemler için evirici çıkışındaki ana frekans ve harmoniklerin dağılımı ((Sangwongwanich ve diğerleri, 2018)'den değiştirilerek alınmıştır.) | 45 |
| Şekil 2.4. Çevrim çevirici yapısı ((Ozpineci ve Tolbert)'den değiştirilerek alınmıştır). | 45 |
| Şekil 2.5. Çevrim çevirici çıkış frekans dağılımı ((IEEE Interharmonic Task Force, 1995)'den değiştirilerek alınmıştır) | 46 |
| Şekil 2.6. Lazer yazıcının çektiği akım (a) zaman boyutu (b) frekans boyutu (Testa ve diğerleri, 2007)'den değiştirilerek alınmıştır.) | 48 |
| Şekil 2.7. Üç farklı rüzgâr türbininden sekiz ila on üç gün aralığındaki akım ortalama değerleri ((Yang ve diğerleri, 2014)'den değiştirilerek alınmıştır)..... | 50 |
| Şekil 2.8. MPPT algoritması ile ve yüzde on güç ile çalışan PV sistemin şebekeye yaydığı ara-harmonikler (a) Adım gerilimi 6 V (b) Adım gerilimi 12 V (c) Adım gerilimi 18 V (d) MPPT frekansı 2 Hz (e) MPPT frekansı 5 Hz (f) MPPT frekansı 10 Hz ((Sangwongwanich ve diğerleri, 2018)'den değiştirilerek alınmıştır) | 51 |
| Şekil 2.9. 50 Hz'lik güç sistemi için gerilimin etkin değerinin %0.2 oranında bozulması ((Gunther, 2001)'den değiştirilerek alınmıştır.)..... | 53 |
| Şekil 2.10. Harmonik grup, alt grup ve ara-harmonik grup kavramları (Lin, 2014)'den değiştirilerek alınmıştır)..... | 58 |
| Şekil 2.11. ADALINE frekans kestirim şeması (G.W. Chang ve diğerleri, 2009)'dan değiştirilerek alınmıştır. | 70 |
| Şekil 2.12. ADALINE genlik ve faz kestirim şeması (G.W. Chang ve diğerleri, 2009)'dan değiştirilerek alınmıştır. | 71 |
| Şekil 3.1. Önerilen yöntem ve Prony yöntemi arasındaki frekans eşleşmeleri..... | 111 |
| Şekil 3.2. AHD'nin MUSIC algoritmasına uygulanması sonucunda elde edilen frekans bileşenleri | 114 |
| Şekil 3.3. AHD'nin MUSIC algoritmasına uygulanması ve spektrumun 1/26 kat daraltılması sonucunda elde edilen frekans bileşenleri..... | 115 |
| Şekil 3.4. İşaret değerleri ile MUSIC algoritmasının uygulanması | 116 |
| Şekil 4.1. Çizelge 4.1 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$) | 120 |
| Şekil 4.2. Çizelge 4.1 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$) | 120 |
| Şekil 4.3. Çizelge 4.2 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$) | 121 |
| Şekil 4.4. Çizelge 4.2 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$) | 122 |
| Şekil 4.5. Çizelge 4.3 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$) | 123 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4.6. Çizelge 4.3 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 50 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 12 \text{ V}$)..... | 123 |
| Şekil 4.7. Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 50 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 124 |
| Şekil 4.8 Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 50 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 125 |
| Şekil 4.9. Çizelge 4.5 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 5 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 12 \text{ V}$)..... | 126 |
| Şekil 4.10. Çizelge 4.5 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 5 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 12 \text{ V}$)..... | 126 |
| Şekil 4.11. Çizelge 4.6 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 5 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 127 |
| Şekil 4.12. Çizelge 4.6 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 5 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 128 |
| Şekil 4.13. Çizelge 4.7 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 12 \text{ V}$)..... | 129 |
| Şekil 4.14. Çizelge 4.7 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 12 \text{ V}$)..... | 129 |
| Şekil 4.15. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 130 |
| Şekil 4.16. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 131 |
| Şekil 4.17. Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($\text{SNR} = 10 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 50 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 131 |
| Şekil 4.18. Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($\text{SNR} = 20 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 50 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 132 |
| Şekil 4.19. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($\text{SNR} = 10 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 132 |
| Şekil 4.20. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($\text{SNR} = 20 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)..... | 133 |
| Şekil 4.21. Çizelge 4.10'un genlik değerleri için sırasıyla Prony, AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem ve AHD farklarıyla ile önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi (b) Önerilen yöntemin AHD ortalamaları ile hata analizi (c) Önerilen yöntemin AHD farkları ile hata analizi..... | 136 |
| Şekil 4.22. Çizelge 4.10'un frekans değerleri için sırasıyla Prony, AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem ve AHD farklarıyla ile önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi (b) Önerilen yöntemin AHD ortalamaları ile hata analizi (c) Önerilen yöntemin AHD farkları ile hata analizi..... | 137 |
| Şekil 4.23. Çizelge 4.12'nin genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 138 |
| Şekil 4.24. Çizelge 4.12'nin frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 139 |
| Şekil 4.25. Çizelge 4.14'ün genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 141 |
| Şekil 4.26. Çizelge 4.14'ün frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 141 |
| Şekil 4.27. Çizelge 4.16'nın genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 143 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4.52. Çizelge 4.40'ın frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 173 |
| Şekil 4.53. Çizelge 4.42'nin genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 175 |
| Şekil 4.54. Çizelge 4.42'nin frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 175 |
| Şekil 4.55. Çizelge 4.44'ün genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 177 |
| Şekil 4.56. Çizelge 4.44'ün frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 178 |
| Şekil 4.57. Çizelge 4.46'nın genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 180 |
| Şekil 4.58. Çizelge 4.46'nın frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 181 |
| Şekil 4.59. Çizelge 4.48'in genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 183 |
| Şekil 4.60. Çizelge 4.48'in frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi | 183 |
| Şekil 4.61. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.1 için elde edilen sonuçlar..... | 187 |
| Şekil 4.62. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.1 için elde edilen sonuçlar..... | 187 |
| Şekil 4.63. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.2 için elde edilen sonuçlar..... | 188 |
| Şekil 4.64. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.2 için elde edilen sonuçlar. | 188 |
| Şekil 4.65. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.3 için elde edilen sonuçlar..... | 189 |
| Şekil 4.66. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.3 için elde edilen sonuçlar. | 189 |
| Şekil 4.67. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar..... | 190 |
| Şekil 4.68. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar. | 190 |
| Şekil 4.69. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.5 için elde edilen sonuçlar..... | 191 |
| Şekil 4.70. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.5 için elde edilen sonuçlar. | 191 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4.71. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.6 için elde edilen sonuçlar..... | 192 |
| Şekil 4.72. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.6 için elde edilen sonuçlar. | 192 |
| Şekil 4.73. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.7 için elde edilen sonuçlar..... | 193 |
| Şekil 4.74. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.7 için elde edilen sonuçlar. | 193 |
| Şekil 4.75. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar..... | 194 |
| Şekil 4.76. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar. | 194 |
| Şekil 4.77. Örnekleme frekansı 100 kHz ve SNR = 10 dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar..... | 195 |
| Şekil 4.78. Örnekleme frekansı 100 kHz ve SNR = 20 dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar..... | 195 |
| Şekil 4.79. Örnekleme frekansı 100 kHz ve SNR = 10 dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar..... | 196 |
| Şekil 4.80. Örnekleme frekansı 100 kHz ve SNR = 20 dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar..... | 196 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|-----|
| Çizelge 4.1. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$ | 119 |
| Çizelge 4.2. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$ | 121 |
| Çizelge 4.3. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$ | 122 |
| Çizelge 4.4. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$ | 124 |
| Çizelge 4.5. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$ | 125 |
| Çizelge 4.6. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$ | 127 |
| Çizelge 4.7. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$ | 128 |
| Çizelge 4.8. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$ | 130 |
| Çizelge 4.9. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.1'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 135 |
| Çizelge 4.10. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.1'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) .. | 136 |
| Çizelge 4.11. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.1'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)..... | 137 |
| Çizelge 4.12. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.1'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 138 |
| Çizelge 4.13. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.2'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)* | 139 |
| Çizelge 4.14. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.2'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)* | 140 |
| Çizelge 4.15. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.2'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)* | 142 |
| Çizelge 4.16. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.2'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)* | 142 |
| Çizelge 4.17. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.3'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 144 |
| Çizelge 4.18. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.3'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) .. | 145 |
| Çizelge 4.19. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.3'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)..... | 147 |
| Çizelge 4.20. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.3'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 147 |

| | |
|--|-----|
| Çizelge 4.21. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)** | 149 |
| Çizelge 4.22. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) .. | 150 |
| Çizelge 4.23. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)..... | 152 |
| Çizelge 4.24. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 152 |
| Çizelge 4.25. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.5'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 154 |
| Çizelge 4.26. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.5'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) .. | 155 |
| Çizelge 4.27. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.5'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)*** | 157 |
| Çizelge 4.28. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.5'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 157 |
| Çizelge 4.29. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.6'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)**** | 159 |
| Çizelge 4.30. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.6'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) .. | 160 |
| Çizelge 4.31. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.6'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)***** .. | 161 |
| Çizelge 4.32. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.6'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 162 |
| Çizelge 4.33. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.7'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 164 |
| Çizelge 4.34. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.7 'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) . | 164 |
| Çizelge 4.35. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.7'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)***** | 166 |
| Çizelge 4.36. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.7 'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 167 |
| Çizelge 4.37. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 168 |
| Çizelge 4.38. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) .. | 169 |
| Çizelge 4.39. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)..... | 171 |
| Çizelge 4.40. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) | 171 |
| Çizelge 4.41. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve SNR = 10 dB olması durumunda) | 173 |

| | |
|---|-----|
| Çizelge 4.42. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB durumunda)..... | 174 |
| Çizelge 4.43. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR=20$ dB olması durumunda) | 176 |
| Çizelge 4.44. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 20$ dB durumunda)..... | 176 |
| Çizelge 4.45. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB olması durumunda) | 178 |
| Çizelge 4.46. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB durumunda)..... | 179 |
| Çizelge 4.47. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 20$ dB olması durumunda) | 181 |
| Çizelge 4.48. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 20$ dB durumunda)..... | 182 |
| Çizelge 4.49. Prony ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemlerinin hesaplama süreleri | 184 |
| Çizelge 4.50. Farklı SNR değerleri için Çizelge 4.4'deki veriler kullanılarak elde edilen frekansların bağıl hata oranları (%)..... | 197 |
| Çizelge 4.51. Farklı SNR değerleri için Çizelge 4.8'deki veriler kullanılarak elde edilen frekansların bağıl hata oranları (%)..... | 197 |
| Çizelge 4.52. MUSIC ve AHD tabanlı MUSIC algoritmaları için hesaplama süreleri. | 198 |

1. GİRİŞ

Günümüze değin birçok düşünür, doğanın işleyişi hakkında derin bir merak ve bilme arzusu içerisinde fikirler ortaya koymuştur. Bunlardan en etkileyicilerinden birisi, “Matematik Tanrı’nın evreni yazdığı dildir” sözlerinin sahibi Galileo Galilei’nin ortaya attığı bakış açısıdır. Buradan hareketle, doğanın matematiksel olarak açıklanması amacıyla fizik, kimya ve biyoloji alanlarında kuramlar ve bunları destekleyen matematiksel modeller ileri sürülmüştür.

Doğayı anlamak için kullanabilecek önemli bir model, onun içerisindeki varlıkların işaret olarak ifade edilmesine dayanır. Bu işaretler, ses işareti olarak yorumlanabilecek bir kuş cıvıltısında olduğu gibi sürekli veya bir ağacın yapraklarından toprağa damlayarak aralıklı bir şekilde ses çıkaran su taneciği gibi kesikli formlarda bulunabilir. İşaretler şekil olarak ele alındığında, sıfır ivme ile hareket halinde olan bir cismin hız vektörünün zamanla değişmezliği, sabit bir fonksiyon veya işaret olarak matematiksel biçimde ifade edilmesini gerektirir. Aynı cismin kat ettiği yol matematiksel olarak incelendiğinde, bir rampa fonksiyonu veya işareti ile karşılaşılacaktır. Şayet sürtünme ve diğer kayıpların ihmal edildiği bir ortamda salınım yapan bir sarkacın hız zaman grafiği çizilmek istendiğinde, hızın zamana göre düzenli tekrarlar oluşturduğu görülmektedir. Düzenli biçimde meydana gelen bu tekrarlar, işaretin periyodunu ifade eder. Periyodun çarpmaya göre tersi ise işaretin frekansını belirtecektir. En basit haliyle işaretlerin, sürekli veya kesikli formda olacağı; sabit, rampa veya farklı biçimlerde gözlemlenebileceği; bir periyoda sahip olabileceği (kendini tekrar etmeyen işaretlerin sonsuz periyotta olduğu varsayılabilir) söylenebilir. Bunlara ek olarak, işaretin zaman boyutunda aldığı değerler genlik olarak ve aynı periyoda sahip iki işaretin birbirleri arasındaki gecikme faz farkı olarak isimlendirilir.

Doğayı modellemek adına mühendislik alanında önemli çalışmalardan birisi Fourier seri yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, metal bir yüzeyde ısı denklemini çözmek amacıyla Jean-Baptiste Joseph Fourier tarafından ortaya atılmıştır. Isı denkleminin genel çözümünün elde edilmesini amaçlayan bu yaklaşıma göre, ısı kaynağının formu ne olursa olsun basit sinüzoidal toplamlar olarak ifade edilebilirliği varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayımın bütün işaretler için geçerli olamayacağı, ilgilenilen işaretin bazı matematiksel sınırlamalar dâhilinde Fourier serilerine ayrıştırılabileceği, Fourier’in ortaya attığı çözüm

üzerinde çalışmalarda bulunan matematikçiler (Peter Gustav, Lejeune Dirichlet ve Bernhard Riemann) tarafından ortaya konulsa da, Fourier'in 1807 yılında önerdiği bu yaklaşım bilim dünyasına çok önemli bir katkı sağlamıştır.

Fourier'in ortaya attığı yaklaşım, elektrik sistemlerinin modellenmesinde de sıklıkla kullanılan bir yaklaşımdır. Elektriksel gücün verimli bir şekilde aktarılması, daha düşük iletim kayıplarına sahip olmasından dolayı yüksek gerilim ile taşınmasını gerektirir. Bu gücün en ideal formu sinüzoidal işaretlerdir. Çünkü alternatif akım jeneratörleri, içyapıları gereği ideal durumda sinüzoidal işaretler üretir ve değişken işaretler değişken manyetik alanlar oluşturacağı için transformatör gibi elemanlar tarafından ideal durumda güç sabit kalmak şartıyla gerilim değerlerinin yükseltip düşürülmesine imkân sağlar. Bu da verimli bir şekilde gücün iletilmesini olanak tanır. İdeal durumda saf bir sinüs dalgası üretmesi gereken alternatif akım jeneratörleri ve bu işaretleri sinüzoidal bir biçimde dönüştürmesi beklenen transformatörler, bu tezin Kuramsal Temeller ve Kaynak Araştırması bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan sebeplerden dolayı bozuk dalga formlarına sahip olabilirler. Bu dalga formları, şebekelerde istenmeyen durumlara sebebiyet vermektedir ve analiz edilmesi gerekir. Fourier'in yaklaşımı sayesinde güç işaretleri, sinüzoidal toplamlar olarak ifade edilebilir ve dolayısıyla farklı frekans bileşenlerine ayrıştırılabilir. Bu bileşenler güç sistemi alanında harmonikler olarak isimlendirilir ve temel harmoniğin sistemde bulunması, diğer harmoniklerin ise sistem dışına itilmesi amaçlanır. Bu bağlamda güç sistemlerinde genlik, frekans ve faz tanımlamaları önemlidir. Güç sistemlerinde genlik sinüzoidal işaretin zaman boyutunda aldığı değerleri, faz en az iki işaret arasında meydana gelen gecikmeyi ve frekans ise bir işaretin bir periyot boyunca sahip olduğu süre değerinin çarpmaya göre tersi olarak tanımlanır. Bu tanımlamaların ardından, güç sistemlerinde harmonik probleminin incelenmesi, konunun derinlemesine araştırılması için önem arz etmektedir.

Güç sistemlerinde harmonik problemi, alternatif akım (AA) sistemleri kadar eskidir ve bu problemin sebepleri ile etkileri XX. yüzyılın başlarında yoğun olarak çalışılmıştır (Bedell ve Mayer, 1915; Bedell ve Tuttle, 1906a; Frank, 1910; Hertz ve Saunders, 1954). Bedell ve Tuttle (1906b), tarafından yapılan çalışmada, sinüzoidal bir elektromotor kuvvetin, devre içerisindeki endüktans ve dirence bağlı olarak, belirli bir faz açısıyla yine aynı şekilde sinüzoidal bir akım oluşturacağı belirtilmiştir. Ancak ilgili çalışmada,

devrede demir nüve içeren transformatör mevcutsa, demirin histerezis özelliğine bağlı olarak devre içerisinde harmoniklerin bulunacağı ve aynı zamanda, simetrik histerezis denkleminin kullanılmasıyla bu harmoniklerin ana frekansın sadece tek katlarında görüleceği gösterilmiştir. Bu çalışmada, bozulan dalga şeklinin, ekseriyetle ana frekansın üçüncü katındaki harmonik tarafından belli bir faz açısıyla bozulduğu sonucuna, Fourier serileri temel alınarak ulaşılmıştır. Frank (1910) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Bedell ve Tuttle (1906b)'in çalışmasına atıf yapılarak osiloskop/osilograf ile 25kW'dan 2100 kW'a kadar çeşitli transformatör hatlarındaki harmonik akım ve gerilim dalga şekilleri sunulmuştur¹. İncelenen hatlardaki transformatörlerin üzerindeki dalga şekillerinin üçüncü harmonik bozulmadan nasıl etkilendiğine dair veriler değerlendirilmiştir. Bedell ve Mayer (1915) tarafından yapılan çalışmada, alternatif akımın bir periyodu süresince, devreye bağlı bir direncin sıcaklık katsayısının değişmesi sonucunda meydana gelen direnç değerinin değişiminin, şebekede üçüncü harmonik bozulmaya sebep olduğu matematiksel olarak ifade edilmiş, sıcaklık katsayısının pozitif veya negatif olması durumunda dalga şeklinin nasıl bozulduğu gösterilmiştir. Thornton Coe (1929) tarafından sunulan çalışmada, ticari olarak üretilen bir harmonik analizör tanıtılmıştır. Bu analizör, osiloskop ile adım adım harmoniklerin hesaplanması yerine bu işlemi otomatik olarak birkaç dakika içerisinde gerçekleştirmekte ve harmonikler arasındaki faz açılarını da kullanıcıya sunabilmektedir. Sistemin iç yapısı, gerekli tanımlamalar, matematiksel denklemler ve sistemin verdiği sonuçlar ilgili çalışmada sunulmuştur. Doggett ve Queer (1929) tarafından yine aynı yıl yapılan diğer bir çalışmada, şebekeye bağlı endüksiyon motorlarının harmoniklerden nasıl etkilendiği sorusuna yanıt aranmıştır. Bu soruya niceliksel olarak cevap veren ilk çalışma olan bu makalede, harmoniklerin tüm işletme gücünün %10 veya daha üst güce sahip olması durumunda, bütün endüksiyon motorlarının, boştaki çalışma durumu hariç diğer tüm çalışma durumlarında düzensiz çalışacağı gösterilmiştir. Evans ve Muller (1939) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, şebekeye bağlı doğrultucu ve eviricilerin ürettikleri harmonik bileşenlerin hesaplanmasına yönelik matematiksel bir yöntem ileri sürülmüştür. AA devrelerinde frekansa bağlı olarak reaktans değerinin değişmesi hususu göz önüne

¹ Günümüzde Transformatörlerin güçleri Volt-Amper (VA) birimi ile ifade edilir. Fakat ilgili çalışma, aktif güç ve reaktif güç tanımlamalarını literatüre kazandıran Boucherot'un (1907) çalışmasına yakın bir tarihte yayımlandığı için transformatörlerin güçleri aktif güç ile ifade edilmiştir.

alınarak önerilen matematiksel yöntem, deneysel çalışmalar doğrultusunda yeniden düzenlenmiştir. Hertz ve Saunders (1954) tarafından yapılan çalışmada, elektrik makinelerinin endüksiyon bobini yuvalarının şebekeye verdiği harmonik etkinin tasarım aşamasında azaltılması yönünde bir yöntem ileri sürülmüştür. Bu yöntem, Fourier serileri kullanılarak geliştirilmiştir. Bu nedenle esas harmoniğin tam sayı katlarındaki harmonikleri değerlendirmektedir. İlgili çalışma, delikli kartlar ile çalışan bilgisayar üzerinde uygulanmıştır.

AA sistemlerinin erken dönemlerinin incelendiği yukarıdaki çalışmalarda, harmoniklerin nasıl oluştuğu konusu üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu etkilerin nasıl filtrelenebileceğinden ziyade, daha çok tasarım aşamasında bunlardan nasıl kaçınılabileceği hakkında incelemeler yapılmıştır. Bedell ve Tuttle (1906b) tarafından yapılan çalışmada, demirin histerezis özelliklerinin şekillerinin incelenmesi ve Hertz ve Saunders (1954) tarafından yapılan çalışmada ise elektrik makine tasarımı konusunun ele alınması, bu görüşü destekler niteliktedir. 1960'lardan sonra gelen çalışmalar, bilgisayarların da laboratuvar ortamlarında kullanımının yaygınlaşması sebebiyle daha çok frekans spektrumu tahmin yöntemlerinin geliştirilmesine, bu yöntemlerin bilgisayar üzerinde uygulanabilmesi hususuna odaklanmaktadır ve güç spektrumlarının bu yöntemlerle tahmin edilmesine dayalı uygulamalar içermektedir.

Belirtilen hususlar göz önüne alındığında ve 1950'li yılların sonlarından itibaren transistör teknolojisinin bilgisayarları hızlı bir şekilde geliştirmesiyle spektrum analizinin Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) ile gerçekleştirilmesi üzerinde çalışıldığı gözlemlenebilir. Bu bağlamda, AFD'nin yüksek hesaplama maliyetine sahip olmasından dolayı, bilgisayar ortamında AFD spektrumunu daha az hesaplama maliyeti ile elde edebilecek algoritmaların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu algoritmaların ilk örneklerinden birisi Goertzel algoritmasıdır (Goertzel, 1958). Bu algoritma tüm frekans spektrumu yerine, istenilen sayıdaki frekans bileşenini AFD'ye göre daha az karmaşıklıkla hesaplayabilmektedir. Tüm frekans spektrumunu hesaplayabilmek için Cooley ve Tukey (1965) tarafından Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) algoritması önerilmiştir. Temel harmoniğin tam sayı katlarını inceleyen bu dönüşüm, klasik AFD'ye göre daha az hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Tretter ve Steiglitz (1967) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, örneklenmiş bir veriden güç spektral yoğunluğunun

belirlenmesini sağlayan ve bunu gerçekleştirmek için z 'nin rasyonel fonksiyonlarını kullanan bir teknik ileri sürlmüştür. Sharma ve Mahalanabis (1973) tarafından yapılan çalışmada Kalman filtreleme (KF) ile harmonik analiz algoritması sunulmuştur. İlgili alışmada KF'nin katsayılarının tahmininde, minimum varyans filtresinin yerini alabileceği belirtilmiştir. Osborne (1975) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada, en küçük kareler probleminde, maliyet fonksiyonunun lineer olmayan parametreler içeren fonksiyonların lineer kombinasyonları biçiminde yazılması durumunda, ayrıştırılabilir olarak tanımlanabileceği belirtilmiştir. Buradan hareketle, sadece lineer olmayan parametreler ele alınarak ayrıştırılabilir olduğu varsayılan durumun minimize (en küçükleme-minimization) probleminde nasıl dnüşürlebileceği gösterilmiştir. Yazar bu dönüşümü, Prony yönteminin genelleştirilmiş bir hali olarak yorumlamakla birlikte, Prony yöntemindeki birçok hesaplama zorluğunun czmne ışık tuttuğunu belirtmiştir. Harris (1978) tarafından yapılan çalışmada, veri pencerelerinin geniş bant gürültüsü (broadband noise) altında ve komşu frekansta görece yüksek genlikli harmonik bileşenin bulunması durumunda farklı pencereleme yöntemlerinin AFD ile kullanılmasının zlı bir değerlendirmesi sunulmuştur. Ayrıca, HFD'nin farklı pencereleme yöntemleri ile kullanıldığında ortaya çıkan sorunlardan bahsedilmektedir. V. K. Jain ve diğerleri (1979) tarafından yapılan çalışmada, periyodik işaretlerin çoklu parametre ölçümleri için interpolasyonlu (enterpole) HFD algoritmaları türetilmiştir. Bu algoritma ile ana frekans, faz ve genlik değerleri mevcut algoritmalara göre yüksek doğrulukla saptanmıştır. Marple (1979) tarafından yine aynı yıl gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, Pisarenko ve Prony yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

1980'li yıllara gelindiğinde, HFD yönteminin frekans kestiriminde eksik olduğu noktaları ortaya koyan çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu eksiklerin üstesinden gelen yeni algoritmalar literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca, bu yıllara değin spektrum analizi üzerine yapılmış makaleleri derleyen çalışmalar da ortaya çıkmaya başlamıştır. Girgis ve Ham (1980) tarafından yapılan çalışmada, HFD yönteminin doğasında var olan örtüşme, picket-fence etkisi ve spektral sızıntı konuları irdelenmiş, bu yöntemin tuzakları, yazılan bilgisayar programıyla ve çeşitli örnekler ile niceliksel olarak gösterilmiştir. Başka bir çalışma ise Hostetter (1980) tarafından gerçekleştirilmiş, zyinelemeli AFD yöntemi literatüre kazandırılmıştır. Bu yöntem, AFD'yi durum değişkeni olarak ifade edebilmekte ve sayısal hataların yüksek olduğu durumlarda da efektif bir şekilde spektrum analizi

yapabilmektedir. Thomson (1982) tarafından yapılan çalışmada, sonlu örnek sayısına sahip durağan zaman serilerinin spektrumunu kestiren bir yöntem geliştirilmiştir. Grandke (1983) tarafından yapılan çalışmada, Jain ve diğerleri (1979) tarafından gerçekleştirilmiş olan enterpole AFD algoritmasının olumsuz yönleri değerlendirilmiş ve bu olumsuzlukları aşmak için algoritma içerisine ağırlıklandırma katsayıları uygulanarak daha iyi çözüm sunan bir algoritma ortaya konmuştur. Ayrıca 1983 yılında IEEE Güç Sistem Harmonikleri Çalışma Grubu, o yıla kadar meydana gelen harmonik kaynaklarını, bunların oluşturduğu problemleri açıklayan bir rapor oluşturmuştur (Harmonics, 1983). Dahası, ileriye dönük olarak harmonik kaynağı olabilecek elektriksel sistemlerin harmonik kapasiteleri açısından analitik incelemelerini ve oluşturabilecekleri problemleri raporlarında sunmuşlardır. Enerji depolanması, kontrolü ve dönüşümü konularındaki meseleleri incelemiş, buna bağlı olarak, şebeke içerisindeki sistem ve donanımların, harmonik ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi ve cihazlar üzerindeki harmonik etkilerin daha iyi kavranması hususunda önemli ölçüde çaba gösterilmesi gerektiğini, söz konusu raporda vurgulamışlardır. Hostetter (1983) kaynağında yazar, yine kendisine ait olan Hostetter (1980) çalışmasını geliştirerek, düzenli bir şekilde işlenmemiş işaretlerin filtrelenmesini ve bu işaretler üzerinde matematiksel işlemlerin yapılabilmesini sağlayan bir algoritma önermiştir. 1984 yılında Güç Sistemi Harmonikleri üzerine yapılmış birçok çalışmayı listeleyen literatür araştırması “Power System Harmonic Working Group” tarafından sunulmuştur (IEEE Power System Harmonics Committee, 1984). Bu literatür taraması, on yedi alt bölüme ayrılmıştır ve alt bölümlerle ilgili çalışmalar, düzenli bir sırayla araştırmacıların dikkatine sunulmuştur. Bu çalışmada Turan Gönen ve A. A. Mahmoud’un büyük katkılarının olduğu çalışma konseyi tarafından “Teşekkür” bölümünde belirtilmiştir. Martens (1984) tarafından AFD’yi, özyinelemeli olarak hesaplayan ve HFD’den daha verimli olduğu gösterilen bir algoritma sunulmuştur. Bitmead ve diğerleri (1986) tarafından, Kısa Dönem Fourier Dönüşümü (KDFD) için Kalman Filtre (KF) yaklaşımı geliştirilmiştir. Yine aynı tarihte, frekans kestiriminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan Çoklu İşaret Sınıflandırması (MUSIC) algoritması Schmidt (1986) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bu yöntem, HFD yöntemi gibi temel bir tekniktir. Bu yöntemin varyasyonları ile pek çok alt yöntem geliştirilmiştir. İlgili konuya bu çalışmanın Kuramsal Temeller bölümünde de değinilmiştir. Dash ve Sharaf (1988) tarafından yapılan çalışmada, KF ile güç

spektrumunu saptayan bir yöntem önerilmiştir. Roy ve Kailath (1989) tarafından yapılan çalışmada, işaret kestiriminde temel yöntemlerden biri olan ESPRIT algoritması literatüre kazandırılmıştır. Bu konu tezin Kuramsal Temeller bölümünde incelenmiştir. Andria ve diğerleri (1989) tarafından yapılan çalışmada, HFD temeline dayalı matematiksel bir yöntem ile harmonik ve ara-harmonik frekansları, görece başarılı bir şekilde tespit edilmiş, genlik ve faz bilgileri de elde edilebilmiştir. Öne sürülen bu yöntemin, düşük hesaplama maliyetine sahip olduğu ve kolay uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

1990'lı yıllara gelindiğinde, HFD algoritmalarının genel bir değerlendirilmesi, Yapay Sinir Ağı (YSA) uygulamaları, KF algoritması (İlk uygulamanın 1973'te yapılmasına rağmen, 1990'dan sonra sıklıkla kullanılmaya başlanmış bir yöntem) ve Hilbert-Huang, chirp-Z dönüşümü (CZD) gibi dönüşüm algoritmaları ile çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Duhamel ve Vetterli (1990) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hesaplama yükünü, önemli ölçüde azaltan HFD ve bu dönüşüm tabanlı algoritmalar incelenmiştir. Bu algoritmalar Split-radix HFD, Prime Factor Algorithm ve Winograd HFD yöntemleridir. Bu çalışmada ilgili yöntemler incelendikten sonra, açık problemler ve uygulamalar hakkındaki konular vurgulanmıştır (Duhamel ve Vetterli, 1990).

Wang (1990) tarafından, CZD tabanlı frekans kestirim yöntemi önerilmiştir. CZD'nin HFD'ye göre, frekans spektrumunu hesaplama konusunda daha esnek yönlerinin olduğu belirtilmiş fakat matematiksel uygulamasının karmaşık olduğu ve ek hafıza alanlarına ihtiyaç duyulduğuna değinilmiştir. Buradan hareketle, segmentasyonlu CZD geliştirilmiş, ihtiyaç duyulan hafıza alanının, çok büyük veri miktarlarında bile düşük seviyede tutulması, geliştirilen yöntemle başarılmıştır (Wang, 1990).

Soliman ve diğerleri (1990) tarafından yayınlanan çalışmada, lineer olmayan yükler veya kaynaklar barındıran elektrik şebekelerinin harmonik üreteceği belirtilmiştir. Bu bağlamda, temeli En Küçük Kareler Yöntemi (EKY)'ye dayanan yeni bir harmonik ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın başarımı; veri penceresinin büyüklüğü, işaretin örnekleme frekansı gibi birçok farklı açıdan değerlendirilmiştir (Soliman ve diğerleri, 1990).

Girgis ve diğeri (1991) tarafından yapılan çalışmada, güç sistemi gerilim ve akım dalga biçimindeki harmoniklerin izlenmesi için bir ölçüm şeması geliştirilmiştir. Geliştirilen ölçüm şeması, durağan olmayan işaretlere de uygulanabilmektedir. Çalışmada önerilen yöntem, geleneksel Fourier ve HFD tabanlı yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, KF yöntemine dayandırılarak geliştirilen bu tekniğin, gerçek test verileri üzerinde daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Girgis ve diğeri, 1991).

Mori ve Suga (1991) tarafından çalışmada, güç sistem harmoniklerinin YSA ile saptanmasını sağlayan bir yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada, özyinelemeli sinir ağlarının etkinliği araştırılmıştır. Bu tür ağların, geleneksel ileri beslemeli YSA'lerden farklı olarak zaman serilerinin dinamiklerinin daha iyi incelenebilmesine olanak tanıdığı belirtilmiştir. Özyinelemeli YSA kurularak harmonik kestirim başarımı değerlendirilmiştir (Mori ve Suga, 1991).

Mori ve diğeri (1992) tarafından sunulan çalışmada, ileri beslemeli geri yayılım algoritmasına dayalı bir YSA modeli önerilmiştir. Önerilen yöntemin başarımını değerlendirmek için, bilgisayar temelli ölçüm sistemi yardımıyla harmonik içeren gerilim dalga şekilleri ölçülmüştür. Daha sonra, şebekedeki gerilim harmonik içerikleri, geleneksel yöntemler ve geliştirilen yöntem ile tahmin edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur (Mori ve diğeri, 1992).

Oowski (1992) tarafından yapılan çalışmada, gerçek zamanlı olarak harmonik kestirimi yapabilen bir YSA önerilmiştir. Öne sürülen yöntemin enerji iletim kalitesini arttırdığı konusuna değinilmiş ve pratik olarak uygun bir maliyetle nasıl geliştirileceği konusu açıklanmıştır.

Ferrero ve Ottoboni (1992) tarafından yapılan çalışmada, örnekleme hızı ve işaret frekansı arasında senkronizasyonun olmamasının, periyodik işaretlerin frekanslarında meydana gelen hatanın başlıca sebebi olduğu vurgulanmıştır. Bahsedilen problemin çözümü için sunulan bazı yöntemlerin mevcut olduğu ifade edilerek hesaplama maliyetlerinin yüksek ve oluşan hatanın giderilememesinden kaynaklı verimsiz oldukları vurgulanmıştır. Bu eksikliğin giderilmesi için örnekleme hızı ile işaret frekansının senkronize edilmesi gerektiği önerilmiştir.

Andria ve diğeri (1992) tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel DA-DA dönüştürücülerde harmonik analizi yapılabilmesi amacıyla Genişletilmiş Kalman Filtre (GKF) ve HFD tekniklerine dayanan iki yeni yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemlerin harmonik kestirim başarımlarının yüksek olduğu ifade edilmiştir. GKF temeline dayalı yöntemin gerçek zamanlı olarak temel frekansı ve diğeri harmonikleri kestirebildiği, başarılı bir şekilde toplam harmonik bozulmayı ölçebildiği belirtilmiştir.

Schoukens ve diğeri (1992) tarafından yapılan çalışmada, tek frekanslı bir işaret için geliştirilmiş beş farklı enterpole HFD algoritmaları kıyaslanmıştır. Karşılaştırma kriteri olarak gürültüye duyarlılık ve yakınsama hataları kullanılmıştır.

Abu Al-Feilat ve diğeri (1994) tarafından yapılan çalışmada, AFD, EKY, En Küçük Mutlak Değer Yöntemi (EKMDY) teknikleri üç fazlı konvertör devresindeki harmoniklerin tespit edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Karşılaştırma kriteri olarak, işaret gürültü oranı (SNR), örnek sayısı, örnekleme frekansı, hesaplama zamanı ve eksik veri durumları seçilmiştir. Yapılan karşılaştırmada sırasıyla EKMD ve EKY yöntemlerinin daha başarılı olduğu ifade edilmiştir.

Kim ve diğeri (1994) tarafından yapılan çalışmada, üç fazlı doğrultucu tipindeki elektrik cihaz arayüzündeki diyotların performansının artırılması için bir yöntem önerilmiştir. Geliştirilen yöntem, değişken yük koşullarında dahi, sinüzoidal girişlerde güç faktörünün 1'in yakın değerlerinde olmasını sağlamaktadır. Yöntem, üçüncü harmonik bozulmayı sürekli gözlemleyen ve Darbe Genişlik Modülasyonu'na (DGM)'e bağlı bir kontrol tekniğiyle, devreye yerleştirilmiş transformatör yardımıyla, üçüncü harmonikleri bastırmaktadır.

Osowski (1994) tarafından yapılan çalışmada, güç sistem harmoniklerinin tespit edilmesi amacıyla istatistiksel bir yaklaşım ileri sürülmüştür. Bu yaklaşım, Tekil Değer Ayırıştırması (Singular Value Decomposition-TDA) yöntemine dayanmaktadır. TDA yöntemine bağlı olarak üç farklı alt teknik ileri sürülmüştür. Öne sürülen bu yöntemler, harmonik kestirim başarımları açısından değerlendirilmiştir.

Mathew ve Reddy (1994) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Pisarenko Harmonik Ayırıştırma (PHA) yöntemi, YSA kullanarak uygulanmıştır. Pisarenko yöntemindeki temel adımın, esas verinin oto-korelasyon matrisinin en küçük öz değerlerine karşılık

gelen öz vektörlerin hesaplanması olduğu belirtilmiştir. İlgili çalışmada ise bu temel işlemin YSA'ya nasıl uygulandığı açıklanmıştır. Yöntem bilgisayar ortamında test edilmiştir.

Daponte ve diğerleri (1996) tarafından yapılan çalışmada, yüksek genlikli frekansların yakınındaki düşük genlikli harmonik olmayan tonların görüntülenebilirliğinin artırılması ve yüksek frekanslardaki çok düşük genlikli harmoniklerin tespit edilebilmesi amacıyla CZD tabanlı harmonik analiz yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemin avantajı, hesaplama maliyetini arttırmadan işaretlerin yüksek çözünürlük ile incelenebilmesini sağlamaktır. Benzetimler ile yöntemin geçerliliği çalışmada gösterilmiştir.

Nagesha ve Kay (1996) tarafından yapılan çalışmada, parametrik zaman seri modeli üzerinde karmaşık spektral problemler konulu bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışmada, parametrelerin Maksimum Olabilirlik Kestiricisi (MLE) ile tahmini göz önüne alınmıştır. Bütün tahmin probleminin esasında, çalışma içerisinde tanımlanan sıkıştırılmış olasılık fonksiyonunun sinüzoidal frekanslara göre azami değer almasının sağlanması konusundan temel aldığı gösterilmiştir. Çalışmada, bu yaklaşıma ek olarak, özyinelemeli bir yöntem öne sürülmüştür. Makale genel olarak, spektrum modelleme üzerinde durmuş, model derecesi ve modelleme hatalarına bağlı olarak spektrum tahminlerini incelemiş ve son olarak bir tahmin yöntemi önerisinde bulunmuştur.

Dash diğerleri (1996) tarafından yapılan çalışmada, lineer adaptif (uyarlanabilir) nöron (ADALINE) kullanılarak güç sisteminin harmonik bileşenlerini tahmin eden bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde öğrenme parametresi gerçek değerler ve sistem çıkışı değerleri arasındaki hatayı azaltmak amacıyla ayarlanmaktadır. Kestirici, gürültü ile bozulmuş işaretin Fourier katsayılarını izlemektedir ve azalan doğru akım (DA) bileşenleri de doğru şekilde tespit edebilmektedir. Harmonik bileşenlerin adaptif olarak izlenmesi yüksek doğrulukla yapılabilmektedir.

Ma ve Girgis (1996) tarafından yayınlanan makalede, harmonik kaynak belirlenmesindeki iki önemli probleme ışık tutulmuştur. Bunlardan birincisi, sınırlı sayıdaki harmonik ölçüm aletlerinin optimum (en uygun) yerlerinin belirlenmesidir. İkincisi ise, harmonik kaynaklarının optimum dinamik kestirimi ve dengesiz üç fazlı güç sistemine enjekte edilmesidir. Bu zorlukların üstesinden gelinebilmesi için KF

kullanılmıştır. Bu çalışmada, geliştirilen yöntemin dinamik olduğu ve dengesiz üç fazlı güç sistemindeki her bir hattaki enjeksiyonları tanımlama, analiz etme ve izleme yeteneğine sahip olduğu vurgulanmıştır.

Nguyen (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AFD'nin ara-harmonikleri doğası gereği bulamadığı konusuna değinilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan ve bozuk dalga şeklini, sinüzoidal toplamlar olarak AFD'ye dayandırmadan ifade eden, test ve öğrenmeye dayanan matematiksel bir yöntem ile ara-harmoniklerin tahmin edilmesi probleminde katkı sağlanmıştır.

Bettayeb ve Qidwai (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, özyinelemeli tahmin teknikleri, gürültü bir ortamda güç sistemi harmoniklerinin tahmin edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Yüksek yakınsama ve düşük hesaplama maliyetine EKY algoritmalarının birkaç çeşidi gerçek zamanlı harmonik genlik ve fazların tespit edilmesi amacıyla uygulanmıştır. Altı darbeli doğrultucu devresinin AA ucu test işaretleri için kullanılmıştır. 0 dB SNR değerinde bile harmonik genlik ve fazlarının iyi bir şekilde tahmin edildiği görülmüştür.

Huang ve diğerleri (1998a) tarafından yapılan çalışmada, Hilbert dönüşümü tabanlı lineer ve durağan olmayan işaretler için bir harmonik ayrıştırma yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, karmaşık veri kümelerini bile, sonlu ve küçük sayıda öz kip fonksiyonlarına ayrıştırabilmektedir. Geliştirilen yöntem, karmaşık veri kümelerinde anlık frekans kestirimi yapabilmektedir.

Liu (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektrikli tren yolu sistemlerindeki harmoniklerin takip edilebilmesi için Kalman filtre tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Geleneksel KF'nin performansının, süreçteki önceki bilgilere ve pratik durumlarda bilinmeyen veya yaklaşık olarak bilinebilen ölçüm gürültüsüne bağlı olduğu, ilgili çalışmada belirtilmiştir. Bu zorlukların üstesinden gelinmesi için yazar, Adaptif KF yöntemini geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem elektrikli demiryolu sistemlerinden elde edilen veriler ile test edilmiştir.

Sedláček ve Titěra (1998) tarafından önerilen çalışmada, AFD'deki spektral sızıntıyı azaltmak için kullanılan iki farklı interpolasyon yöntemi ele alınmıştır. Yöntemlerin etkinliği, karşılaştırmalı olarak tek ton ve çok tonlu işaretler üzerinde incelenmiştir.

Yöntemlerin geçerlilikleri hem bilgisayar benzetimlerinde, hem de gerçek veriler üzerinde denenmiştir. Bu iki yöntemin birleştirilmesi durumunda, daha iyi sonuçların elde edilebileceğine yönelik bir öneride bulunulmuştur.

Pham ve Wong (1999) tarafından önerilen çalışmada, Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) ve Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) yöntemlerine bağlı olarak geliştirilen işaret parametresi tahmin yöntemi, literatüre kazandırılmıştır. Önerilen yöntem, harmonikleri ve ara-harmonikleri belirleyebilmektedir. Geliştirilen yöntemin geçerliliği, hem sentezlenen dalga şekilleriyle, hem de güç sistemlerinden alınan verilerle doğrulanmıştır.

Dash ve diğerleri (1999) tarafından yayınlanan makalede, rastgele gürültü ve bozulmalar altındaki güç sistem frekansını kestirme amacı için karmaşık GKF uygulaması gerçekleştirilmiştir. Üç faz gerilim işaretinin ayrık değerlerinden, karmaşık gerilim vektörü, $\alpha - \beta$ dönüşüm yöntemi ile elde edilmiştir. Lineer olmayan durum uzayı formülleri bu karmaşık işaret için elde edilmiştir ve GKF yaklaşımı modelin gerçek durumunu iteratif olarak yüksek gürültü ve harmonik bozulma altında hesaplamak için kullanılmıştır. Frekansın bir durum olarak modellenmesi sonucunda, güç sisteminin bilinmeyen frekansına ulaşılmıştır. Yöntemin tutarlılığı benzetimler ile gösterilmiştir.

Soliman ve diğerleri (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bulanık doğrusal regresyona dayanan, güç sistem harmonik bileşenlerini ölçme konusunda yenilik barındıran bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda, sinüzoidal olmayan gerilim ve akım dalga formu, lineer bir fonksiyon olarak yazılmaktadır. Bu fonksiyonun katsayılarının, belirli bir orta ve yayılma değerine sahip bulanık sayılar olduğu varsayımı yapılır. Böylelikle problemin, gerilim örneklerinin yayılmasını en aza indirmeye amacını taşıyan doğrusal bir optimizasyon problemine dönüştürülmesi sağlanmıştır. Önemli parametrelerin önerilen yöntem üzerindeki etkileri incelenmiş, test sonuçlarına çalışmada yer verilmiştir.

2000 ve sonrası yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, frekans spektrum tahmin yöntemlerinin oldukça geliştirildiği görülmektedir. Bu çalışmalardan önemli olan birçoğu, kronolojik sırayla açıklanmaya çalışılmış, ayrıntılı olarak açıklanmayanlar ise ilerleyen bölümde, bu zamana kadar yapılmış tüm çalışmaların sınıflandırılmasıyla, uygun kategorilerde değerlendirilmişlerdir.

Agrez (2002) tarafından yapılan çalışmada, çok noktalı interpolasyonlu AFD kullanılarak periyodik işaretlerin frekans ve genlik tahminindeki hatayı azaltmak amacıyla bir yöntem önerilmiştir. İnterpolasyon algoritmalarının bias kaldırma ve gürültüye duyarlılık özellikleri makalede, Hanning ve dikdörtgen pencere için özel olarak çalışılmıştır. Hata düzeltmenin, AFD'nin interpolasyon nokta sayısının artırılması ile arttığı gözlemlenmiştir. Farklı algoritmalar için pencere şekli değiştirilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

(Bettayeb ve Qidwai (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, genetik algoritma (GA) kullanarak güç sistemlerinde harmonik kestirimi yapabilen bir algoritma önerilmiştir. Harmonik kestiriminin genlik için lineer ve faz için lineer olmayan bir doğaya sahip olduğu ilgili çalışmada belirtilmiştir. Önerilen çalışmada, lineer problemin çözümü için EKY, lineer olmayan problemin çözümü için ise GA yönteminin kullanıldığı ve böylelikle melez bir yöntem oluşturulduğuna dikkat çekilmektedir. Algoritmanın yakınsama ve işlem zamanı üzerine bilgilere yer verilmiştir.

Aiello ve diğerleri (2005) tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinde harmonik ve ara-harmoniklerin ölçüm zorluklarına, IEC 61000-4-30 ve IEC 61000-4-7 standartlarında sırasıyla, güç kalitesinin ölçümünde kullanılan cihaz karakteristiğinin ve ara-harmonikler ile harmoniklerin değerlendirmesinin açıklandığına değinilmiştir. Bu bağlamda, ana frekansın tahmin edilmesine imkân veren chirp-z dönüşümü temel alınarak geliştirilen yöntem sunulmuştur. Klasik yöntemler ile geliştirilen yöntemin teorik yaklaşımları tartışılmış ve ilgili deneysel çalışmalara makalede yer verilmiştir.

Barros ve Diego (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, IEC tarafından tanımlanan harmonik ve ara-harmoniklerin değerlendirilmesi açısından Hanning pencerelerinin etkileri araştırılmaktadır. Hanning pencereleri, büyük harmonik akım dalgalanmaları ve iki harmonik arasında görülen ara-harmonik gerilim bileşeni açısından değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, IEC standardında tanımlanan yöntem ve işaretlerin etkin (RMS) değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Cataliotti ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada, durağan veya geçici bozulmalar durumları da dâhil olmak üzere, güç kalite ölçümünün yüksek doğrulukla saptanmış temel frekans bileşenine ve işaret senkronizasyonuna ihtiyaç duyduğu

belirtilmiştir. Bu ölçümlerin gerçekleştirilmesi amacıyla, tek fazlı Faz Kilitleme Döngüsü (Phase-Locked Loop - PLL) tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem, geçici veya kalıcı bozucu etkilerinde de başarılı bir şekilde işaret senkronizasyonunu gerçekleştirmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliği, çeşitli testler altında doğrulanmıştır.

Aiello ve diğerleri (2007), tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerindeki gerilim karakteristiğinin ölçümünün, yüksek bozulma durumunda bile, güç kaynağı frekansının yüksek doğrulukla tahminine ve işaret senkronizasyonuna bağlı olduğu vurgulanmıştır. Cihaz senkronizasyonunun sağlanabilmesi için, iki farklı teknik geliştirilmiştir. İlki, chirp-z dönüşümü temel alınarak türetilmişken, ikinci yöntem PLL temeline dayanmaktadır. Geliştirilen yöntemler ve geleneksel yöntemlerin verdiği sonuçlar, deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Alkan ve Yılmaz (2007) tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinin geçici durumlarının frekans boyutu analizi iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan birinci yöntem parametrik olmayan bir yöntem olan Welch metodudur. İkinci yöntem ise parametrik olarak hesaplanan Yule-Walker metodudur. Önerilen yöntemlerin performansları, güç spektral yoğunluk değeri ile ölçülmüştür. Çalışma ile ilgili şekillere ve test sonuçlarına makalede yer verilmiştir.

Boguslaw Swiatek ve diğerleri (2007) tarafından sunulan çalışmada, güç tesislerinin endüstriyel ortamda artan uygulamalarının hat kirliliğinde ciddi bir artışa sebep olduğuna değinilmiştir. Bu artışın, sistem içerisindeki elektriksel donanımlara ve güç dağıtım sistemlerini etkilediğine dikkat çekilmiştir. Bu bağlamda aktif güç filtrelerinin kullanıldığı belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, YSA tabanlı bir tahmin yöntemi tasarlanmış, yönteminin harmonik ve faz kestirimini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarla ortaya koyulmuştur. İlgili yöntemin AFD ile kıyaslanmasına da yer verilmiştir.

Bracale ve diğerleri (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, IEC'nin dalga biçim bozulmalarını, harmonik ve ara-harmonik grup/alt gruplarının genlikleri ile karakterize ettiği belirtilmiştir. Grup ve alt grup olarak sınıflandırılan harmonik ve ara-harmonikler, sabit AFD çözünürlüğü ile değerlendirilmektedir. Bu sebepten dolayı, harmonik frekansları iyi bir şekilde tespit edilememektedir. İlgili çalışma; adaptif Prony, ESPRIT

ve root-MUSIC yöntemlerinin; bu grup ve alt grupları yakınsama konusundaki başarılarını ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerin başarımı, DA ark fırınına ait gerilim harmoniklerinin üzerinde mukayese edilmiştir.

Chang ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmada, HFD yönteminin hesaplama maliyetinin düşük olması sebebiyle işaret işlemede sıklıkla kullanıldığı, fakat spektral sızıntı ve picket-fence etkisi nedeniyle, bu yöntemin harmonikleri ve özellikle ara-harmonikleri ölçmede başarısız olduğu belirtilmiştir. Bu olumsuzluğun üstesinden gelenebilmesi için sırasıyla; frekans boyutunda interpolasyon algoritması sonucunda ana frekansın belirlenmesi, interpolasyon polinom metodu kullanılarak zaman boyutu işaretinin oluşturulması ve HFD yönteminin elde edilen zaman serisine uygulanması adımlarını içeren yöntem, makalede sunulmuştur.

Chang ve diğerleri (2008) tarafından yayınlanan bir makalede, iki veya daha fazla spektral bileşenin birbirine çok yakın aralıklarla bulunması durumunda, birçok spektrum kestirim algoritmasının başarısız sonuçlar ürettiğine dikkat çekilmektedir. Çalışmada ele alınan probleme çözüm olarak, alt-örnekleme kullanan yeni bir yöntem; yüksek çözünürlüklü tekil değer ayrışımı metodu sunulmuştur. Alt-örnekleme kavramıyla birlikte, spektral bileşenleri birbirinden ayırmak için kullanılan ölçekleme faktörü tanımı yapılmıştır. Geliştirilen yöntem, gerçek işaret verileri üzerinde test edilmiş, HFD ve diğer tekil değer ayrıştırma yöntemleriyle kıyaslanmıştır. Geliştirilen yöntemin, gerçek işaret verileri üzerinde yüksek çözünürlükle frekansları tespit ettiği görülmüştür.

Chang ve diğerleri (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elektronik cihazlarda harmonik ve ara-harmoniklerin bulunmasının çalışma problemlerine sebebiyet verebileceğine değinilmiştir. Bu harmonik ve ara-harmoniklerin gözlenmesinin güç kalitesini arttırmada önemli bir yere sahip olduğu belirtilmiştir. Bu probleme çözüm bulmak amacıyla, içerisinde YSA ve Prony yöntemlerine ait matematiksel denklemler barındıran iki aşamalı işaret parametrelerini tahmin etme algoritması sunulmuştur. Bu çalışmada, Prony yöntemindeki parametrelerin adaptif nöron ile hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kısa dönem AFD ile kıyaslanmış başarılı olduğu görülmüştür.

Bracale ve Carpinelli (2009) tarafından yapılan çalışmasında, AFD yöntemindeki spektral sızıntıyı gidermek amacıyla, ESPRIT ve AFD tabanlı iki aşamalı işaret işleme tekniği ileri sürülmüştür. Bu teknik ile, harmoniklerin yanlış olarak elde edilmesinin en büyük sebeplerinden birisi olan senkronizasyon probleminin üstesinden gelindiği, hızlı ve doğru bir şekilde harmoniklerin tespit edildiği belirtilmiştir. Geliştirilen yöntemin, düşük frekanslı ara-harmonikleri tespit etme konusunda da başarılı olduğu, gerçekleştirilen testler ile gösterilmiştir.

Agha Zadeh ve diğerleri (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, EKY ve KF yaklaşımlarının birleşimi olan yeni bir yöntem ileri sürülmüştür. Önerilen yöntem, anlık olarak frekans genlik ve faz bilgilerini iyi bir yakınsama ile elde edebilmektedir. Yöntemin; koruma röleleri, dijital otomatik gerilim regülâtörleri ve birçok güç sistemi aygıtında kullanılabileceği belirtilmiştir. Önerilen yöntem, benzetimler ve laboratuvar ortamında test edilmiş ve bu yöntemin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Belega ve diğerleri (2010) tarafından sunulan çalışmada, enterpole AFD algoritması ile harmonik bozulmaya uğrayan sinüs dalgasının genlik bileşenini kestirme konusuna odaklanılmıştır. Oluşabilecek maksimum hataya bağlı matematiksel ifade türetilmiştir. Ayrıca, beyaz gürültü ile bozulmuş bir işaret için enterpole AFD yönteminin istatistiksel verimliliği, tek ton bias'sız Cramer-Rao alt sınırına göre incelenmiştir. İlgili deneysel çalışmalara ve benzetimlere çalışmada yer verilmiştir.

Gary, Chang ve Chen (2010), tarafından yayımlanan makalede, frekansın güç faktörünün önemli bir işareti olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, başarılı bir spektral ayrıştırmanın, ölçülen işaretin frekanslarının doğru şekilde tespit edilmesiyle gerçekleştirileceğine vurgu yapılmaktadır. Bu problemin çözümüne katkı sunmak amacıyla, alt-örnekleme işlemi ve Prony algoritmasının birleştirilmesi ile yazar tarafından yeni bir yöntem önerilmiştir. Birbirine çok yakın iki veya daha fazla spektral bileşenin olması durumunda da, önerilen yöntemin harmonik ve ara-harmonikleri başarılı bir şekilde tespit ettiği gözlenmiştir. Önerilen yöntem, HFD ve IEC alt gruplama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Gary ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, güç elektroniği aygıtlarının geniş alanlarda uygulanmasının harmonik kirliliğin artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Güç

kalitesini korumak amacıyla bu harmoniklerden sakınılması gerektiği vurgulanmış, bu bağlamda harmonik ölçüm ve hafifletmenin önemli olduğu konusuna değinilmiştir. Bu problemi çözmek için bu çalışmada radial basis fonksiyon YSA kullanılarak ölçüm yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin, geleneksel ölçüm yöntemine göre daha başarılı sonuçlar verdiği yapılan testler sonucunda görülmüştür.

Chen ve diğerleri (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, harmonik kestirim probleminin güç kalitesinin değerlendirilmesi açısından önemli bir yere sahip olduğu belirtilmiştir. Bu problemi çözmek için literatürde KF tabanlı birçok model bulunduğu değinilmiştir. Bu çalışmada ise, yeniden başlama (sıfırlama - reset) özelliği bulunan (GKF) uygulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçların diğer yöntemlerin sonuçlarına göre daha iyi olduğu görülmüştür ve IEC 61000-4-30 standartları önerilen ölçüm yöntemi ile yakalanmıştır.

Cho ve diğerleri (2010) tarafından sunulan makalede, güç kalite bozulmalarını tespit etmek, tanımlamak ve sınıflandırmak amacıyla HFD, kısa dönem AFD, dalgacık dönüşümü, dalgacık paket dönüşümü ve birçok yöntemin geliştirildiği belirtilmektedir. Güç kalite probleminin çözümü için uygun yöntemin seçiminin önemli olduğuna değinilmiştir. Bu bağlamda, Gabor dönüşümü ve Wigner dağılım fonksiyonunun birleşimi olan, Gabor-Wigner dönüşümü yöntemi tanıtılmış ve güç kalite bozulmalarının ölçülmesi için uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanmasının amacı, her iki tekniğin zayıf yönlerinin, birbiri içerisinde telafi edilmesini sağlayarak daha başarılı harmonik, ara-harmonik, gerilim çökmesi, geçici durumlar v.b. birçok meseleyi çözebilen bir tekniğin geliştirilmesidir. Geliştirilen yöntemin birçok test altında başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Jafarian ve Sanaye-Pasand (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, işaret fazör tahmini için adaptif pencereleme algoritmalarına dayalı bir yöntem önermiştir. Yöntem, ağırlıklandırılmış EKY algoritmasına ve işaretin değişken pencereleme tekniğine dayanmaktadır. Önerilen yöntem, hem benzetim ortamında, hem de yüksek gerilim iletim sisteminden kaydedilen veriler üzerinde çalıştırılmış ve bu yöntemin doğruluk oranı yüksek, güvenilir sonuçlar ürettiği gözlemlenmiş, son olarak hızlı yakınsama gösterdiği belirtilmiştir.

Ji ve diğeri (2011) tarafından sunulan çalışmada, temel frekansı zaman ile değişen bir güç işaretinin harmoniklerinin tahminini gerçekleştirmek üzere bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntem, değişken koşullara kolaylıkla uyum sağlayabilen Adaptif Bakteri Sürüsü Algoritması'dır ve ara-harmonikleri de tahmin edebilmektedir. Önerilen yöntem, çeşitli işaretler üzerinde test edilmiş, GA ile karşılaştırılmış ve harmonik, ara-harmonik değerlerini efektif bir şekilde tahmin edebilmiştir.

Dash ve diğeri (2011) tarafından yapılan çalışmada, gürültüyle bozulmuş güç sistem işaretinin temel ve tamsayı katı harmonik bileşenlerinin zamanla değişen genlik, frekans ve faz bilgilerini elde edebilen özyinelemeli Gauss-Newton temelli yeni bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntemin, klasik özyinelemeli Gauss-Newton yöntemine göre daha iyi yakınsama hızına sahip olduğu gösterilmiştir. Önerilen yöntemin kararlılığı, ara-harmoniklerin de bulunduğu test işaretleri üzerinde denenmiş, kabul edilebilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Peng ve Hong-Bin (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güç sistemlerinde gürültü ve ara-harmoniklerin bulunması durumunda temel işaret frekansının tespit edilmesini sağlayan AHD tabanlı bir yöntem sunulmuştur. Yöntemin gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilebilme yeteneğinin bulunduğu belirtilmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliği benzetim ortamında yapılan testler sonucunda değerlendirilmiş ve lineer olmayan yüklerin bulunduğu güç sistemlerinde, bozulan güç işaretinin temel frekansının kestirebilme performansının (yakınsama hızı ve hata oranı açısından) kabul edilebilir seviyede olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Elnady (2012) tarafından yapılan çalışmada, MLE temel alınmış ve oluşturulan işaret modeline ait parametreler makalede tanımlanan bir iteratif yöntemle tahmin etme algoritması sunulmuştur. Öne sürülen yöntem alt harmoniklere ait genlik, frekans ve faz bilgilerini tespit edebilmektedir ve makale içerisinde bu yöntemin temel frekans ve ara-harmonik tahmini konusunda da geliştirilebileceğine dair görüşe yer verilmektedir. Geliştirilen yöntem, gürültülü ve gürültüsüz işaretler üzerinde denenmiş, ESPRIT ve Çentik Filtre algoritmaları ile karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin doğruluk oranı daha yüksek sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Carvalho ve diğeri (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, güç sistemlerinde zamanla değişen frekansları ihtiva eden harmonik ve ara-harmoniklerin, doğru bir şekilde tahmin edilebilmesini sağlayan AFD tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Örnekleme zamanının asenkron olması ve işaret içerisinde ana frekansın tamsayı katı olmayan frekanslarda bulunan bileşenlerin (ara-harmoniklerin) bulunması durumunda yöntemin geçerliliği test edilmiştir. Gerçekleştirilen benzetimlerde elde edilen sonuçlar, yöntemin doğruluk açısından başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Ray ve Subudhi (2015) tarafından literatüre kazandırılan çalışmada, ADALINE ve GA Temelli Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu (BBA) yöntemleri birlikte kullanılarak hibrit bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin yerel minimumlara yakalanmama üstünlüğüne sahip olduğu belirtilmiştir. Yöntemin etkinliği, Fotovoltaik (PV) sistem prototipinin evirici uçlarından elde edilen gerilim harmonik ve ara-harmoniklerinin tahmin edilebilme doğruluğu ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar; KF, AFD gibi yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, hesaplama zamanı ve doğruluk açısından önerilen yöntemin üstünlük sağladığı görülmüştür.

He ve Shu (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Tek Kanal Kör Kaynak ayrıştırma yöntemi ile güç sistemi işaretinin harmonik ve ara-harmonik bileşenlerinin ayrıştırılmasına yönelik yeni bir yöntem önerilmiştir. Birçok analiz yöntemi, çalışma gerçekleştirilirken çok kanallı işaret üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen bağımsız işaret parçaları, k-ortalamları ile frekans kümelerine toplanmıştır ve harmonik ara-harmonik bileşenler elde edilmiştir. Yöntemin etkinliğinin kaynak frekans bileşenlerinin makul derecede birbirinden ayrık olması durumunda daha da arttığı MATLAB ortamında gerçekleştirilen benzetimler sonucunda gösterilmiştir.

Nam ve diğeri (2015) tarafından sunulan çalışmada, güç sistem frekansını gerçek zamanlı olarak tahmin edebilen üç seviyeli AFD yöntemi önermişlerdir. Birinci seviyede güç sistem işareti, iki ortogonal sinüs ve kosinüs filtrelili işaretlere ayırır. İkinci ve üçüncü adımda ise sıfır geçiş problemiyle karşılaşmadan ve harmonik ve ara-harmoniklerin bastırma kabiliyetindeki artışla filtrelenmiş ortogonal işaretlerin genlik oranları belirlenir. Bilgisayar ortamında hazırlanan ve gerçek zamanlı dijital işaret işlemcisi ile yapılan benzetim tekniklerinde, önerilen yöntemin başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Agrawal ve diğeri (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çift beslemeli endüksiyon jeneratörlerinde harmonik ve ara-harmoniklerin tespiti açısından geleneksel ESPRIT ve Root MUSIC yöntemlerinin başarısı karşılaştırılmıştır. Jeneratörden elde edilen işaretlerin yanı sıra aynı zamanda sentetik işaretler de kullanılarak mukayeseler yapılmıştır. Ayrıca bu yöntemlere ek olarak aynı yöntemlerin kayan pencereler yaklaşımı ile ESPRIT ve Root MUSIC algoritmalarının uygulanması doğrultusunda, değişken rotor hızlarının bulunduğu ortamlarda harmonik tespit yetenekleri karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmelerin sonucunda, ESPRIT yönteminin kayan pencereler yaklaşımı ile daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Singh ve diğeri (2015) tarafından yapılan çalışmada, lineer olmayan yüklerin güç sistemlerinde harmonik kirliliğe neden olduğunu belirtmiştir. Bu konuda pek çok çalışmanın önerilmesine karşın halen problemin çözümünün önemli bir çalışma konusuna vurgu yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada, lineer olmayan bir yöntem olduğu belirtilen Bilineer Özyinelemeli En Küçük Kareler yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin, beyaz Gauss gürültüsü ve ara-harmoniklerin bulunması durumunda da işaret bileşenlerinin genlik, faz ve frekans değerlerinin doğru bir şekilde bulunduğu gösterilmiş ve sonuçlar diğer En Küçük Kareler yöntemine bağlı geliştirilen yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda önerilen yöntemin birçok açıdan (sonuçlara yakınsama ve karmaşıklık analizi) üstün olduğu belirtilmiştir.

Santos ve diğeri (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, üç fazlı güç sistemlerinde Clarke parametrelerinin tahmin edilmesi yoluyla, işaretin temel frekansının bulunmasını sağlayan bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem ara-harmoniklerin bulunması durumunda da temel frekansı ortaya çıkarabilmektedir. Önerilen yöntem, dört farklı çalışmada sunulan yöntemlerle mukayese edilmiş ve bu yöntemin, sonuçlara yakınsama hataları ile zamanları konusunda diğer yöntemlere göre daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

Moon ve diğeri (2015) çalışmasında, güç sistemlerinde temel harmonik kestirimi yapmak amacıyla, iki aşamalı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem, güç işaretinin asenkron olarak örneklenmesi ve ara-harmoniklere sahip olması durumunda temel harmoniğin kestirimini yapabilmektedir. Bu amaçla, ilk aşamada, zaman boyutunda enterpolasyon ile işaret yeniden oluşturulmuş ve yeni örnekleme zamanına sahip bu

işaret, harmoniklerin elenmesi için sinüs filtrelerinden geçirilmiştir. İkinci aşamada ise temel frekans, gürültüye duyarlı bir yöntem olan eğri uydurma yöntemi ile tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, asenkron örneklenmiş işaretlerin temel frekanslarının bulunmasında önerilen yöntemin başarılı olduğunu göstermiştir.

Chen ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada, harmonik-ara-harmoniklerin tespit edilmesinin ve analizinin güç sistemleri açısından önemli olduğunu belirtmiş ve bunu gerçekleştirmek için Eşleştirme Algoritması'nı temel alan bir yöntem ileri sürmüşlerdir. Yazarlar tarafından öne sürülen algoritma, birçok algoritma ile karşılaştırılmış ve ilgili yöntemin benzetim ortamlarında başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Xu ve diğerleri (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ara-harmoniklerin tespiti için iki aşamalı bir yöntem sunmuşlardır. İlk aşamada ön hesaplama için, interpolasyonlu AFD algoritması, işaret üzerinde beşinci derece üçgen ve on birinci derece dikdörtgen pencere (T5R11) ile uygulanmıştır. Ardından, ara-harmonik etkilerinin tespit edilebilmesi için Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması kullanılmıştır. Gerçekleştirilen benzetimler sonucunda çalışmanın birçok ölçüm standardını karşıladığı gösterilmiştir.

Zhao ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel YSA modellerinin harmonik ve ara-harmonik ölçümü için başarılı olduğu belirtilmiştir. Fakat bu yöntemlerin, sistem içerisinde gürültünün bulunması durumunda, kullanılan uyarma fonksiyonlarına (excitation function) ve bu fonksiyonun başlangıç değerlerine bağlı olarak ciddi yakınsama hatalarına neden olduğunu belirtmiştir. İlgili çalışmada, geri yayımlı YSA'nın uyarılma fonksiyonu değiştirilerek ve Ateş Böceği Sürü Optimizasyonu (GSO) algoritması kullanılarak ara-harmoniklerin tespiti için hibrit bir yöntem geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçların geleneksel YSA'dan ve Hanning-HFD yönteminden daha iyi bir şekilde sonuçlara yakınsadığı gösterilmiştir.

Garanayak ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada iki katmanlı ADALINE algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin beyaz Gauss gürültüsü ile bozulmuş akım işaretlerinde; DA bozulma, temel harmonik, alt ara-harmonik ve üst ara-harmonik bileşenlerinin doğru ve hızlı bir şekilde tespit edebildiği görülmüştür. Çalışma sadece

benzetim programıyla değil, aynı zamanda ölçeklenebilir prototip geliştirilerek laboratuvar ortamında da test edilmiştir.

Mohan ve Soman (2020) tarafından yapılan çalışmada, yeni nesil elektrik şebekelerinin bilgi gönderme ve alma gibi özellikler barındırması nedeniyle oldukça hassas olduğundan bahsedilmiş ve lineer olmayan yükler, dağıtık enerji üretim sistemleri gibi birçok sistemi içerisinde barındırmasından dolayı ara-harmonikler barındırdığına değinilmiştir. Ara-harmoniklerin hem şebeke üzerindeki iletişimi olumsuz etkilediği hem de, modern cihazlar üzerinde olumsuz etkiler gösterdiği konusu üzerinde durulmuştur. Bu sebepler neticesinde, ilgili çalışmada gürültü-duyarlı dinamik mod ayrıştırma tekniğine bağlı olarak bir yöntem ileri sürülmüş ve yöntemin geçerliliği çeşitli deneylerle kanıtlanmıştır.

Yukarıda incelenen çalışmaların gözden geçirilmesiyle, AA sistemlerinin ilk yıllarında, araştırma konularının sadece harmoniklerin incelenmesine yönelik olduğu, bu incelemelerin de Fourier analizi ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Erken dönemlerde, harmonik kaynaklarının baskın olmasından ve ara-harmonik üreten aygıtların veya fiziksel olayların (sıcaklığın ani değişmesi suretiyle değişen rezistif veya endüktif yükler, lineer olmayan karakteristiğe sahip olacağından şebekeye ara-harmonik verebilirler) sistem modeline dâhil edilemeyecek azlıkta bulunmasından dolayı ara-harmoniklerin tespit edilmesi konusu üzerinde çalışılmadığı görülmektedir.

Frekans tahmini konusunda, ikinci önemli gelişme, Cooley ve Tukey (1965) tarafından yapılan çalışma ile HFD dönüşümünün literatüre kazandırılmasıdır. Önerilen HFD yönteminin, AFD'den daha az hesaplama karmaşıklığı ile spektrum analizi yapabilmesi, bilgisayarların teknik anlamda kullanımının yaygınlaşmasıyla oldukça popüler hale gelmiştir ve bu popülerlik bu konuyu temel alan yeni frekans kestirim yöntemlerinin sonraki yıllarda çoğalması ile de gözlemlenebilmektedir. HFD yöntemini temel alarak geliştirilen ileri teknikler, bu yöntemin spektral sızıntı ve "picket-fence effect" kavramları açısından zayıflığını göstererek interpolasyon tabanlı dönüşüm algoritmalarını önermişlerdir.

Güç elektroniği konusunda ve mühendisliğin çeşitli alanlarında, frekans kestirimi konusundaki önemli diğer gelişme, "Öz Değer Ayrıştırma" yöntemleri arasında değerlendirilebilecek MUSIC ve ESPRIT algoritmaları, 80'li yılların sonlarında literatüre

kazandırılmıştır. Bu algoritmalar, gürültüye karşı bağışıklığı ve görece daha az işlem karmaşıklığı ile dikkat çeken algoritmalarlardır. Bu tarihten sonraki zamanlarda, ilgili yöntemlerin hesaplama karmaşıklığını daha da azaltacak yeni yöntemlerin ortaya çıktığı da görülmektedir.

90'lı yıllar ve sonrası, güç elektroniği alanında, o tarihe kadar üretilen yöntemlerin diğer yöntemler ile birleştirilerek hibrit yöntemlerin yaratılması çalışmalarıyla dikkat çekmektedir. Ayrıca 90'ların başında chirp-z dönüşümü tabanlı çalışmaların yapılması, interpolasyon tabanlı AFD algoritmalarının türetilmesi ve 90'ların sonunda Dalgacık Dönüşümünün güç işaret spektrumunu kestirim amacıyla uygulanması, dönüşüm tabanlı yöntemlerin de sıklıkla uygulandığını göstermektedir. Bu tarihlerde, KF temeline dayanan yöntemlerin, sistem frekansının da değişebileceği durumlarda temel harmonik bileşenini tespit etmede kullanılması ve aynı zamanda ölçü aleti ile temel frekansın senkronizasyonunun sağlanması konusunda yapılan çalışmalar da spektrum analiz yöntemleri için önemli katkılardandır.

2000'li yıllarda, YSA algoritmalarının spektrum analiz yöntemlerinde kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu yöntemlerin frekans kestirimi konusunda iki farklı şekilde uygulandığı görülmektedir. Bunlardan birincisinde, dalga şekillerinin önceden YSA'ya öğretilmesi ve bunun akabinde, eğitim verileri arasında kullanılmamış değerlerin içerisindeki spektral bileşenlerin YSA tarafından tespit edilmesi esasına dayanır. Diğer kullanım alanı ise, parametre kestirim konusudur. Parametre kestiriminde daha çok adaptif lineer nöron algoritması kullanılmakta ve Prony yöntemi gibi herhangi bir frekans analiz yönteminin parametreleri YSA tarafından hesaplanarak harmonik analiz tamamlanmaktadır. Yine bu yıllarda, dönüşüm yöntemlerinin, KF tabanlı yöntemlerin ve çeşitli hibrit yöntemlerin uygulandığı görülmektedir.

2010 yılından günümüze kadar olan çalışmalarda ise akıllı şebekelerin yakın gelecekte yaygınlaşacağı öngörülmüş ve ara-harmonik kestirimi konusunun bu şebekeler için oldukça önemli olacağı konusu vurgulanmıştır. Ara-harmonik kestiriminin önem kazanmasının nedenini ise akıllı şebekelerin hem haberleşme alt yapılarını desteklemelerini ve ara-harmoniklerin bu frekansları kötü etkileyebileceğini, hem de dağıtık sistemler ile üretilen enerjinin temel frekansının bozulması durumunda bu enerjinin kullanılmayacağı, parazit yaratacağı ve elektrik aletlerinde bozulmalara sebep

olacağı argümanlarını öne sürerek açıklamışlardır. Bu bağlamda, ara-harmonik kestirimi için yöntemlerin ileri sürülmesinin yanında temel frekans kestirimi için de yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler; AFD, AHD ve çeşitli pencereleme fonksiyonlarına dayanan metotların geliştirilmesi, YSA’lardan yararlanılması, GA algoritmaları ile türevlerinin uygulanması ve sayılan tüm tekniklerin ikişerli olarak zayıf yanlarının azaltılması ve üstün yanlarının pekiştirilmesi ile birlikte hibrit algoritmaların türetilmesi olarak sıralanabilir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında XX. yüzyılın son birkaç on yılının genel bir toparlaması yapılırsa; güç elektroniği temelli lineer (doğrusal) olmayan yüklerin hızla artan yüzdesiyle birlikte, harmoniklerin ciddi bir ilgi alanı oluşturduğu ve harmonikler ile ara-harmonikleri hızlı ve doğru bir şekilde ölçen/tahmin eden birçok teknik sunan çok sayıda araştırma makalesi ve kitabın yayınlandığı görülebilmektedir (Bollen ve Gu, 2006; Chang ve Chen, 2010; Duhamel ve Vetterli, 1990; Gonen, 1984; Harmonics, 1983; Jain ve Singh, 2011; Kay ve Marple, 1981; Robinson, 1982; Singh, 2009; Thomson, 1982b). İki yüzü aşkın sayıda, ünlü dergiler ve uluslararası konferanslarda yayınlanmış makaleler, bildiriler, birçok sayıda kitap ve standartları içine alan kapsamlı literatür taraması yapıldığında, harmonik tahmin teknikleri aşağıdaki gibi üç kategoride sınıflandırabilir:

- Parametrik olmayan yöntemler
- Parametrik yöntemler
- Hibrit yöntemler

1.1. Parametrik Olmayan Yöntemler

AFD, chirp–z dönüşümü (CZT), dalgacık dönüşümü ve Hilbert-Huang dönüşümü (HHD) isimli dört yöntem parametrik yöntemler kategorisi içerisinde değerlendirilebilir. AFD, durağan ayrık zamanlı işaretlerin harmonik analizi için en temel spektral analiz yöntemidir. AFD’nin doğrudan hesaplanması N^2 işlem adımı gerektirir. Bu işlem miktarı, Cooley ve Tukey (1965) tarafından yapılan çalışmada, öne sürülen HFD algoritmasıyla oldukça azaltılmıştır. HFD’nin spektral sızıntı, “picket-fence effect” gibi çok sayıdaki durumda sınırlı kaldığına birçok çalışmada değinilmiştir ve buna bağlı olarak telafi önerileri ile birlikte yeni teknikler ileri sürülmüştür (Chang ve diğerleri, 200; Girgis ve Ham, 1980; Huang ve diğerleri, 1998b).

Pencereleme (Barros ve Diego, 2006; Harris, 1978; Jafarian ve Sanaye-Pasand, 2011; Kim ve diğlerleri, 1994; Portnoff, 1980; Ren ve Wang, 2010; Testa ve diğlerleri, 2004), enterpolasyon (Agrez, 2002; Andria ve diğlerleri, 1989; Belega ve diğlerleri, 2010; Chang ve diğlerleri 2008; Grandke, 1983, Jain ve diğlerleri, 1979; Qian ve diğlerleri, 2007; Ren ve Wang, 2010; Schoukens ve diğlerleri, 1992; Sedláček ve Titěra, 1998; Wu ve Zhao, 2005; Xu ve diğlerleri, 2019; F. Zhang ve diğlerleri, 2001) ve senkronizasyon(Aiello ve diğlerleri, 2005; Aiello ve diğlerleri, 2007; Cataliotti ve diğlerleri 2007; Ferrero ve Ottoboni, 1992) teknikleri, HFD'nin eksikliklerini gidermek amacıyla ileri sürülmüşlerdir. Senkronizasyon tekniklerinin, ana frekans bileşenini kestirme amacı taşıdığı, ölçüm frekansının ana frekanstan farklı olmasının, harmoniklerin yanlış ölçülmesine neden olabileceği konusu bahsedilen çalışmalarda tartışılmıştır.

AFD'nin ve dolayısıyla HFD'nin sahip olduğu olumsuzlukları kaldırmak amacıyla yapılan çalışmalar tekrar incelendiğinde, pencereleme yöntemleri ve enterpolasyon yöntemleri göze çarpmaktadır. Bu bağlamda, Harris (1978) tarafından yapılan çalışmada, farklı pencere fonksiyonlarının uygulanmasının, spektral sızıntıyı sınırlandırmak amacıyla incelendiği ve bu fonksiyonların büyük genlik farklarıyla birlikte, yakın aralıklara sahip harmoniklerin çözülmesinde başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, pencereleme yönteminin HFD ile uygulanmasında genel olarak yapılan yanlışlıklara da değinilmiştir. Jain ve diğlerleri (1979), Grandke (1983), Andria ve diğlerleri (1989) tarafından yapılan çalışmalarda, frekans bölgesi tabanlı enterpolasyon algoritmalarının kullanılmasıyla, spektral sızıntının azaltılarak kesinliğin arttırılabileceği ortaya konulmuştur.

Sedláček ve Titěra (1998) tarafından yapılan çalışmada, zaman bölgesi tabanlı enterpolasyon teknikleri ve bu tekniklerin frekans bölgesi tabanlı yöntemlerle karşılaştırmaları gösterilmiştir. Hidalgo ve diğlerleri (2002), Zhu (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, adaptif pencere genişliklerinin kullanımının, ara-harmoniklerin varlığı ve ana-frekansın geniş aralıkta değişimi durumunda, spektral sızıntıyı oldukça azalttığı belirtilmiştir.

IEC (61000-4-7) (Iec 2002) işaret frekansındaki en düşük spektral sızıntıyı sağlamak amacıyla, 50 Hz sistemler için 10 çevrim ve 60 Hz sistemler için 12 çevrim olacak şekilde zaman penceresinin senkronize edilmesini standart olarak belirlemiştir. Ferrero ve

Ottoboni (1992) tarafından yapılan çalışmada, dijital PLL tabanlı, ölçülen işaretin temel frekansına göre darbeler üreten bir senkronizasyon yöntemi ortaya konulmuştur. Örnekleme frekansını işaretin temel frekansına göre ayarlayarak tespit eden bir yöntem önerilmiştir. CZD tabanlı diğer bir senkronizasyon yöntemi, Aiello ve diğerleri (2005) tarafından yapılan çalışmada kullanılmıştır. PLL ve CZD tabanlı ileri sürülen yöntemler, Massimo Aiello ve diğerleri (2007) tarafından karşılaştırılmıştır ve PLL tekniğinin giriş işaret bozulması konusunda daha fazla yan etkiye sahip olduğu, öte yandan CZD tekniğinin sınırlı çözünürlüklü olmasının bir olumsuzluk yarattığı gösterilmiştir. Bu tip tekniklerde, tahminin doğruluğu, tam olarak senkronizasyonun başarısına bağlıdır. Bu bağlamda (D. Gallo ve diğerleri, 2004) tarafından yapılan çalışmada, enterpole edilmiş HFD kullanılarak iki adımlı senkronizasyon tekniğini sunulmuştur. Harmonik ve temel bileşenler, ilk aşamada frekans bölgesi interpolasyonundan türetilmiş ve daha sonra ara-harmonikler ikinci aşamada, orijinal işaretten tahmin edilen harmoniklerin süzülmesiyle elde edilmiştir. Wang (1990) tarafından yapılan çalışmada, çok sayıdaki giriş işaretini işleyebilen ve sadece ilgilenilen frekans spektrum bölümünü hesaplamada kullanan, bu sayede de frekans çözünürlük oranını zenginleştiren bölütlü (segmented) CZD tabanlı teknik önerilmiştir. Daponte ve diğerleri (1996) tarafından yapılan çalışmada, aynı zamanda bahsedilen çalışmada önerilen çoklu derin daldırma pencereleriyle birlikte bölütlü CZD yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile yüksek genlikli frekansların yakınındaki düşük genlikli harmonik olmayan tonların görünürlüğü arttırılmış ve yüksek frekanslardaki çok düşük genlikli harmoniklerin tespit edilmesi başarılmıştır. Tarasiuk ve diğerleri (2011) tarafından yapılan çalışmalarda, güç kalitesi tahmin analizörü için CZD ve AFD başlıca yöntem olarak kullanılmıştır.

Dalgacık dönüşümü ve HHD tabanlı teknikler yirminci yüzyılın son on yılında, özellikle zamanla değişen ve lineer olmayan işaretler için ortaya konulmuştur. ADD'nin işareti alt-bantlara görece olarak az sayıda katsayı ile ayrıştırabilirken, Sürekli Dalgacık dönüşümü (SDD) yüksek sayıda katsayılarla işareti ifade etmekte, bunun sonucu olarak yüksek hesaplama maliyeti ve yüksek bellek tüketimine sebebiyet verdiği belirtilmektedir (Chen, 2008). Ayrık Dalgacık Paket dönüşümü (ADPD) yaklaşımının ise tanımı gereği, SDD'ye kıyasla harmonik tahmini için daha uygun olduğu söylenebilir. Pham ve Wong (1999), Keaochantranond ve Boonseng (2002) tarafından yapılan çalışmalarda, ADPD ilk adımda düzgün alt-bantlar elde edilmek için uygulanmış ve sonraki adımda SDD'nin kullanılması

ile harmonik içeriği elde edilmiştir. Dalgacık Paket dönüşümü (DPD) tasarımı ve uygulanması temelli, doğrudan farklı güç kalite indisleri sağlayan ve kısa dönem bozulmaları da bulabilen güç kalite enstrümanları Hamid ve Kawasaki (2002) tarafından yapılan çalışmada sunulmuştur. Son yıllardaki birçok çalışmada, farklı temel fonksiyonları kullanan ve adaptif filtreleme (Lim ve diğerleri, 2010), lineer optimizasyon (Mazloomzadeh ve diğerleri, 2009), ara-harmonik gruplama (Diego ve Barros, 2010) gibi gelişmiş özellikleri içeren DPD tabanlı harmonik kestirim teknikleri uygulanmıştır. Vatansever ve Ozdemir (2008) tarafından yapılan çalışmada, DPD uygulamadan önce giriş örnekleri üzerinde Hilbert Dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Morsi ve El-Hawary (2011) tarafından yapılan çalışmada elektrik güç kalitesi değerlendirilmesine eşlik eden belirsizliklerle baş edebilmek için bulanık mantık sistemleri kullanılmıştır.

Son olarak, Yu ve Yang (2009), Chen ve diğerleri (2009) ve Zhang ve diğerleri (2009) tarafından aynı yıl içerisinde yapılan çalışmalarda, HHD tabanlı teknikler, harmonik tahminindeki potansiyellerine dikkat çekilerek önerilmiştir. Cho ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, zaman-frekans analizi yapabilen Gabor-Wigner dönüşümü tabanlı bir teknik geliştirilmiştir. Bu yöntem, Gabor dönüşümünün, Kısa Dönem Fourier Dönüşümü (KDFD) ve Wigner Dağılım Fonksiyonu'nun birbirinin eksikliklerini örtmek üzere geliştirilmiş bir matematiksel işlem birleşiminden oluşmaktadır. Garza ve Serna (2011) tarafından yapılan çalışmada, McLaurin seri açılımı tabanlı, Taylor-Fourier Dönüşümü olarak bilinen, dinamik harmonik analizinde kullanılan bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem Sonlu Darbe Yanıtı (Finite Impulse Response - FIR) filtre fonksiyonları ile uygulanabilmektedir.

1.2. Parametrik Yöntemler

Frekans çözünürlüğü, neredeyse bütün parametrik olmayan yöntemler arasındaki ortak problemdir. Bu yüzden ara-harmonik ve alt-harmoniklerin tespiti bu yöntemler için zorlu bir uğraş olmaktadır. Parametrik yöntemlere dayanan birçok stokastik model (Box ve diğerleri, 1994; Osborne, 1975; Prony 1795), 60'ların sonlarına rastlayan dönemlerde, harmonik tahmininde (Akaike, 1969a; Kay ve Marple, 1981; Tretter ve Steiglitz, 1967) kullanılmaya başlamadan önce, zaman serileri ile veri analizi gibi mühendislik dışı birçok uygulamada yer almıştır. Daha sonradan, Tekil Değer Ayrıştırma (TDA) (Chang ve diğerleri, 2008; Lobos ve diğerleri, 2001; Moghadasian ve diğerleri, 2010; Osowski,

1994; Swain ve diğeri, 2005), Otoregresif/Hareketli Ortalamalar (AR/ARMA) (Akaike, 1969b; Alkan ve Yilmaz, 2007; Nagesha ve Kay, 1996), En Küçük Kareler yöntemi (Al-Feilat ve diğeri, 1994; Kusljevic ve diğeri, 2010; Lobos ve diğeri, 2001; Najjar ve Heydt, 1991; Soliman ve diğeri, 1990) gibi birçok veri analiz tekniğı, harmonik tespiti için uygun olarak seçilmiş model parametrelerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Nguyen (1997) tarafından yapılan çalışmada, örneklenmiş veri kümesinin, eğitim kümesi ve test kümesi olacak şekilde iki küme olarak partisyonlara bölünebileceğı gösterilmiş ve böylece parametrik modelin, uygun olmayan model derecelerinde hatalı sonuç vermemesi sağlanmıştır. Birçok yazar, güç sistemleri harmonikleri ve ara-harmonikleri tahmini için Prony yöntemi uygulamaları üzerinde çalışmıştır (Chang ve Chen, 2010; Chen ve Chang, 2009; Costa ve Cardoso, 2006; Leonowicz ve diğeri, 2003; Marple, 1979; Qi ve diğeri, 2007; Zhijian ve diğeri, 2007) fakat bu yöntemin, düşük frekans analizi ve tahmininde daha elverişli olduğu görülmüştür (Sun ve diğeri, 2009; Tripathy ve diğeri, 2009). Chang ve Chen (2010) tarafından yapılan çalışmada, Prony yöntemi kullanılarak, gürültülü veriler üzerinde bitişik komşu frekansların tespit edilmesi için aşağı örnekleme tekniğı uygulanmıştır.

Schmidt (1986) tarafından, bir antene varan çoklu ön dalgaların (wavefront) parametrelerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmada, işaret alt uzay ayrıştırması tabanlı MUSIC tekniğı önerilmiştir. Wang ve Lu (2006) tarafından yapılan çalışmada, MUSIC tabanlı harmonik öznitelik çıkarma algoritması sunulmuş, fakat MUSIC güç harmonik tahmininde yüksek hesaplama maliyeti sebebiyle yaygın olarak kullanılmamıştır. Roy ve Kailath (1989) tarafından yapılan çalışmada, işaretin varış yönü tahmini için Rotasyonel Değişmezlik Tekniğıyle İşaret Parametrelerinin Kestirimi (ESPRIT) olarak bilinen ve harmonik tahminini konu alan birçok başarılı çalışmada da Bracale ve Carpinelli, 2009; Lobos, Leonowicz ve Rezmer, 2000; Tao ve diğeri, 2010) temel bir yöntem olarak kullanılan harmonik analiz tekniğı literatüre kazandırılmıştır. ESPRIT, işaretin kayma değişmezliği özelliğini kullanır. Durağan olmayan verilere de uygulanabilen kayan pencere tabanlı ESPRIT tekniğı de geliştirilmiştir (Gu ve Bollen, 2008). Bracale ve diğeri (2008) tarafından yapılan çalışmada, MUSIC ve Prony yöntemlerinin harmonik grupları ve alt-gruplarının, (Iec, 2002) çalışmasına uygun olarak doğrudan ölçülmesi amacıyla uygulanmıştır. Liqun ve Yanfei (2010) tarafından yapılan

çalışmada, geliştirilmiş Gaussian Olmayan Karmaşık Maksimizasyon algoritması harmonik ve ara-harmonik tahmini için kullanılmıştır.

Son yirmi yılda, yapay zekâ tabanlı tekniklerin ve rekürsif/adaptif yöntemlerin oldukça yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemler, geleneksel metotlar üzerine yanlış modellemelerden doğan hatalar, işaret üzerindeki gürültü ve lineer olmama durumu gibi eksikliklerle başa çıkmak amacıyla uygulanmıştır. Sharma ve Mahalanabis (1973) tarafından yapılan çalışmada, harmonik analizinde KF uygulaması sunulmuştur. Daha sonra, on yılı aşkın bir süre boyunca KF yöntemine dayanan herhangi bir çalışma yayınlanmazken, bu süre zarfından sonra, özellikle temel frekans senkronizasyonu problemini çözmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bitmead ve diğerleri (1986), Dash ve Sharaf (1988), Girgis ve diğerleri (1991), Ma ve Girgis (1996) ve diğer birçok kişi tarafından yapılan çalışmalarda KF temelli geliştirilmiş algoritmalar, gerçek zamanlı harmonik analizi için önerilmiştir (Andria ve diğerleri, 1992; Liu, 1998; Macias ve Gomez, 2006; Mostafa, 2007). Genişletilmiş KF yöntemi ise, KF'nin geçici durum işaretleri üzerindeki doğruluk yüzdesinin zayıf olmasından dolayı, baştaki durumuna yeniden dönebilmeye özelliği ile birlikte, ani işaret değişimlerinde dahi temel frekansı yakalayabilmek amacıyla kullanılmıştır (Chen ve diğerleri, 2010; Dash ve diğerleri, 1999; Kennedy ve diğerleri, 2002). Bettayeb ve Qidwai (1998) tarafından yapılan çalışmada, EKY tabanlı özyinelemeli bir teknik, kısa uzunluklu, gürültülü, lineer ve durağan olmayan veri örnekleri üzerinde denenmiş ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde çalıştığı gösterilmiştir. Köse ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, lineer KF ve genişletilmiş KF birleşimine dayanan bir yöntem, bozulmuş bir kaynağın spektral ayrıştırılması ve harmonikler ile ara-harmoniklerin elde edilmesi amacıyla önerilmiştir.

Mori ve diğerleri (1992), Mori ve Suga (1991) ve Osowski (1992) tarafından neredeyse aynı zaman diliminde yapılan çalışmalarda, birbirinden bağımsız olarak harmonik ve ara-harmoniklerin tespiti için YSA uygulamaları önerilmiştir. Mori ve diğerleri (1992, Mori ve Suga (1991) tarafından yapılan çalışmada, üç katmanlı, geri yayımlı (backpropagation), ileri beslemeli (feedforward) sinir ağı genlik harmonik tahmini için önerilmiş, Osowski (1992) tarafından yapılan çalışmada ise işaretin bilinmeyen genlik, faz ve n farklı frekanstan oluştuğu varsayılarak, yüksek hesaplama kapasitesi elde edilebilmesi için paralel hesaplama dayanan sinir ağı tasarlanmıştır. Osowski (1992)

tarafından yapılan çalışmada aynı zamanda, Mori ve diğerleri (1992) tarafından yapılan çalışmadaki kadar hızlı olmasa da, devre karmaşıklığını ve üretim maliyetini oldukça azaltan adaptif tahmin yöntemi ileri sürülmüştür. Mathew ve Reddy (1994) tarafından yapılan çalışmada, geri-besleme tipli sinir ağı, Pisarenko yöntemi üzerinde uygulamıştır. Harmonik alanında YSA tekniklerinin önemli referansları (Boguslaw Swiatek ve diğerleri, 2007; Nascimento ve diğerleri, 2011; Lin ve Cheng, 2007; Liu ve Qin 2010; Temurtas, 2011; Wu ve diğerleri, 2008; Xiao ve diğerleri, 2010; Xiuchun ve diğerleri, 2009; Ying ve Qingsheng, 2009) kaynaklarıdır. Dash ve diğerleri (1996) tarafından yapılan çalışmada, ADALINE olarak bilinen YSA, Fourier lineer kombinatörünü, yeni bir harmonik tahmin yaklaşımı olarak geliştirmiştir. Bu yaklaşım, geri-yayımlı yaklaşımdan oldukça farklıdır ve hata fark denkleminin parametrelerinin uygun seçimiyle birlikte yakınsama hızı ve kararlılık üzerinde daha iyi bir denetim sağladığı gösterilmiştir. Son olarak, Chang ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada, iki aşamadan oluşan, gürbüz ve ara-harmonikleri tespit edebilen ADALINE yöntemi sunulmuştur. Sarkar ve diğerleri (2011) tarafından yapılan çalışmada, frekans sapmaları ve gürültüye karşı bağımsızlığı geliştirmek amacıyla öz-senkronizasyonlu S-ADALINE algoritması geliştirilmiştir. Guangjie ve Hailong (2009) ve Chang ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, Radyal Baz Fonksiyonlu Sinir Ağı tabanlı daha basit yapıya ve yerel değişimler ile süreksizlikleri bulabilmek için daha uygun öğrenme fonksiyonlarına sahip olan bir teknik ileri sürülmüştür. Lu ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmada, parçacık sürü optimizasyonu uygulamış ve ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada ise güç harmoniklerini tespit edebilmek için, genetik algoritma tabanlı adaptif perseptron uygulaması gerçekleştirilmiştir.

PLL tekniği, hava taşıtları (Cupertino ve diğerleri, 2011; Lavopa ve diğerleri, 2009), makine kontrolü, güç sistemleri (Cataliotti ve diğerleri, 2007; Ghartemani ve Iravani, 2003) gibi birçok alanda frekans tespiti ve senkronizasyon amacıyla uygulanmıştır. Ghartemani ve Iravani (2002), Ghartemani ve diğerleri (2004), Karimi ve diğerleri (2003), Mojiri ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, lineer olmayan adaptif filtre tabanlı genişletilmiş PLL kavramı, harmonik analizinde kullanılabilmesi amacıyla ileri sürülmüştür. Genişletilmiş PLL'nin, diğer işaretlerin tepe değeri, titreşimi gibi özellikleri de açığa çıkarmada kullanılabileceği gösterilmiştir. Buna rağmen, herhangi bir özel harmonik bileşenini tespit edebilmek, tüm harmonik bileşenleri belirlemeyi, yani her

adımında önceki rezidü değerini giriş olarak alan Genişletilmiş PLL zincirlerinin kullanımını gerektirildiği için EPLL pratik bir yöntem olarak değerlendirilmemektedir. McNamara ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada, güç işaretinin esas frekansını ve her bir harmonik bileşenini adaptif olarak tahmin eden ve zamana göre değişimini takip eden bir yöntem ileri sürülmüştür. Bu yöntem, faz-dikteli sinüzoidal izleme kullanmaktadır ve ana-uydu (master-slave) deseninde bunları ayarlayarak sinüzoidal bileşenleri ortaya çıkarmaktadır. Carvalho ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada, ilk adımda bant geçiren filtre, bunun akabinde hesaplama yükünü azaltmak için aşağı-örnekleyici ve son olarak farklı frekans bileşenlerinin genlik ve faz bilgilerini sağlayan Genişletilmiş PLL'den oluşan üç aşamalı algoritma kullanılmıştır.

1.3. Hibrit Teknikler

Özgün harmonik tahmin yöntemlerinin zayıflıklarının bir başka yöntem tarafından telafi edilerek, yani üstün yanlarını kullanarak birçok hibrit teknik geliştirilmiştir (Agha Zadeh ve diğerleri, 2010; Bettayeb ve Qidwai, 2003; Bitmead, 1982; Chen ve diğerleri, 2009; Costa ve diğerleri, 2007; Dash ve diğerleri, 2010; Hostetter, 1980; Hostetter, 1983; Huang ve diğerleri, 2010; Xiong ve diğerleri, 2010; Joorabian ve diğerleri, 2009; Liu, 2001; Lobos, Rezmer ve Koglin, 2001; Martens, 1984; Mishra, 2005; Ren ve Kezunovic, 2010; Sadinezhad ve Agelidis, 2010; Sahoo ve diğerleri, 2009; Soliman ve diğerleri, 1999; Soliman ve diğerleri, 2003; Subudhi ve Ray, 2009; Tarasiuk, 2004; Wang ve diğerleri, 2005; Ye ve Liu, 2009; Xin ve diğerleri, 2007; Zhan ve Cheng, 2005). Liu (2001) tarafından yapılan çalışmada, dalgacık dönüşümünü, çeşitli harmoniklerin genlik ve faz bilgilerini dalgacık ve ölçek fonksiyonlarının katsayıları cinsinden seçerek, KF'nin frekans takibi için harcadığı zamanı kısaltmak amacıyla gerçek zamanlı bir yöntem önerilmiştir. Lobos, Rezmer ve Kolin (2001) tarafından yapılan çalışmada, geçici durumları belirlemek için dalgacık dönüşümü kullanılmıştır ve frekans içeriğini açığa çıkarmak için Prony yöntemi uygulanmıştır. Bettayeb ve Qidwai (2003) tarafından sunulan bir hibrit teknikte, genlik lineer EKY ile tahmin edilmiş ve lineer olmayan bir problem olan faz tahmini, genetik algoritmalar kullanılarak hesaplanmıştır. Joorabian ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada, ise aynı zamanda lineer ve lineer olmayan problemleri ayırtmak ve ayrı ayrı ele almak amacıyla benzer bir teknik kullanılmıştır.

Bulanık Mantık Temelli Bakteri Yaşlandırma Optimizasyon Tekniği harmonik ve temel bileşenlerin faz tahmini için Mishra (2005) tarafından yapılan çalışmada kullanılırken, yine aynı çalışmada geleneksel EKY, kanıtlanmış performansından dolayı genlik tahmini amacıyla tercih edilmiştir. Soliman ve diğerleri (1999) (2003), tarafından yapılan çalışmalarda, bulanık lineer regresyon temeline dayanan, bozulmuş bir gerilim işaretinin frekans sapması ve harmonik içeriğini, doğru bir şekilde ifade eden bir yöntem geliştirilmiştir. Huang ve diğerleri (2010) tarafından önerilen yöntemde ise bozulmuş güç işaretinin genlik ve frekans bilgilerini tahmin etmek için genişletilmiş kompleks KF yöntemiyle birlikte bulanık adaptif bir kontrolör uygulaması yapılmıştır.

Hostetter (1980), (1983) tarafından yapılan çalışmalarda, AFD özyinelemeli bir yapıda uygulanarak periyodik işaretin bant limitli ifadesi, durum değişkeni olarak kullanılmıştır. Bitmead (1982) tarafından önerilen yöntemde ise, Hostetter (1980)'deki özyinelemeli tekniğin, FIR frekans örnekleme filtrelerine eşdeğer olduğu gösterilmiştir. Martens (1984) tarafından, "Recursive Cyclotomic Factorization Algorithm" (RFCA) olarak bilinen tekniğin, AFD hesaplaması amacıyla uyarlanan özyinelemeli bir teknik sunulmuştur. Bu teknik, özyinelemeli bir yapıya sahip olduğu için birkaç tane hesaplama hücresi ile kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir ve HFD algoritmasından daha verimli olduğu makalede gösterilmiştir. Xin ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada, gerçek zamanda istenilen özel bir harmonik bileşenini tahmin edebilme yetisine sahip bir başka özyinelemeli AFD tekniği önerilmiştir. Doğruluk, düşük hesaplama maliyeti ve hızlı yakınsama özellikleri, örnekleme frekansı ve veri pencere büyüklüğüne bağlı olan bir algoritma Ren ve Kezunovic (2010) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Önerilen algoritma, özyinelemeli Dalgacık Dönüşümü tabanlı bir tekniğe dayanır. Bu tekniğin uygulanabilmesi, analiz edilen işaretin bir tam periyoduna ait verilerin bilinmesini gerektirmektedir.

Dalgacık dönüşümü ve HFD'ye dayanan birçok hibrit yöntem son yıllarda ileri sürülmüştür (Chen ve diğerleri, 2009; Tarasiuk, 2004; Ye ve Liu, 2009). Bracale ve Carpinelli (2009) tarafından önerilen yöntem, ESPRIT ve AFD tabanlı iki aşamalı tekniği içermektedir. İlk aşamada, temel frekans, AFD için ideal pencere genişliği ve ara-harmoniklerin bulunması için ESPRIT kullanılmış, ardından orijinal işaret ve ESPRIT tarafından elde edilen harmonik bileşenlerin toplamı üzerinde AFD işlemi

gerçekleştirilmiştir. ESPRIT yönteminin uygulanması, AFD için ideal pencere genişliği bilgisini ve temel frekans-ölçüm frekansı arasındaki senkronizasyonu sağlamıştır. Dalgacık dönüşümünün eş zamanlı olarak herhangi bir sınırlama olmadan geçici durumları tespit edebilme yeteneği ve HFD'nin hızı, Tarasiuk (2004) tarafından kullanılarak geçici durumları ve harmonikleri yakalayan hibrit bir yöntem ilgili çalışmada tanıtılmıştır. Chen ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışmada ise, daha doğru bir harmonik spektrum elde edilebilmesi için HFD ile işareti işlemeden önce, dalgacık dönüşümü ile gürültü giderme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Wang ve diğerleri (2005) tarafından önerilen yöntemde, Ampirik Mod Ayırıştırma yönteminin bant geçiren filtre yeteneğini arttırmak amacıyla, DPD tabanlı bir hibrit yöntem önerilmiştir. Diğer bir hibrit yöntem Costa ve diğerleri (2007) tarafından önerilen KF ve Prony yöntemini kullanan bir uygulamadır. Prony yöntemi frekans kestiricisi olarak belirlenmiş, KF ise her bir harmoniğin genlik ve faz değerlerini ortaya elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu teknik, zamanla değişen işaretleri izleme, ara-harmonikleri bulabilme yeteneğine sahiptir ve frekans tahmini için Prony yöntemini kullandığından, harmonik frekanslarının önceki değerlerinin KF içerisinde bilinmesinden bağımsızdır (Çünkü sadece genliği tahmin eden bir model ile çalışmaktadır. Bu uygulama için frekans takibini KF yapmamaktadır).

2009 yılında, birçok hibrit şema (Chang Soliman ve diğerleri, 2009; Joorabian ve diğerleri, 2009; Sahoo ve diğerleri, 2009; Subudhi ve Ray, 2009) ADALINE yöntemini uygulamak için önerilmiştir. Subudhi ve Ray (2009) tarafından yapılan çalışmada, ADALINE adaptif tahmin edici olarak, özyinelemeli EKY ve KF ise, adaptif YSA kestiricisinin katsayılarını güncellemek için iki ayrı metot olarak kullanılmıştır. Ancak, KF-ADALINE yönteminin performansının, LS-ADALINE yöntemininkinden daha iyi olduğu saptanmıştır. Sahoo ve diğerleri (2009) tarafından yapılan çalışma, gürbüz H_∞ filtresini genlik kestirimi için, ADALINE'i ise faz kestirimi için kullanmıştır. H_∞ filtre yaklaşımı, işaretteki sinüzoidal sayısının bilindiği varsayımı altında, işaretin durum uzay modeline dayandığı ilgili çalışmada belirtilmiştir. Bu noktada, KF'nin sadece beyaz gürültü altında iyi sonuçlar verdiği, H_∞ filtresinin ise gürültü tipinden bağımsız olarak, ilgili parametrelerin kestirimini yapabildiğine değinmek faydalı olacaktır.

Jiefeng Xiong ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, pencerelenmiş interpolasyon ve ana harmonik bileşenine veya diğer harmoniklere yakın bulunan ara-

harmonikleri tespit etme kapasitesine sahip olduğu öne sürülen Prony tabanlı bir yöntem tanıtılmıştır. Pencerelemiş interpolasyon yöntemi, harmonik bileşenleri bularak iki komşu bileşen arasında yerleşmiş frekans aralıklarını tanımlar. Daha sonra Prony algoritması, bu bitişik bileşenleri hesaplamak amacıyla kullanılır. Destek Vektör Makinesi algoritması tabanlı bir teknik, Zhan ve Cheng (2005) tarafından, iteratif yeniden ağırlıklandırılmış EKY kullanılarak harmonik ve ara-harmoniklerin kestirimi amacıyla tanıtılmıştır. Dash ve diğerleri (2010) tarafından yapılan çalışmada, Adaptif Parçacık Sürü Optimizasyonu (APSO) algoritması, unscented KF'nin parametrelerini optimal olarak seçmek ve hata kovaryansını ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Unscented KF, durağan olmayan işaret parametrelerinin daha kesin ölçümünü sağlamaktadır, çünkü hata kovaryans matrisinin ve durumun hesaplanması için lineerleştirme kullanmaz. APSO, düşük SNR seviyelerinde ve filtre parametrelerinde meydana gelebilecek hata durumlarında da uygulanan KF bazlı yöntemin işaret parametrelerine başarıyla yakınsamasını sağlar. Ayrıca yazarlar tarafından, sistemin yerel minimumlara takılmaması için APSO üzerinde gerekli önlemler alınmıştır. Zadeh ve diğerleri, (2010) tarafından yapılan çalışmada, KF ve En Küçük Karesel Hata tekniği, yeni bir hibrit yöntem türetilmek amacıyla kullanılmıştır. KF, gürültüye ve diğer bozuculara duyarsız olarak kesin tahmin sonuçlarının sağlanabilmesi amacıyla modifiye edilmiş ve En Küçük Karesel Hata, sistemi kritik gecikme ve KF tarafından belirlenen hataları gidermek için geçici durumlarda işlem yapabilmesi amacıyla düzenlenmiştir. Aynı zamanda gürültü etkisi, yüksek derecede harmonikler ve algoritmanın hesaplama zorlukları gibi pratik hususlar da test sonuçlarıyla birlikte sunulmuştur. Sadinezhad ve Agelidis (2010) tarafından yapılan çalışmada, Newton Yöntemi ve LS algoritması tabanlı optimizasyon tekniği, güç sistem frekansı ve harmoniklerinin adaptif olarak ölçülmesi amacıyla önerilmiştir.

1.4. Tezin Motivasyonu

Güç sistemlerinin tasarımında sadece güvenli ve kararlı sistemlerin değil, aynı zamanda verimli sistemlerin de tasarlanması büyük önem arz etmektedir. Bu açıdan geleneksel olarak güç kalitesi tanımı, elektrik enerjisinin efektif bir şekilde kullanılması için tanımlanmıştır ve doğru bir şekilde ölçülmesi standartlara tabii tutulmuştur (1159-2019 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality | IEEE Standard | IEEE Xplore, 2019). Güç kalitesini etkileyen önemli ölçütlerden birisi güç faktörüdür.

Güç faktörü, bir yükün çektiği akım ve gerilim büyüklüklerinin aralarındaki faz farklarının sifira yaklaştırılması ile maksimum değerine yaklaşır. Öte yandan iki büyüklük arasındaki faz farkının artması, güç faktörünü kötüleştirir ve sistemde reaktif gücün artmasına sebep olmaktadır.

Güç faktörü sistem verimini ölçmekte önemli bir tanım olmasına rağmen, sistemin temel frekansına göre gerçekleştirilen hesaplamalar üzerine tanımlanır. Bir başka deyişle, sistem 50 Hz frekansında temel harmoniğe sahip ise güç faktörü bu temel frekans üzerindeki akım ve gerilim büyüklüklerini dikkate alır. Öte yandan, birçok sistem içerisinde temel harmoniğin tamsayı katı olan harmonikler veya tamsayı olmayan katlarında bulunabilen ara-harmonikler mevcuttur. Harmonik veya ara-harmonik frekansları, üzerlerinde sistemin yapısına bağlı olarak görece yüksek güçler barındırabilir. Güç sistemlerinde gerilim ve akım büyüklüklerinin temel frekansta iletilmesi gerekliliğinden ve diğer frekanslarda bulunan bileşenlerin güç aygıtları tarafından kullanılamamasından mütevellit sistem üzerinde ve iletim hatlarında harmonik/ara-harmoniklerin bulunması istenmeyen bir durumdur ve enerji kayıpları oluşturmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, harmoniklerin ve ara-harmoniklerin genlik, frekans ve faz bilgilerinin hızlı ve gerçek değerlere yakın bir şekilde bulunması, harcanan enerjinin tespitinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, tezin giriş bölümünde de belirtildiği gibi, ara-harmoniklerin geleneksel yöntemlerle ölçümünün zor veya imkânsız olması, yeni yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç doğurmuştur. Dolayısıyla, bu amaç ve motivasyonla tez konusu olarak harmonik ve özellikle de ara-harmonik parametrelerinin kestirimi fikri üzerinde durulmuş ve tez içerisinde Prony Yöntemi ve AHD tabanlı frekans, genlik ve faz kestirimi yapabilen bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, bu yöntemin işaret modelinden esinlenilerek MUSIC ve AHD tabanlı ikinci bir yöntem frekans tahmini amacıyla önerilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda, önerilen yöntemlerin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Harmonik ve ara-harmoniklerin tespiti, enerji verimliliğini ölçmenin dışında, sistem arızalarının kaynaklarının araştırılması ve bu arızaların önlenmesi açısından da oldukça önemlidir. Güç sistemlerinin tasarımına ve içerisinde kullanılan kondansatör, endüktans veya sistemin frekans yanıtını değiştirebilecek elemanların değerlerine bağlı olarak, güç sisteminin içerisinde istenmeyen frekansların belirmesine ve bu frekanslardaki

bileşenlerin sistemin bazı parçalarına giriş olarak ulaşması, sistemde istenmeyen davranışlara (rezonans, girişim v.b.) sebep olabilmektedir. Bu frekansların belirlenmesi ve bastırılması, sistemin güvenliği için oldukça önemlidir. Hatta ara-harmonikleri önceden belirleyebilen yöntemler sayesinde, henüz sistem tasarım aşamasındayken ilgili parametreler, benzetim teknikleri ve ara-harmonik ölçen yöntemler sayesinde istenmeyen harmonik bileşenlerin oluşmaması yönünde seçilebilir. Bu açıdan bakıldığında, ara-harmoniklerin ölçülmesi ve bastırılmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi, güç elektroniği alanı açısından önemlidir.

Son olarak konu bir bütünlük açısından ele alındığında, genlik, frekans ve faz bilgilerinin kestirimi sadece güç elektroniği alanı için değil, aynı zamanda görüntü işleme, biyomedikal sistemler, haberleşme sistemleri ve birçok konuda gereksinim duyulan önemli bir konudur. Bu bağlamda, tez çalışması bu alanlarda kullanılabilecek yöntemler önermektedir. Bu çalışmadan hareketle diğer alanlarda yapılabilecek çalışmalar tezin motivasyon kaynaklarından bir diğerini oluşturmaktadır.

1.5. Tezin Amaç ve Kapsamı

Gerçekleştirilen tez çalışması, harmonik ve ara-harmoniklerin genlik, frekans ve faz değerlerini belirleyebilmek amacıyla Prony ve AHD tabanlı bir yöntem önermektedir. Ayrıca, frekans kestirimi yapabilmek amacıyla MUSIC ve AHD hibrit ikinci bir yöntem daha sunmaktadır. Bu yöntemlerin geliştirilme amaçları, harmonik ve ara-harmonik dağılımlarını belirleyebilmek, taşıdıkları enerji değerlerini ölçebilmek ve uygulamalarda harmonik tabanlı meydana gelebilecek hataları, tasarım aşamasında veya gerçek zamanlı olarak adaptif filtre uygulamalarıyla önleyebilmek olarak sıralanabilir. Ayrıca; görüntü işleme, biyomedikal işaret işleme, haberleşme sistemleri vb. alanlarının genlik, frekans ve faz kestirimine ihtiyaç duyulan birçok uygulamaları içerisinde de kullanılabilecek yöntemlerin geliştirilmesi, yan amaçlar olarak sınıflandırılabilir. Bu amaçlar göz önüne alındığında gerçekleştirilen tez çalışmasının, başta güç sistemlerinde işaret parametrelerinin kestirimi olmak üzere, diğer uygulama alanlarında da geniş bir kapsamı olduğu belirtilebilir. Tez içerisinde güç elektroniği alanı özel olarak incelendiği için esas olarak tez; güç sistemlerinde parametre kestirimi, güç sistemi içerisinde harcanan veya üretilen gücün hızlı ve etkin bir biçimde ölçülmesi ve son olarak sistem tasarımında

harmonik/ara-harmonik kaynaklı meydana gelebilecek hataların önceden tahmin edilerek tasarım aşamasında önlenmesi konularını kapsamaktadır.

1.6. Tezin Katkıları

Tezin katkıları, başta güç sistemlerinde ara-harmonik kestirimi olmak üzere çeşitli bakış açıları ile aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Tezde güç sistemleri içerisinde meydana gelen ara-harmonik ve harmoniklerin genlik, faz ve frekans bilgilerini ölçebilen Prony ve AHD tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, frekans kestirimi yapabilen MUSIC ve AHD tabanlı ikinci bir yöntem önerilmiştir.
- Tezde önerilen yöntemler, ara-harmonikleri de bulabildikleri için güç sistemlerinde enerji ve güç ölçümünün gereksinim duyulduğu yerlerde kullanılabilir ve sadece harmonikleri ölçebilen geleneksel yöntemlerden daha iyi sonuç verebileceği öngörülmektedir.
- Tezde önerilen yöntemler ara-harmoniklerin tespit edebilme yetenekleri sayesinde, güç sistemlerinde meydana gelebilecek hataları önceden öngörebilmektedir ve bu sayede sistem tasarımlarının daha güvenli ve hatalardan uzak bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sunabilmektedir.
- Tezde önerilen yöntemler, türetildikleri üst yöntemlere göre daha hızlı ve başarılı sonuçlar elde edebilmektedirler. Elde edilen sonuçların hız ve doğruluk açısından kıyaslanmaları uygulamalar bölümünde gösterilmiştir.
- Tezde önerilen yöntemlerin sadece güç elektroniği değil, diğer disiplinlerde de uygulanabilir niteliktedirler. Örneğin, görüntü işleme, biyomedikal işaret işleme, haberleşme sistemleri vb. alanlarda genlik ve frekans tespitinin gereksinim duyulduğu konularda kullanılabilme potansiyeli vardır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Harmoniklerin kestiriminde yeni bir yöntem ortaya koymak, bu tür harmoniklerin kaynaklarını araştırmayı, ölçüm yöntemlerini tanımayı, güç sistemleri üzerinde oluşturacağı etkinin incelenmesini ve mevcut frekans kestirim yöntemlerinin bilinmesini gerektirmektedir. İlgili konular, tezin kuramsal temellerini oluşturmakta ve bu bölümde ele alınmaktadır.

2.1. Ara-harmonikler ve Ölçüm Zorlukları

Güç sistemlerinde ara-harmoniklerin varlığı, sadece frekans analizinde ve frekans spektrumunun doğru bir şekilde ortaya çıkarmasında birçok sorunu beraberinde getirmekle kalmamış, aynı zamanda ek problemler de yaratmıştır. Frekans kestirim zorluğunun haricinde ara-harmoniklerin varlığının güç sistemleri arasında oluşturduğu sorunlar arasında; termal etkiler, elektrik motoru gibi mekanik sistemlerin düşük frekanslı salınımları, ışık ve katot ışın tüplerinde oluşan titreşimler, telekomünikasyon, kontrol ve koruma işaretlerinde meydana gelen parazitler, pasif filtrenin öngörülme frekanslarda aşırı yüklenmesi ve rezonans sorunları, gerilim ve akım işaretleri üzerinde oluşan bozulmalar vardır. Ortaya çıkabilecek bu etkiler, düşük güç ile çalışan sistemlerde de görülebilir, hata ve arızalara sebebiyet verebilir (Barros, Prez, Pigazo, ve Diego, 2002; Gallo, Daniele, Langella, Roberto, Testa, 2003; Gallo, Langella, Testa, 2003; Ghartemani ve Iravani, 2005; Lin, 2014; Lin 2013).

Harmonik olgusunu anlamaya ve açıklamaya yönelik başlıca yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Lin, 2014):

- Doğru akım enjeksiyonu
- Harmonik güç akışı
- İteratif harmonik analiz
- Deneysel analog modelleme
- Zaman boyutu modelleme
- Doğru akım enjeksiyonu: Alçak gerilim (AG) şebekelerinde, PV sistemler güç hattına doğru akım verebilmektedirler. Bu etki, şebekede bulunan

transformatörleri doyuma götürerek dalga şeklinin bozulmasına, dolayısıyla harmonik üretimine sebebiyet verir. PV sistemlerinde eviricinin şebekeye vereceği doğru akımın etkisini azaltacak yönde enjekte edilen akım, harmonik etkisini düşürecektir. Bu enjeksiyon işlemi, doğru akım enjeksiyon yöntemi olarak bilinir. IEEE Std 929-2000 standartlarına göre bir eviricinin şebekeye verebileceği doğru akım (DA), sağlanan nominal akımın %0.5'ini aşmamalıdır (Arııcı, İskender, 2020; IEEE Std 1547, 2003).

- Harmonik güç akışı: Bir şebekede, hatlar ve baralar üzerindeki güç işaretlerinin temel ve harmonik bileşenlerinin hesaplanması esasına dayalı bir analiz yöntemidir. Bu yöntemde, güç işaretleri Fourier serileri ile ifade edilir ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile frekans boyutuna taşınır. Harmonik güç akışı yönteminde, akım-gerilim karakteristiği doğrusal ilişkide olan baralar lineer bara olarak ele alınır. Üretim baraları ve salınım baraları da lineer bara kategorisine girer. Doğrusal akım-gerilim karakteristiği olmayan baralar ise lineer olmayan baralar başlığı altında incelenir. Geleneksel olarak harmonik güç akışı yönteminde, Newton-Raphson yöntemine bağlı olarak türetilen matematiksel metotlar kullanılır (Alaşahan ve diğerleri, 2016; Grady, 1983).
- İteratif harmonik analiz: Harmonik güç akışına benzer olarak iteratif yöntemlerle harmonikler üzerinde analiz yapan bir yöntemdir (Arrillaga ve diğerleri, 2013; Karadeniz ve diğerleri, 2018). Bu yöntem, farklı topolojiler için uygulanabilir. Örneğin alternatif akımı doğru akıma çeviren üç fazlı bir sistem için iteratif harmonik analizi gerçekleştirilmenin ilk adımı temel frekans bulmaktır. Daha sonra, her bir doğrultucu çıkışındaki AA harmonikler ve DA bileşeni hesaplanır. Ardından, sistemin AA harmonikleri ve DA bileşeni bulunur. Her bir doğrultucu çıkışının ve sistemin AA bileşenlerinin hesaplanması, harmonik analizi oluşturur ve belirli bir yakınsama elde edilesiye kadar sürekli olarak bu hesaplamalar tekrarlanır (Caramia ve diğerleri, 1994).
- Deneysel analog modelleme: Bir sistemin belirli koşullar altında, test ve ölçüm değerlerine verdiği yanıtlar göz önüne alınarak dinamik bir modelinin geliştirilmesi esasına dayanır. Bu tekniklere örnek olarak; sistemin adım yanıtına bağlı olarak parametrelerini tahmin etme (Broida yöntemi), sisteme verilen girişler doğrultusunda sistem çıkışının frekans yanıtını inceleyerek sistemi

tasarlama ve MLE veya en küçük kareler algoritması gibi metotlar kullanarak sistemi bir eniyileme kıstası ile tanımlama yöntemleri gösterilebilir (Mbihi, 2018).

- Zaman boyutunda modelleme: Bu yöntem, güç sistemlerinin zaman boyutundaki matematiksel ifadelerini kullanarak harmonik analizini gerçekleştirir. Bir sistemin zaman boyutu benzetimi, frekans boyutu benzetiminden daha fazla hesaplama yükü getirir ancak daha kesin sonuçlar vereceği açıktır. Ayrıca, zaman boyutu denklemleri birçok benzetim programı tarafından desteklenmektedir ve yük karakteristikleri önceden programa tanımlanmamış lineer olmayan elemanların bile modellenmesine imkân verir. Sistemin zaman boyutu modeli kullanılarak, sistemin zorlanmış yanıtı ve doğal yanıtı elde edilir. Zorlanmış yanıt, güç kaynağının sisteme enjekte ettiği temel frekans için sistemin verdiği yanıtıdır. Sistemde bulunan lineer olmayan elemanlar, sisteme verilen frekanstan daha farklı değerlerde frekanslar üreteceklerdir, çünkü matematiksel yapıları bunu gerektirmektedir (Smith ve Yacamini, 1993).

Yukarıda beş madde ile açıklanan yöntemler genel olarak Fourier analizini kullanmaktadır. Denklem (2.1) ve (2.2)'den görülebileceği üzere, bu yöntemlerin sağlıklı sonuç vermesi, Fourier temel frekansının tamsayı olmayan katlarında bulunan ara-harmoniklerin varlığı durumunda mümkün olamayacaktır. Bu yöntemlerin ara-harmoniklerin varlığı durumunda kullanılması sonucu oluşabilecek sorunlar aşağıda listelenmiştir (Carbone ve diğerleri, 1995; Lin, 2013).

- Düşük güçlü analog modellerin ve zaman boyutu modellerinin kullanımı küçük sistem boyutlarında sorunlar teşkil etmektedir.
- Doğru akım enjeksiyonunun uygulanması pratikte zordur ve hatalı sonuçlar verebilmektedir.
- Ara-harmonikler mevcutken harmonik güç akışı yönteminin uygulanması oldukça zordur.
- İteratif harmonik analizinin uygulanması, doğrusal olmayan yüklerin modellenmesinde oldukça karmaşıktır (Carbone, Morrison, Testa ve Menniti, 1995).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) \right), n \in \mathbb{N}^+ \quad (2.1)$$

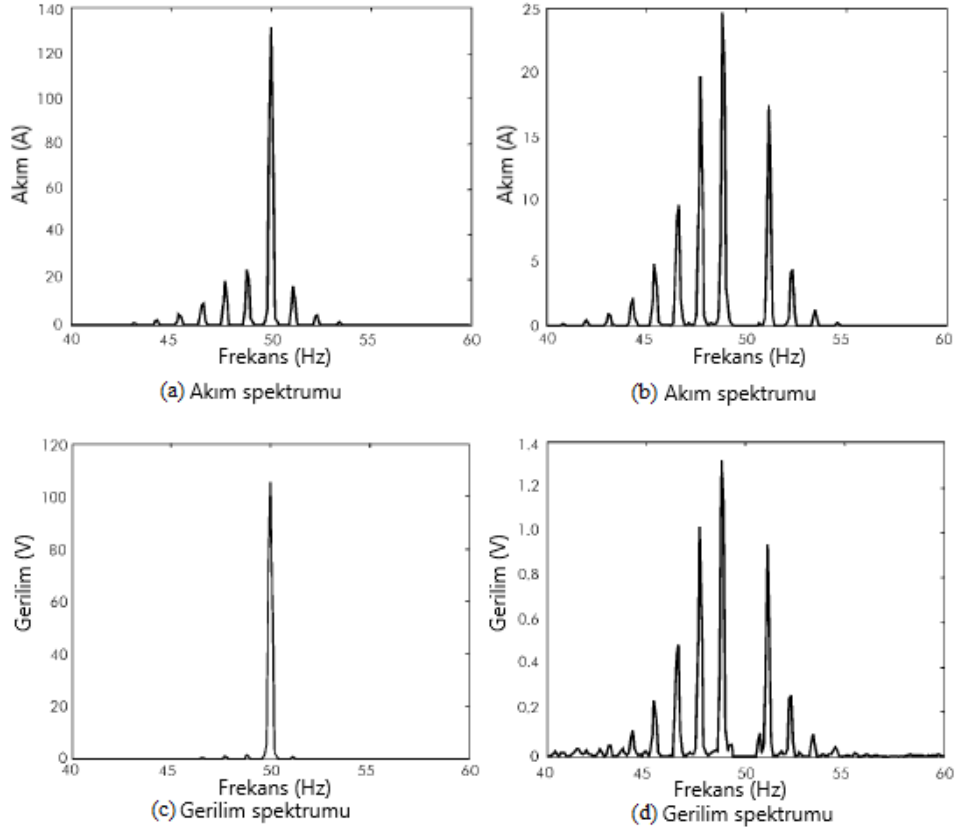
$$T = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

2.2. Ara-harmonik Kaynakları

Ara-harmonikler temel olarak iki grup altında incelenebilir. Birinci grupta bulunanlar; güç tesislerinde ani akım değişimlerine bağlı olarak genlik ve fazda meydana gelen ani sapsmalar sonucu ortaya çıkan temel frekansın çevresinde yan bantlarda yer alan ara-harmonik tipleridir. Genel olarak güç kaynağı geriliminde meydana gelen dalgalanmalardan kaynaklandığı söylenebilir. İkinci grupta yer alan ara-harmonik tipleri, yarı iletken elemanlar kullanılarak tasarlanan çeviricilerin asenkron anahtarlanması sonucu ortaya çıkan bileşenlerdir. Anahtarlama frekansının temel frekans ile senkronize olmaması sonucu ortaya çıkar. Aşağıdaki altbölümlerde önemli ara-harmonik kaynaklarından birkaçı açıklanmaktadır (Lin, 2014).

2.2.1. Değişken yüklü elektriksel aygıtlar

Stator ve rotor kanallarını yapısında barındıran indüksiyon motorları, ara-harmonik kaynaklarından birisidir. Motorun sabit bir hızda çalıştırılması durumunda, girişim frekansı 500 Hz ile 2000 Hz arasında meydana gelir. Motor hızlandırılma aşamasına alınırsa, bu aralık daha da geniş olacaktır. Asimetrik olmayan özelliklere sahip motor, örneğin oluk aralıkları düzgün tasarlanmamış motorlar, ara-harmoniklere neden olmaktadır. Şekil 2.1, motor akımı ve gerilim spektrumunu göstermektedir (Hanzelka ve Bien, 2004a). Bu tipte ara-harmonik üreten diğer elektriksel aygıtlara örnek olarak, dövme tahrikleri, dövme çekiçleri, otomatik damgalama makineleri ve elektrikli testereler gibi değişken momente sahip elemanlar verilebilir.



Şekil 2.1. Motor fazlarındaki akım ve gerilimlerin spektral analizi (a) tüm akım spektrumu, (b) ana frekans kaldırıldığında elde edilen akım spektrumu (c) tüm gerilim spektrumu, (d) ana frekans kaldırıldığında elde edilen gerilim spektrumu((Hanzelka ve Bien 2004a)'den değiştirilerek alınmıştır).

2.2.2. Çift katlı dönüşüm sistemleri

Güç elektroniği sistemlerinde, alternatif akımı farklı bir frekansta başka bir alternatif akıma dönüştürmek önemli bir konudur. Bu işlemi doğrudan gerçekleştiren AA-AA dönüştürücü sistemleri tasarlanmış olsa da (matris konvertör, çevrim çevirici, v.b.) öncelikle alternatif akımı doğru akıma ve bunun ardından doğru akımı alternatif akıma dönüştüren sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür sistemler doğaları gereği, ara katta bir DA bağlantı noktası içermek zorundadırlar. Her ne kadar DA bağlantı noktasında ideal sabit bir doğru akım beklentisi olsa da, doğru akımda zamanla meydana gelecek küçük salınımlar, DA gerilimi AA gerilime çeviren evirici sistemlerinin çıkışlarında

önemli derecede ara-harmoniklere neden olurlar. Bu tür yapılara, rüzgâr türbinleri, değişken hızlı motorlar ve statik frekans dönüştürücüler örnek olarak verilebilir.

İdeal doğrultucu yalnızca Denklem (2.3) gibi karakteristik harmonikler üretir.

$$f_h = (p_1 n \pm 1) f \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de, p_1 , doğrultucunun darbe sırası (bir periyot içinde kaçınıcı sayıdaki darbeyi gönderdiği), n tamsayı ve f güç sistemi frekansdır (Lin, 2014).

Uygulamada, DA bağlantı noktası sabit bir değer etrafında salınır. Bundan dolayı, DA bağlantı noktası evirici tipine (akım kaynağı eviricisi (CSI) ve gerilim kaynağı eviricisi (VSI)) bağlı olarak ara-harmonikler üretecektir (Testa ve diğerleri, 2007).

- (a) CSI: Darbe sayısı p_2 , çıkış frekansı f_o ve n bir tamsayı olmak üzere, evirici girişindeki DA salınımı Denklem (2.4)'e göre ara-harmonikler üretecektir.

$$f_r = np_2 + f_o \quad (2.4)$$

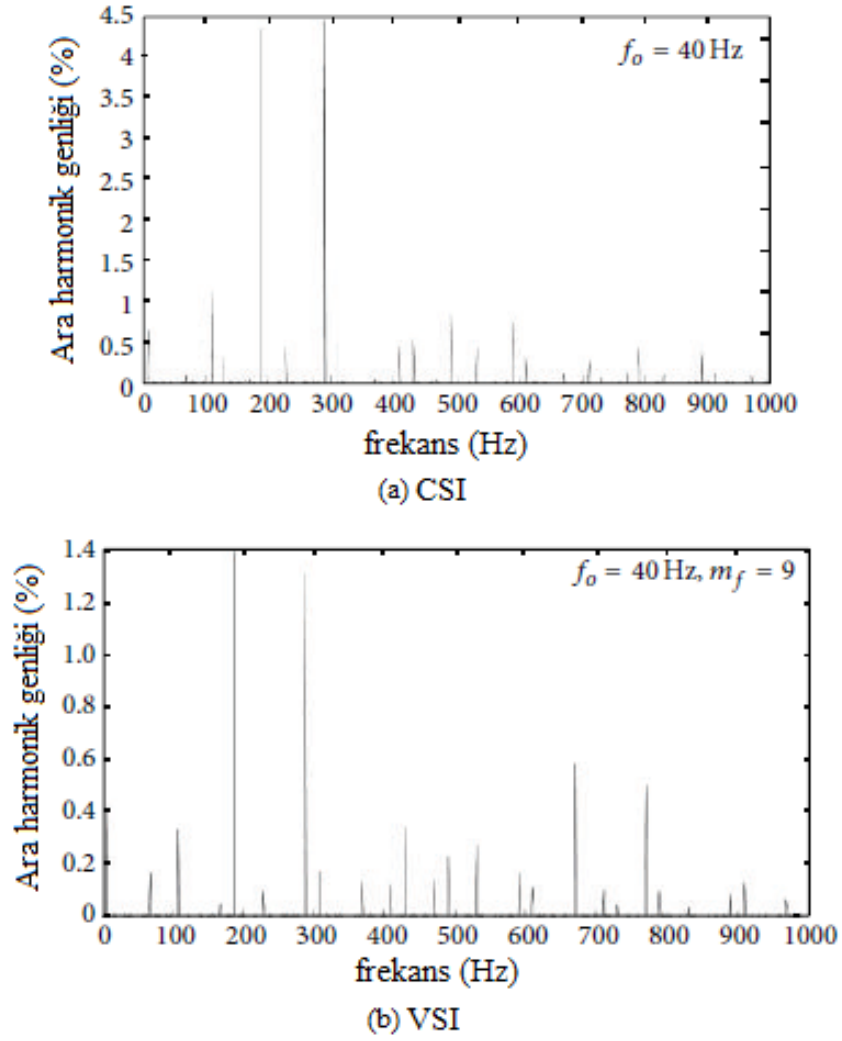
- (b) VSI: Evirici girişindeki DA salınımı, darbe genişlik modülasyonu yöntemi ile AA gerilim üretirken Denklem (2.5)'e göre ara-harmonik frekansları üretecektir.

$$f_r(m_f, j, r) = |m_f j \pm r| \cdot f_o \quad (2.5)$$

Burada j ve r modülasyon oranına bağlıdır ve m_f anahtarlama yöntemiyle ilgilidir. Sonuç olarak, modüle edilmiş kaynak frekansı Denklem (2.6) ile verilir.

$$f_i = f_h \pm f_r \quad (2.6)$$

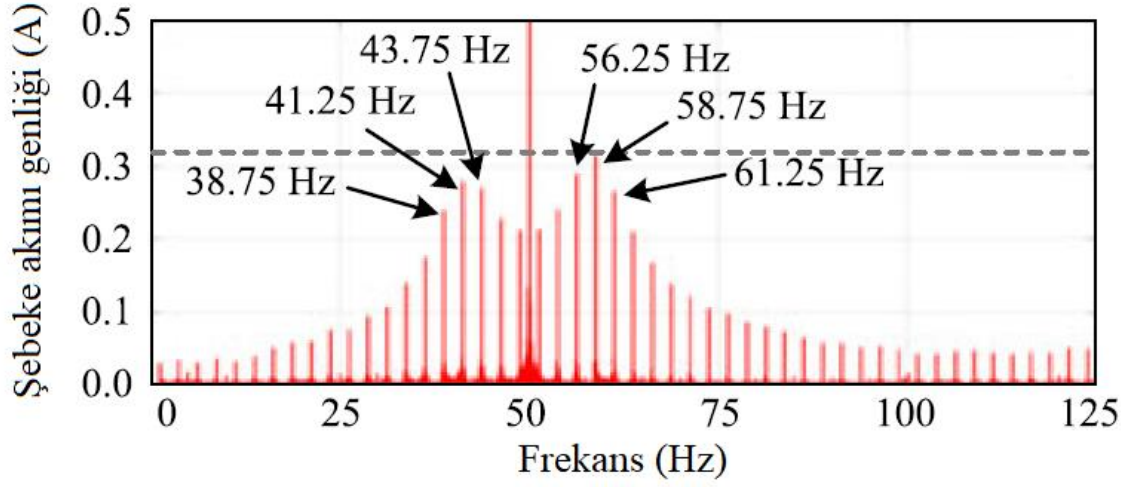
CSI ve VSI sistemler için frekansa bağlı olarak ara-harmonik dağılımları Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Ara-harmonik genlikleri, ana frekans bileşeninin genlik değerine kıyasla yüzde olarak verilmektedir.



Şekil 2.2. İnvörtör sistemleri çıkışlarındaki ara-harmonikler (a) CSI (b) VSI ((Testa ve diğerleri, 2007)'den değiştirilerek alınmıştır.)

Bu yöntemlerle üretilen frekanslara örnek olarak Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking-MPPT) algoritmasına göre çalışan ve güneş pilleri ile elde ettiği doğru gerilimi alternatif gerilime çeviren evirici sistemleri verilebilir. Bu sistemin frekans akım grafiği Şekil 2.3'de gösterilmiştir. MPPT adım frekansı 18 V'dur. Bu noktada MPPT algoritmasına bağlı olarak da ara-harmoniklerin üretildiği ve bu bölümde değinilmeyen bu ara-harmoniklerin özel bir matematiksel yapısı olduğu

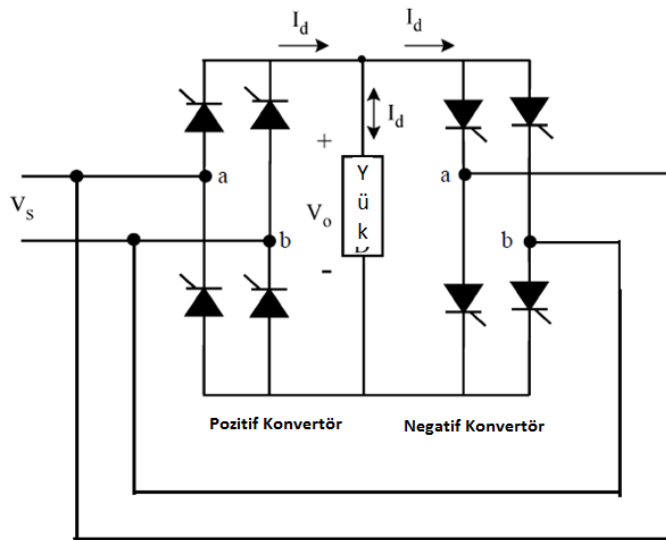
belirtilmelidir.



Şekil 2.3. PV sistemler için evirici çıkışındaki ana frekans ve harmoniklerin dağılımı ((Sangwongwanich ve diğerleri, 2018)'den değiştirilerek alınmıştır.)

2.2.3. Çevrim çeviriciler

Çevrim çeviriciler, giriş frekansını doğrudan farklı bir frekansa çeviren yapılardır. DA bileşeni barındıran bir ara kata sahip değillerdir. Giriş işaretini, iki farklı diyotlu doğrultucu yapısıyla değiştirerek çıkışa aktarırlar ve bu sayede farklı bir frekansta işaret üretirler. Devre yapısı Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



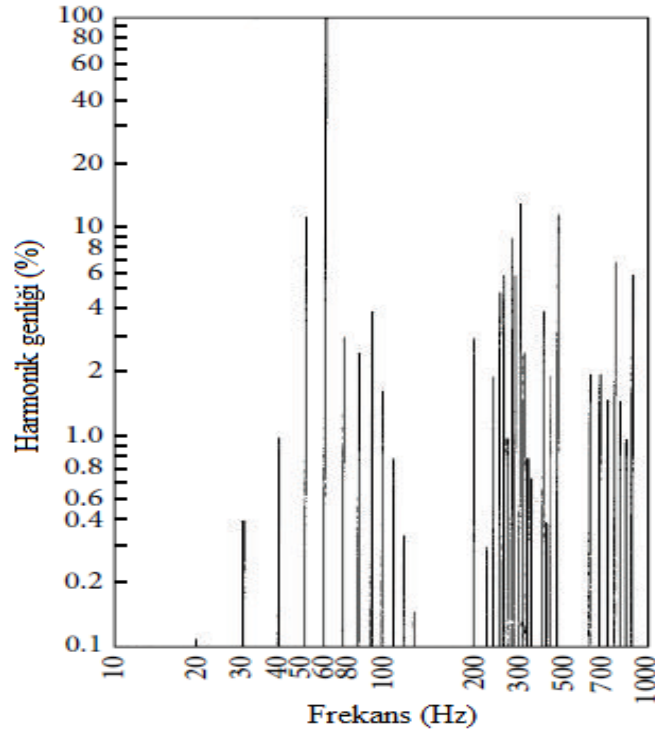
Şekil 2.4. Çevrim çevirici yapısı ((Ozpineci ve Tolbert)'den değiştirilerek alınmıştır)

Çalışma yapıları gereği çevrim çeviriciler önemli ara-harmonik kaynakları arasında yer alırlar. Motor sürücülerinde, değişken frekans üreten jeneratörlerde vb. yapılarda kullanılırlar. Çevrim çeviriciler tarafından oluşturulan ara-harmonik bileşenleri, Denklem (2.7) ile modellenenbilir (Lin, 2014; Alfredo Testa ve diğerleri, 2007).

$$f_h = (p_1 n \pm 1) f \quad (2.7)$$

Burada p_1 , doğrultucunun darbe sayısı ve p_2 çıkış darbe sayısı; $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ (tam sayı); f_o , çevrim çeviricinin çıkış frekansdır.

Şekil 2.5’de örnek bir çevrim çevirici devresinin akım ara-harmoniklerini göstermektedir. Bu çevrim çeviricinin giriş frekansı 60 Hz ve çıkış frekansı 5 Hz’dir. Pozitif ve negatif konvertör bölümlerinin her biri, bir giriş periyodu içerisinde 6 darbe üretmektedir.



Şekil 2.5. Çevrim çevirici çıkış frekans dağılımı ((IEEE Interharmonic Task Force, 1995)’den değiştirilerek alınmıştır)

2.2.4. Zamanla değişen yükler

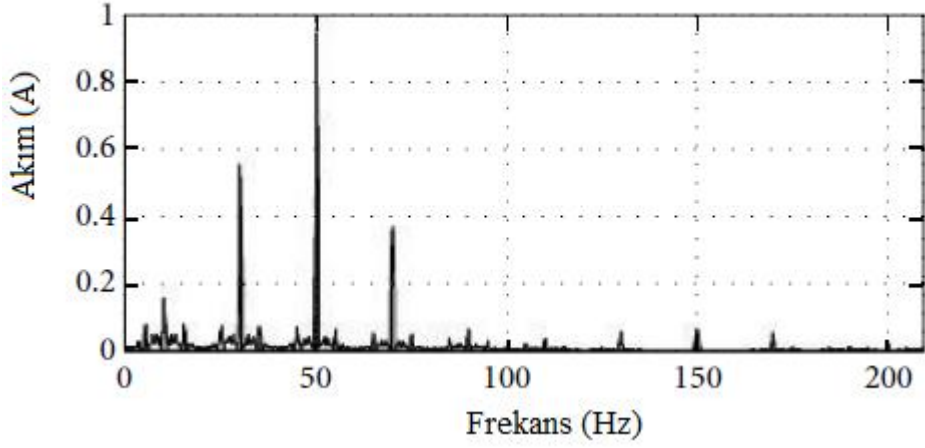
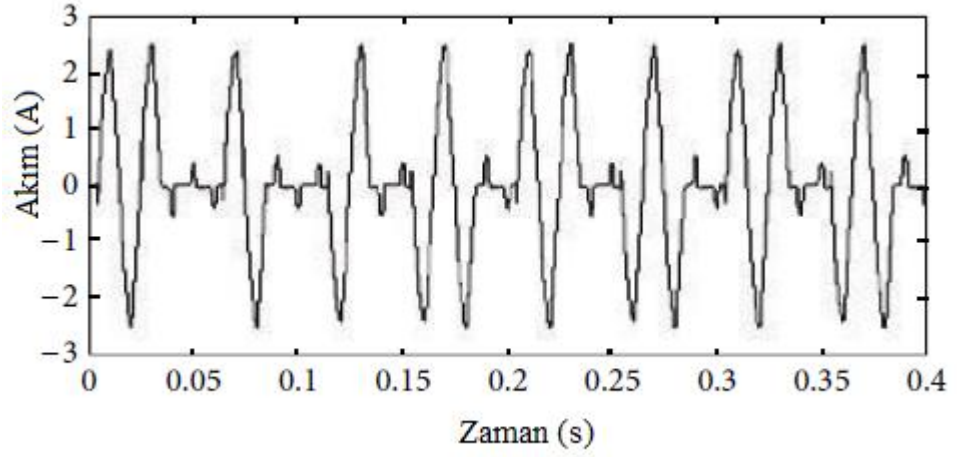
Zamanla değişen yükler, belli bir kurala göre veya rastgele olarak değer alabilen yük tipleridir. Değişken yapılarından dolayı güç sistemleri üzerinde düzenli veya düzensiz gerilim/akım dalgalanmaları oluştururlar. Bu özellikleri ara-harmoniklere sebep olmaktadır. Bu tür yüklerle örnek olarak; kaynak makineleri, lazer yazıcılar, ark fırınları vb. verilebilir.

Zamanla değişen yüklerde üretilen ara-harmonikler, yük frekansına bağlıdır. Şebeke geriliminin $v(t) = \sin(2\pi ft)$ ve yükün $R(t) = 1 - r \cos 2\pi f_o t$ olduğu varsayımıyla ($r < 1$, f_o yük frekansı) yük akımı Denklem (2.8) ile verilebilir.

$$i(t) = \frac{v(t)}{R(t)} = \frac{\sin(2\pi ft)}{1 - r \cos 2\pi f_o t} \quad (2.8)$$

$$= \sin(2\pi ft) (1 + r \cos 2\pi f_o t + r^2 \cos^2 2\pi f_o t + r^3 \cos^3 2\pi f_o t + \dots)$$

Denklem (2.7)'ye bağlı olarak, ara-harmoniklerin $f \pm f_o$, $f \pm 2f_o$, $f \pm 3f_o$, ... frekanslarında bulunduğu görülür. Denklem (2.7)'den anlaşıldığı üzere, f_o frekansı f frekansı ile eğit veya f frekansının tam sayı katına eğit olmadığı müddetçe ara-harmoniklerin üretilmesi kaçınılmazdır. Yük frekansı ile kaynak frekansının eğit olduğu durumda ise, harmonik veya ara-harmoniklerin oluşmayacağı anlaşılmaktadır. Yük frekansı, kaynak frekansının tam sayı katı ise sadece harmonikler oluşur ve ara-harmonikler gözlenmez. Lazer yazıcıdan elde edilen sonuçlar Şekil 2.6'da verilmiştir (Gallo ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.6. Lazer yazıcının çektiği akım (a) zaman boyutu (b) frekans boyutu (Testa ve diğerleri, 2007)'den değiştirilerek alınmıştır.)

Zamanla değişen yüklerle diğer bir örnek ark fırınlarıdır. Bu tür yükler genellikle düşük frekanslı gerilim dalgaları ürettikleri için ışık titremeleri üretirler. Bundan farklı olarak yüksek frekanslı ara-harmonikler de üretebilirler. DA ark fırınlarının normal çalışma durumunda harmonik üretmesi beklenmez. Ancak yapılarında bulunan kontrol devreleri ve filtrelerin etkisiyle, harmoniklerin ve ara-harmoniklerin oluştuğu gözlemlenmiştir (IEEE Interharmonic Task Force, 1995).

Harmonik ve ara-harmonik üreten bu yükler, lineer olmayan davranış karakteristiklerine sahiplerdir ve matematiksel olarak modellenmeleri çok zordur. Bu nedenle matematiksel yapılarına değinilmeyecektir (Lin, 2014).

2.2.5. Rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri bir alternatörün, rüzgâr tarafından tetiklenen mekanik sistemler vasıtasıyla elektrik gücü üretmesi prensibine bağlı olarak çalışır. Bu sistemler mekanik tahrikin zamanla değişmesi nedeniyle farklı frekanslarda gerilim üretirler ve bu üretilen gerilim DA bağlantılı çeviricilerle veya DA bağlantısı olmayan çeviricilerle çıkışa sabit frekanslı gerilim işareti olarak iletilir. Kullanılan çevirici türünün harmonikler veya ara-harmonikler üzerinde etkisi vardır. Ancak kullanılan çevirici türünden bağımsız olarak, tasarlanan alternatörün yapısı, mekanik aktarım elemanları ve sisteme etki eden momentin değişiminden kaynaklı harmonik ara-harmonik etkileri de mevcuttur.

Moment, sadece rüzgâr hızındaki sapmalardan dolayı değişmemektedir. Sabit bir rüzgâr hızı altında da moment değişebilir. Bu duruma örnek olarak Kule-Gölge (Tower-Shadow) etkisi verilebilir (Carbone ve diğerleri, 2002; Lin, 2014). Rüzgâr türbinleri genellikle bir kulenin üzerine inşa edilmiş yapıdadırlar. Sabit hızda esen bir rüzgâra karşı dönen kanatlar kulenin üzerinden geçerken, maruz kaldıkları rüzgâr hızında bir azalma olacaktır. Kule-Gölge etkisi olarak bilinen bu olgu moment değişimine sebebiyet vereceği için ara-harmonik ve harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır (Das, Karnik ve Santoso, 2011).

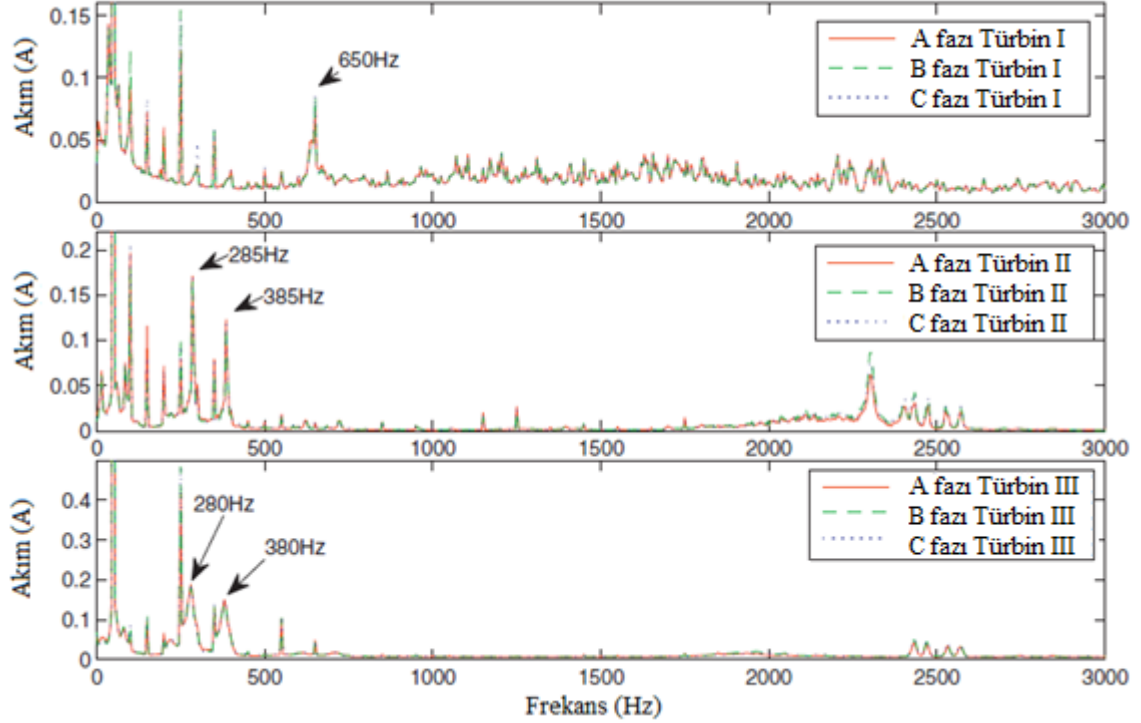
Şekil 2.7’de üç farklı rüzgâr türbininden sekiz ila on üç gün aralığındaki ortalamasından elde edilen akım değerlerinin spektrumu verilmektedir. Elde edilen şekil, 5 Hz çözünürlüktedir (Yang ve diğerleri, 2014). Bu şekil içerisindeki harmonik ve ara-harmoniklerin sadece moment değişimlerinden değil aynı zamanda kullanılan dönüştürücü tipinden de kaynaklandığı göz önüne alınmalıdır.

2.2.6. Güneş pili hücreleri

Güneş pili hücreleri, güneş ışınları ile gelen fotonları yarı iletken bir aygıtın üzerine düşürerek bu aygıttan elektron koparmasını sağlar ve açığa çıkan elektron yarı iletkendeki deliklere doğru hareket ederek elektrik akımı meydana getirir.

Güneş pili hücrelerinin maksimum verim ile çalışabilmesi için literatürde MPPT algoritması önerilmiştir. Bu algoritma ara-harmonik kaynaklarından birisidir. Güneş panellerinde MPPT algoritmasının ürettiği ara-harmonikler Denklem (2.9), (2.10), (2.11) ve (2.12) ile modellenmektedirler. Bu eşitliklerde, n harmonik derecesi, A_n genliği, φ_n harmonik fazı, V_{step} adım gerilimi, f_{MPPT} MPPT frekansı ve f_g şebeke frekansdır.

MPPT frekansının artması, harmoniklerin daha geniş bir spektruma yayılmasına neden olmaktadır ve adım geriliminin artması, ara-harmoniklerin genliğini arttırmaktadır.



Şekil 2.7. Üç farklı rüzgâr türbininden sekiz ila on üç gün aralığındaki akım ortalama değerleri ((Yang ve diğerleri, 2014)'den değiştirilerek alınmıştır)

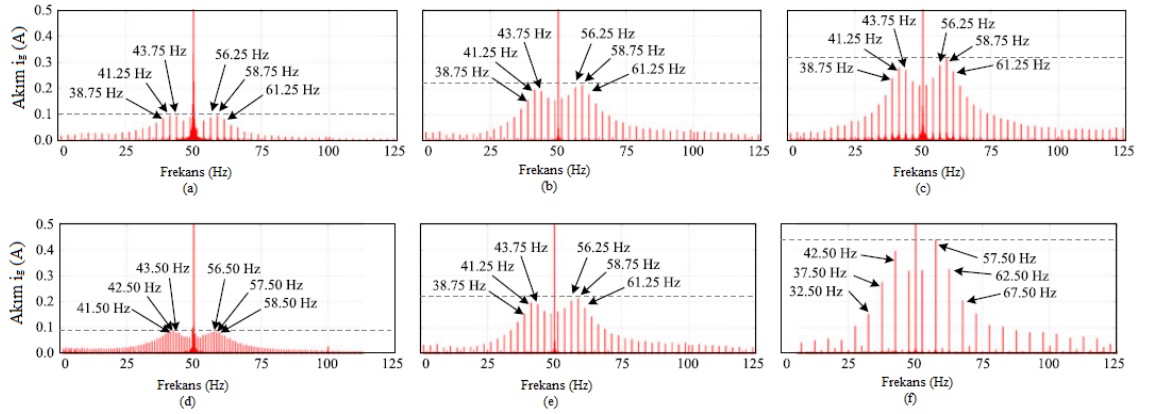
Bu modele göre çalışan ve gerçek değerlerle doğrulanmış PV sistemin % 10 güçte çalışırken şebekeye yaydığı ara-harmonik akım bileşenleri Şekil 2.8'de görülmektedir. İlk üç şekil için MPPT frekansı 5 Hz'dir ve son üç şekil için adım genliği 12 V'dur. İlk üç şekilde adım genliğinin ara-harmoniklere etkisi gözlemlenmiş, son üç şekilde ise MPPT frekansının ara-harmonikler üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu belirtilmiştir.

$$i_g(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{2} [\cos(2\pi t(f_g - f_n) + \varphi_n) - \cos(2\pi t(f_g + f_n) + \varphi_n)] \quad (2.9)$$

$$a_n = \frac{2V_{step}}{\pi n} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right), b_n = \frac{V_{step}}{\pi n} \cos(\pi(n-1)) \quad (2.10)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (2.11)$$

$$f_n = \frac{(2n - 1)f_{MPPT}}{4} \quad (2.12)$$



Şekil 2.8. MPPT algoritması ile ve yüzde on güç ile çalışan PV sistemin şebekeye yaydığı ara-harmonikler (a) Adım gerilimi 6 V (b) Adım gerilimi 12 V (c) Adım gerilimi 18 V (d) MPPT frekansı 2 Hz (e) MPPT frekansı 5 Hz (f) MPPT frekansı 10 Hz ((Sangwongwanich ve diğerleri, 2018)'den değiştirilerek alınmıştır)

2.2.7. Diğer kaynaklar

Ara-harmonik kaynaklarından bir diğeri, şebeke içerisinde modülasyon yapan devre elemanlarının bulunmasıdır. Bu elemanlar genellikle devreleri sürmek için veya kontrol etmek için kullanılırlar ve belirli frekanslarda anahtarlama yaparlar. Bunun sonucunda, sistemde meydana gelen ufak salınımlar, anahtarlama frekansının yan bantlarında yüksek dereceli harmonikler üretirler. Oluşan bu harmonikler şebeke frekansı veya katlarının anahtarlama frekansının toplamı veya farkı şeklinde ortaya çıkarlar. Ortaya çıkan bu frekanslar genellikle ana frekansın tam sayı olmayan katlarında bulunur dolayısıyla ara-harmonik olarak değerlendirilirler (Marz, 2016).

Ara-harmoniklerin oluşumunda, anahtarlama frekansının sabit olmadığı durumlarda da gözlenmektedir. Bu durumlar çoğunlukla kontrol sistemlerinde ortaya çıkmaktadırlar ve ortaya çıkan ara-harmoniklerin modellenmesi kontrol yönteminin matematiksel modeline bağlıdır.

Anahtarlama frekansının sabit olduğu durum için örnek olarak, doğrultucu çıkışına bağlanan evirici devreleri gösterilebilir. Doğrultucu çıkışlarında, girişlerindeki sinüzoidal işaretin frekansına bağlı olarak az da olsa salınımlar meydana gelir. İnvörtör devresi bu salınımları anahtarlama frekansı ile birleştirerek çıkışa yüksek dereceli frekans bileşenleri olarak çıkış katına aktarırlar.

2.3. Ara-harmonik Etkileri

Ara-harmonik frekans bileşenleri sistemin temel frekansından büyük olduğunda, harmonik bileşenlerde olduğu gibi ısınma etkisi gözlemlenir. Isınma etkisine ek olarak, ara-harmoniklerin güç sistemlerine daha farklı etkileri de tespit edilmiştir. Bunlar arasında, Katot Işın Tüpü (CRT) titremesi, jeneratörlerde ortaya çıkan burulma salınımları (torsional oscillations), ayarlı seri filtrelerin aşırı yüklenmesi, çıkış filtrelerinin aşırı yüklenmesi, elektromanyetik girişim ve akım trafosu satürasyonu (CT saturation) olguları yer almaktadır (Gunther, 2001; Lin, 2014).

Ara-harmoniklerin en önemli etkilerinden birisi ışık titremesi (light flicker) olgusudur. Kalıcı durum ara-harmonik bileşenin temel frekans üzerindeki modülasyonu, sistem geriliminin genlik ve etkin (RMS) değerinde değişimlere sebep olmaktadır. Sistem gerilimi

$$v(t) = \sin(2\pi f_1 t) + a \sin(2\pi f_i t) \quad (2.13)$$

denklemleriyle verildiğinde f_1 güç sisteminin frekansı, f_i ara-harmonik frekansı ve a ara-harmoniklerin genliğidir (Gunther, 2001).

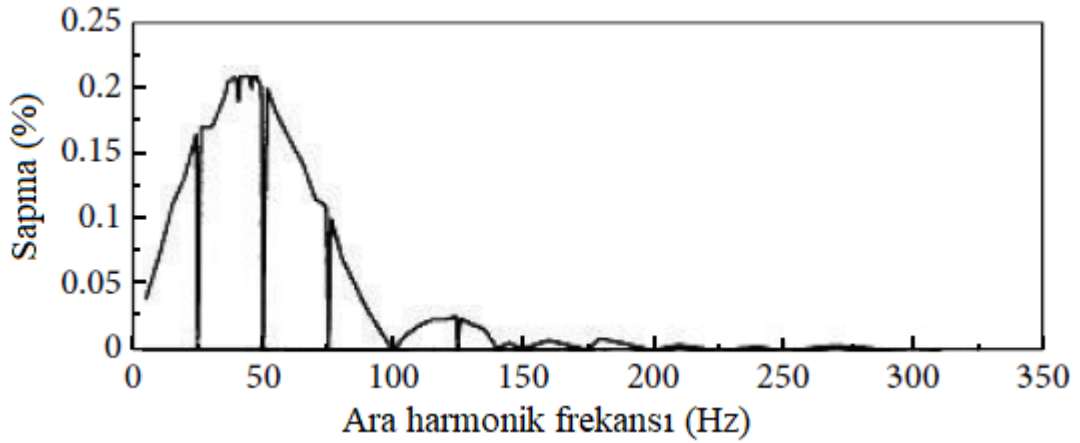
RMS gerilim değerinin azami değişimi ara-harmonik bileşenin gerilim ve frekansına bağlıyken, sistem geriliminin genliğinin azami değişimi, doğrudan ara-harmonik genliğine eşittir.

RMS gerilim değeri;

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2.14)$$

dir. Denklem (2.14) için $T = 1/f_1$ olarak tanımlanır ve periyoda karşılık gelmektedir.

Ara-harmonik değerinin temel gerilim bileşeninden %0.2 oranında değiştiği varsayılınsın. Denklem (2.13) ve Denklem (2.14)'e göre Şekil 2.9'a ulaşılır. Şekil 2.9'dan temel frekans bileşeninin iki katından daha yüksek frekanslarda ara-harmonik etkisinin ihmal edilebilir olduğu, fakat daha düşük frekanslarda bu ara-harmonik etkinin göz ardı edilemeyecek büyüklükte olduğu sonucuna varılabilir (Gunther, 2001).



Şekil 2.9. 50 Hz'lik güç sistemi için gerilimin etkin değerinin %0.2 oranında bozulması ((Gunther, 2001)'den değiştirilerek alınmıştır.)

Ara-harmoniklerin diğer bir önemli etkisi güç hattı iletişimi üzerinedir. Güç hattı iletişimi; sistem koruma bilgisini iletmek, belirli yük veya reaktif kaynakları kontrol etmek, elektrik güç tüketicisinin (müşterinin) akıllı ölçüm aletleriyle (akıllı sayaç) iki yönlü iletişim kurmak vb. amacıyla haberleşme cihazları tarafından kullanılan bir telekomünikasyon olgusudur. Bu sistemlerin tümü, iletişim kurmak için temel frekansın dalga biçimine eklenen ve periyodik olmayan işaretleri kullanmaktadır. Koruma bilgisi genellikle bir bölgeden diğer bir bölgeye 100 Hz'ler mertebesindeki frekanslar kullanılarak iletilir ve yüksek frekans durdurucuları (high-frequency stopper, line trap, wave trap) kullanılarak bu işaretlerin sistemin daha geniş bölgelerine iletilmesi önlenir. Dalgalanma kontrol işaretleri olarak da isimlendirilen yük ya da reaktif kaynak kontrol işaretleri, genellikle 100 Hz ile 3 kHz aralığında bulunur ve sistemin daha geniş bölgelerini etkiler. Ancak, çoğunlukla düşük genlikli, kısa süreli ve daha az sıklıkla karşılaşılan dalga biçimleridir. Koruma ve yük kontrol işaretlerinin her biri çoğunlukla basit komutları temsil eden minimum sayıda işarettten (aç, kapa, hata, bloke et,) oluşur.

100 *kHz* mertebesinden daha yüksek işaretler, ticari amaçlı uygulamalar içerisinde daha düşük alanlarda kullanılabilirler (Marz, 2016).

Güç hattı iletişimi ile ilgili verilen bu bilgiler ışığında, ara-harmoniklerin güç sistemini nasıl etkileyeceği yorumlanabilir. Koruma ve kontrol işaretleri 100 *Hz* mertebesinde tek bir frekanstan oluşur. Bu nedenle genellikle ara-harmonikler ile örtüşmezler dolayısıyla etkilenmezler. İki yönlü iletişim işaretleri ise birden çok frekans barındırır. Bu işaretler doğaları gereği ara-harmoniklerden önemli derecede etkilenirler. Güç hattı iletim bilgileri, temel frekans 50 *Hz* veya 60 *Hz* ve harmonikleri çıkarıldığında elde edilebilir (Marz, 2016). Ara-harmoniklerin tahmin edilmesi ve dolayısıyla filtrelenmeleri zor olduğu için güç hattı iletişimini bozmaktadırlar. Güç hattı iletim işaretlerinin genlikleri, güç işaretinin genliğinden oldukça küçük oldukları göz önüne alındığında, ara-harmoniklerin belirtilen frekans aralıklarında seyrek olarak görülmeleri durumunda bile önemli hatalara neden olabilecekleri açıktır. Güç sistemlerinde, akıllı şebekelere geçmek için büyük yatırımların yapıldığı çağımızda, ara-harmoniklerin tespit edilmesi ve hafifletilmesinin ne kadar önemli olduğu, yapılan değerlendirmeler sonucunda ortaya çıkmaktadır.

2.4. Ara-harmoniklerin Modellenmesi

Bu bölümde, ara-harmonikleri modellemek için yaygın olarak kullanılan iki yöntem açıklanacaktır. Bu yöntemlerden birincisi klasik bir yöntem olan DFT yöntemidir. İncelenen diğer bir yöntem ise IEC tarafından belirlenen harmonik gruplandırma metodudur.

2.4.1. DFT yöntemi

Fourier teorisine göre, tekrar eden ve Dirichlet koşullarını sağlayan bütün dalga biçiminin açılımları, farklı frekanslarda ve farklı genliklerdeki sinüs dalgalarının toplamı şeklinde ifade edilebilir. Dirichlet koşulları; incelenen fonksiyonun bir periyod boyunca integralinin alınabilir olması, verilen herhangi bir aralık için fonksiyonun sınırlı sayıda minimum ve maksimum noktalarının bulunması, sınırlı sayıda süreksizliğinin bulunması ve bu süreksizlerin hiçbir zaman sonsuz tane olmaması, sınırlı olması olarak verilir (Arsac, 1961; Brigham, 1973).

Harmonikler, temel frekans haricindeki sinüzoidal bileşenler olarak tanımlanırlar. Harmoniklerin frekansları, esas frekansın tam sayı katlarında yer alır. Denklemlerle (2.15) zaman boyutunda bozulmuş bir dalga şeklini temsil etmek üzere, Denklem (2.16) bu dalga şeklinin Fourier dönüşümünü verir (H.-C. Lin 2014).

$$i_s(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} I_s(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \quad (2.15)$$

$$I_s(k\omega_0) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2.16)$$

Denklem (2.16) için $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f$ ifadesi ana açısal frekans ve $I_s(k\omega_0)$ ifadesi k katsayıyı ifade eder.

$i_s(t)$ ayrık zamanlı bir işaret olarak $i_s[n]$ ile gösterilebilir. AFD ifadesi ile Denklem (2.17) ile yazılabilir (Lin, 2014).

$$I_s[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_s[n] W_N^{kn} \quad (2.17)$$

Denklem (2.17) için $I_s[k]$ ifadesi, $f_k = k/T$ frekansındaki $i_s[n]$ 'nin büyüklüğüdür. $W_N = e^{j2\pi/N}$ dir.

AFD'nin tersi alınarak, orijinal işaret Denklem (2.18) ile elde edilebilir.

$$i_s[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} I_s[k] W_N^{-kn} \quad (2.18)$$

$i_s[n]$ 'nin periyodik olduğu ve T periyoduna sahip olduğu varsayılırsa, Fourier temel açısal frekans ifadesi ($\Delta\omega$) Denklem (2.19) ile tanımlanabilir.

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.19)$$

$p > 1$ olmak üzere, örnekleme uzunluğu p periyot olarak seçilirse, $\Delta\omega$, Denklem (2.20)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{pT} = \frac{\omega_0}{p} \quad (2.20)$$

Böylece, Fourier temel frekansı Δf Denklem (2.21) ile verilir.

$$\Delta f = \frac{1}{pT} = \frac{1}{pN_s T_s} = \frac{1}{NT_s} = \frac{f_s}{N} \quad (2.21)$$

Denklem (2.21)'de $N_s := N/p$ ve $T_s := 1/f_s$ olarak tanımlanır.

2.4.2. IEC gruplama yöntemi

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission-IEC) Standardı, “gruplandırma” kavramı olarak isimlendirilen ara-harmonik ölçüm yöntemini önermiştir (Hanzelka ve Bien, 2004b). Bu yöntemin prensibi, Şekil 2.10 ile açıklanmaktadır. Fourier analizine dayandırılan bu yöntemde, örnekleme penceresi 50 Hz sistem için 10 periyot, 60 Hz sistem için ise 12 periyot olarak seçilmektedir (Lin, 2014).

Harmonik/ara-harmonik gruplandırma kavramı, aşağıda verilen eşitlikler ile tanımlanmaktadır (Hanzelka ve Bien, 2004b).

- a. Bir Harmonik Grubunun RMS Değeri: Gözlem penceresi içinde, bir harmoniğin ve ona bitişik spektral bileşenlerin genlik karelerinin toplamının kareköküdür. Harmonik ve komşu spektral bileşenlerin enerji içeriğinin toplamı Denklem (2.22) ile verilir:

$$G_{g,n+1}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} \sum_{k=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad (2.22)$$

- b. Harmonik Alt Grubunun RMS Değeri: Bir harmoniğin ve hemen yanındaki iki spektral bileşenin genlik karelerinin toplamının kareköküdür. DFT'nin çıkış bileşenlerinin alt grubu, bir dizilimdeki komşu harmoniklerin frekans bileşenlerinin enerji içeriğinin toplamıdır. Bu durum, Denklem (2.23) ve (2.24)'le verilmektedir.

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{k=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (2.23)$$

$$G_{sg,n+2}^2 = \sum_{k=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (2.24)$$

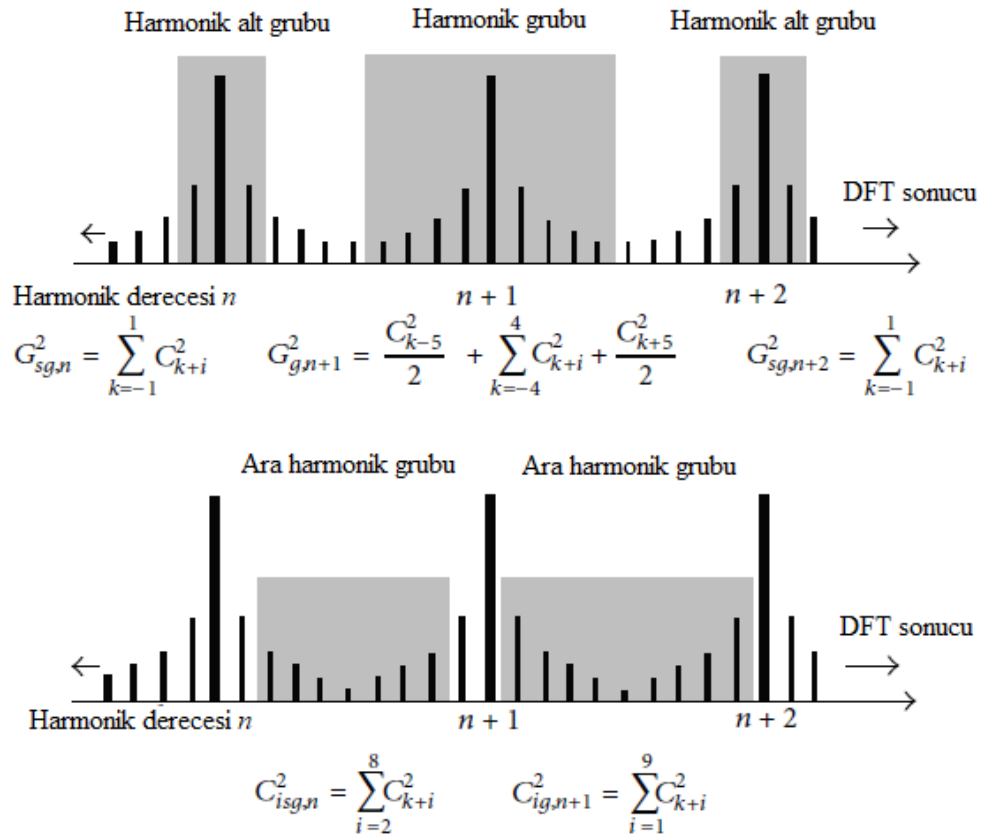
- c. Bir ara-harmonik grubun RMS değeri: Ardışık iki harmonik bileşen arasında yer alan tüm ara-harmoniklerin, genlik karelerinin toplamının kareköküdür, Denklem (2.25) ile verilmektedir.

$$C_{ig,n+1}^9 = \sum_{i=1}^9 C_{k+i}^2 \quad (2.25)$$

- d. Ara-harmonik merkezli alt grubun RMS değeri: Harmonik frekanslara doğrudan komşu olan frekans bileşenlerinin haricinde, iki ardışık harmonik bileşenin arasında yer alan ara-harmoniklerin genliklerinin karelerinin RMS değeridir. Denklem (2.26) ile verilmektedir.

$$C_{ig,n}^9 = \sum_{i=2}^8 C_{k+i}^2 \quad (2.26)$$

Spektral sızıntı etkisini azaltmasından ve aynı zamanda ara-harmonik seviyelerini ortaya çıkarabilmesinden dolayı, IEC yönteminin harmonikleri ölçmek için pratik bir araç olduğu bilinmektedir. Bu yöntemin uygulanmasında, yalnızca kısa örnekleme süresine (200 ms, $\Delta f = 5$ Hz) gereksinim duyulması, yöntemin diğer bir üstünlüğüdür. Buna rağmen belirtilen yöntemin iki sınırlaması vardır. (1) Spektral sızıntı yine de mevcuttur. (2) Her bir bileşenin frekans ve genlik olarak tanımlanması bu yöntem ile mümkün değildir. Bu yüzden sistem tanımlama konusunda uygun bir yöntem değildir.



Şekil 2.10. Harmonik grup, alt grup ve ara-harmonik grup kavramları (Lin, 2014)'den değiştirilerek alınmıştır)

2.5. Frekans Kestirim Yöntemleri

Bu bölümde, dokuz farklı frekans kestirim yöntemi incelenmiştir. İlk olarak Fourier analizi ve Prony yöntemi ile sırasıyla zaman dönüşümlü ve parametrik yöntemlerin en yaygın kullanılan örneklerine yer verilmiştir. Ardından, MLE kavramı açıklanmış ve

EKY yönteminin sinüzoidal fonksiyonlara göre çözümlenmesi konusu tartışılmıştır. Sonraki aşamada, YSA ve Prony yönteminin birleştirilmesiyle elde edilen ADALINE yöntemi, hibrit metotların işleyişini tanıtmak amacıyla sunulmuştur. Daha sonra, öz-değer ayrıştırma yöntemlerinden bahsedilmiş, dayandığı teknikler matris işlemleri ile açıklanmıştır. Bu yöntemler; MUSIC, Pisarenko, ESPRIT ve Matrix Pencil algoritmalarıdır. İlgili tekniklerden Prony, MUSIC ve ESPRIT yöntemlerine dayanan ve bu tezde önerilen algoritmalara, tezin üçüncü bölümünde yer verilmiş ve orijinal biçimleri ile karşılaştırmalı analizleri dördüncü bölümde gerçekleştirilmiştir.

2.5.1. Fourier analizi

Fourier analizi, belli şartlar altında, bütün işaretlerin sonsuz sayıda sinüzoidal toplamlar biçiminde ifade edilebileceğini matematiksel olarak betimleyen ve işaretin frekans boyutunda ayrıştırılmasına imkân veren bir yöntemdir. Fourier analizinin ilk aşaması, Fourier serilerinin ortaya konulması ile başlar. Bu bağlamda, T periyodunda bir işaretin Fourier seri açılımı Denklem (2.27)'de verilmektedir. Denklem içerisindeki katsayıların hesaplanması, Denklem (2.28)-(2.30) ile ifade edilmiştir (Oppenheim ve diğerleri, 1997).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) \right) \quad (2.27)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.28)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) dt \quad (2.29)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) dt \quad (2.30)$$

(2.27) Denklemine dikkat edildiğinde, periyodik bir işaretin $n=1$ için temel frekansa sahip olduğu ve işaretin içerisindeki diğer harmonik bileşenlerin bu temel frekansın tamsayı katlarında bulunduğu görülmektedir (Oppenheim ve diğerleri, 1997).

Fourier serilerinin kompakt formu da matematiksel olarak yazılabilir. Bu gösterim (2.31) Denklemine verilmektedir (Oppenheim ve diğerleri, 1997).

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) + \theta_n \right) \quad (2.31)$$

Denklemde, A_0 doğru akım bileşenini, A_n genlik ve θ_n faz bilgisini ifade etmektedir. Bu ifadelerin matematiksel eşitlikleri Denklem (2.32)-(2.34) ile verilmektedir.

$$A_0 = a_0 \quad (2.32)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.33)$$

$$\theta_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (2.34)$$

Periyodik işaretleri inceleyen Fourier serilerinin bir adım ilerisi, periyodik olmayan işaretlerin incelenebilmesini sağlayan matematiksel yöntemlerin ortaya konulmasıdır. Bu konuda, Fourier'in ortaya koyduğu bakış açısından yararlanılabilir. Bu bakış açısına göre periyodik olmayan bütün işaretlerin, sonsuz periyoda sahip olduğu (kendisini sonsuz bir zaman sonra tekrar eden bir yapıda olduğu) varsayılmaktadır. Böylelikle, periyodik olmayan işaretler de harmonik bileşenlerine ayrılabilir (Oppenheim ve diğerleri, 1997).

Bu bilgilerden hareketle, bir işaretin FD'si Denklem (2.35) ile verilir. Bu denklemde açısal frekans $\omega = 2\pi f$ olarak tanımlıdır.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.35)$$

FD sonucunda elde edilen $F(\omega)$ fonksiyonu ΔT zaman aralıklarıyla N adet örneklenirse, AFD ifadesine ulaşılır. AFD'nin matematiksel ifadesi Denklem (2.36) ile verilmiştir (Oppenheim, ve diğerleri, 1997).

$$F[k\omega] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n\Delta T]e^{-jkn\omega\Delta T} \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.36)$$

Denklem (2.36) düzenlenirse, Denklem (2.37)'ye ulaşılır. Burada faz faktörü $W = e^{-j2\pi/N}$ olarak tanımlanmıştır.

$$F[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[n]W^{kn} \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.37)$$

Denklem (2.37)'nin açılımındaki birçok değer, birbirinin eşleniği olduğu görülür. Bu simetri, AFD'nin daha hızlı çözülebilmesi amacıyla kullanılabilir. Bu simetriyi kullanan HFD algoritması literatüre kazandırılmıştır (Cooley ve Tukey, 1965).

2.5.2. Prony analizi

Prony analizi, Fourier analizinin genişletilmiş bir hali olarak yorumlanabilir. İncelenen işaretin frekans, genlik faz ve sönüm katsayısı bileşenlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu analizin sönüm katsayısı bileşenini de hesaplayabilmesi, ara-harmonikleri bulabilme konusunda doğal olarak bir üstünlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Prony analizinde işaret Denklem (2.38)'deki gibi ifade edilir (Hauer ve diğerleri, 1990; Xiong ve diğerleri, 2010; Prony, 1795).

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2.38)$$

Denklem (2.38)'de; $\hat{y}(t)$, $y(t)$ işaretinin yaklaşımını, f frekansı, σ sönüm katsayısını ve φ faz açısını ifade etmektedir. Eğer, $\cos(2\pi f_i t + \varphi_i) = 0.5(e^{j(2\pi f_i t + \varphi_i)} + e^{-j(2\pi f_i t + \varphi_i)})$ ifadesi Denklem (2.38)'e uygulanırsa, Denklem (2.39) yazılabilir.

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} (B_i e^{\lambda_i t}) \quad (2.39)$$

Denklem (2.39)'da, $B_i = 0.5A_i e^{\pm j\varphi_i}$ karmaşık genlik katsayılarını ve $\lambda_i = \sigma_i \pm j2\pi f_i$ özdeğerleri ifade etmektedir. $y(t)$ işareti, $y(t_k)$ ayrık değerlerinden oluşmaktadır ve t_k ifadesi eşit olarak bölünmüş zaman vektörünün bir elemanıdır ($k = 0, 1, \dots, N - 1$). Prony analizinin adımları aşağıda özetlenmiştir (Hauer ve diğerleri, 1990).

- Adım 1: Lineer Tahmin Modelini (Linear Prediction Model (LPM)) elde edilen $y(t_k)$ değerleri ile kur.
- Adım 2: Oluşturulan LPM yapısından karakteristik polinomu bul.
- Adım 3: Adım 2'de bulunan kökleri kullanarak sönüm katsayısı, frekans, genlik ve faz bileşenlerini hesapla.

Eğer örnekleme zaman aralığı t_k olarak alınır, Denklem (2.39), Denklem (2.40) olarak ifade edilebilir.

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{\infty} B_i z_i^k, \quad z_i = e^{\lambda_i t_k} \quad (2.40)$$

Yukarıdaki denklemler kurulduktan sonra, $y(k) = \hat{y}(k)$ eşitliğini sağlayan B_i ve z_i değerleri bulunmalıdır ($k = 0, 1, \dots, N - 1$). Bunu gerçekleştirmek için Denklem (2.40)'da her bir t_k göz önüne alınarak Denklem (2.41) yazılabilir (Hauer ve diğerleri, 1990).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B_1 z_1^0 + \dots + B_n z_n^0 \\ \vdots \\ B_1 z_1^{N-1} + \dots + B_n z_n^{N-1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_1^0 & \dots & z_n^0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & \dots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} y(0) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Denklem (2.41), matris formunda Denklem (2.42) ile gösterilebilir.

$$\mathbf{ZB} = \mathbf{Y} \quad (2.42)$$

Bütün z_i değerleri bulunursa, λ_i değerleri Denklem (2.40)'dan bulunabilir. Bu bakış açısıyla z_i değerleri, n dereceden ve a_i katsayılı bir polinomun kökleri olmak zorundadır. Böylece Denklem (2.43) yazılabilir.

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n z^0) = 0 \quad (2.43)$$

Denklem (2.43)'e bağlı olarak Denklem (2.44) ile ifade edilen $N \times 1$ vektör kurulabilir.

$$\bar{\mathbf{A}} = [-a_n \quad \dots \quad -a_1 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] = [-\mathbf{a} \quad \mathbf{1} \quad \mathbf{0}] \quad (2.44)$$

Denklem (2.44)'ün, Denklem (2.41)'de yerine yazılması sonucunda Denklem (2.45) elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{A}}\mathbf{Y} &= y(n) - [a_1 y(n-1) + \dots + a_n y(0)] = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{ZB} \\ &= B_1 [z_1^n - (a_1 z_1^{n-1} + a_2 z_1^{n-2} + \dots + a_n z_1^0) + \dots] = 0 \end{aligned} \quad (2.45)$$

Denklem (2.45)'teki son adım Denklem (2.43)'ün her bir z_i değerine uygulanması sonucunda yazılır. Denklem (2.45)'in, Denklem (2.43)'ün genişletilmiş bir hali olduğu görülmektedir (Hauer ve diğerleri, 1990). Eğer başlangıç zamanı keyfi olarak seçilirse, Denklem (2.45), Denklem (2.46) olarak yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} y(n-1) & \cdots & y(0) \\ \vdots & & \vdots \\ y(N-2) & \cdots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n+0) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Denklem (2.46)'nın çözümü Denklem (2.43)'deki polinom katsayılarını verir. Katsayıları belirlenen polinomun köklerinin elde edilmesiyle, Denklem (2.40)'daki λ_i özdeğerleri bulunabilir. Bu işlemler Prony analizinin birinci ve ikinci adımlarını oluşturmaktadır. Prony metodunun son adımı ise Denklem (2.41)'deki karmaşık genlik katsayıları olan B_i 'lerin bulunmasıdır (Hauer ve diğerleri, 1990).

2.5.3. Maksimum olabilirlik yöntemi

MLE'nin tanımını yapabilmek için regresyon tanımını açıklamak faydalı bir başlangıç olacaktır. Bu bağlamda, sonraki bölümde de daha ayrıntılı olarak açıklanan EKY yaklaşımı, $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ gözlem çiftlerine uyan doğrusal bir denklem uydurmak olarak tanımlanabilir. Doğrusal denklemin matematiksel ifadesi Denklem (2.47) ile verilir (Chapra, 2014a).

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (2.47)$$

Yukarıdaki denklemde, a_0 ve a_1 sırasıyla kesme noktasını ve eğimi temsil eder. e ise hata veya rezidü olarak isimlendirilir. Denklem (2.47) yeniden düzenlenerek Denklem (2.48) ile ifade edilebilir (Chapra, 2014a).

$$e = y - a_0 - a_1x \quad (2.48)$$

Böylelikle hata, y 'nin gerçek değerleri ve $a_0 + a_1x$ ifadesinin yakınsadığı değerler arasındaki farkı ifade eder.

Yakınsayan en iyi doğruyu bulma stratejilerinden birisi, mevcut olan tüm veriler için hataların toplamını Denklem (2.49)'daki gibi yazarak minimize etmektir (Chapra, 2014a).

$$S_r' = \sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) \quad (2.49)$$

Denklem (2.49)'da, n toplam veri sayısıdır. Ancak, bu verimli bir kriter değildir çünkü, hatanın minimize edilmesi için yazılan kısmi türevler sonucunda $a_1 = 1$ ve $a_0 = c, c \in R$ olduğu görülür. Bu durumda, Denklem (2.49) ile sonsuz farklı lineer doğru elde edileceği sonucuna ulaşılır. Bu da iyi bir yakınsamanın gerçekleştirilemeyeceği anlamına gelir (Chapra, 2014a).

Denklem (2.49) ifadesinden farklı olarak birçok kestirici eşitliği yazılabilir, fakat en iyi kestiriciyi bulmak MLE'yi bulmak ile eşdeğerdir.

Denklem (2.50) ile verilen kestirici tanımlansın. Bu kestiricinin bir önceki kestiriciye göre daha iyi bir performans göstereceği, karesel hatanın dikkate alınması sonucunda tek bir doğru denklemine yakınsamanın sağlanması sebebiyle açıktır. Bu durumda, a_0 ve a_1 değerleri, hatanın minimum olması için kısmi türevler sıfıra eşitlenerek Denklem (2.51) ve (2.52) ile hesaplanabilir (Chapra, 2014a).

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) = 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a_0 - a_1 x_i) = 0 \quad (2.52)$$

Denklem (2.53) ve (2.54), a_0 ve a_1 ifadelerini verir.

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.53)$$

$$a_0 = \frac{1}{n} \left(\sum y_i - a_1 \sum x_i \right) \quad (2.54)$$

Eğer $\bar{y} = a_0 + a_1 x$ ifadesinin ortalama değeri verdiği kabul edilirse, Denklem (2.50) ile verilen ifadenin, doğrudan varyans ile ilişkili olduğu görülür. Bir başka deyişle Denklem (2.50), $n - 1$ ile bölünürse varyans elde edilir. Bu ifadenin minimum değerinin elde edilmesi, ortalamadan minimum sapma anlamına gelmektedir. Böylece, Denklem (2.51) ve (2.52)'deki gibi polinom katsayılarına göre kısmi türev alınarak sifıra eşitlenmesi ile yapılan çözüm sonucu elde edilen Denklem (2.53) ve (2.54) ile maksimum olabilirlik kestirimi gerçekleştirilmiş olur (Fisher, 1922; Draper, 1998; Chapra, 2014a).

2.5.4. En küçük kareler yöntemi

EKY yöntemi, regresyon analizinde baskın bir rol üstlenmektedir. Bu yöntem, işaret frekanslarının önceden bilindiği durumlarda genlik ve faz kestirimi yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. EKY yöntemi, işaretin genlik ve faz parametrelerinin tahmini açısından ele alındığı için klasik polinom kullanılarak eğri uydurma yöntemine ait türetilen formüllerden farklılık göstermektedir. Başka bir deyişle, karesel fark ile ifade edilen maliyet fonksiyonu genel olarak n . dereceden polinomdan değil, sinüzoidal fonksiyonlardan oluşmaktadır ve gradyanı da benzer terimleri içermektedir. Bu bağlamda aşağıdaki eşitlikler ele alınabilir (Li, 2014a).

İlk olarak, incelenen işaretin sadece tek bir frekanstan oluştuğu varsayalım. Bu bağlamda işaret modeli Denklem (2.55) ile verilsin (Chapra, 2014b).

$$y = A_0 + A_1 \cos \omega_0 t + B_1 \sin \omega_0 t + e \quad (2.55)$$

Bu eşitlikten yola çıkılarak EKY eşitliği Denklem (2.56)'da verilmiştir ve minimize edilmesi gerekmektedir.

$$S_r = \sum_{i=1}^N \{y_i - [A_0 + A_1 \cos \omega_0 t_i + B_1 \sin \omega_0 t_i]\}^2 \quad (2.56)$$

Denklem (2.56)'da, A_0 , A_1 ve B_1 ifadelerine göre kısmi türevler alınırsa, Denklem (2.57) elde edilir. Bu eşitliğin sağlanması durumunda, EKY algoritmasına göre genlik ve faz kestirimi yapılabilir. Denklem (2.55) ve (2.56)'da, y işaret değerlerini, t zaman değerlerini, A_0 DA bileşen değerini, A_1 ve B_1 sinüsoidal fonksiyonların genlik katsayılarını, ω_0 açısal frekansı, e hata değerini ve N veri sayısını oluşturmaktadır (Chapra, 2014b).

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} N & \sum \cos(\omega_0 t) & \sum \sin(\omega_0 t) \\ \sum \cos(\omega_0 t) & \sum \cos^2(\omega_0 t) & \sum \cos(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t) \\ \sum \sin(\omega_0 t) & \sum \cos(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t) & \sum \sin^2(\omega_0 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum y \cos(\omega_0 t) \\ \sum y \sin(\omega_0 t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Bilinmeyen katsayıların çözümü, Denklem (2.57) ile elde edilebilir. Ancak bu eşitliğin çözümü yerine, N gözlem verisinin Δt eşit aralıklarla toplandığı ve toplam uzunluğun $T = (N - 1)\Delta t$ olduğu özel durum incelenirse, Denklem (2.58)-(2.62) ile verilen eşitliklerin geçerli olduğu görülür (Chapra, 2014b).

$$\frac{\sum \sin(\omega_0 t)}{N} = 0 \quad (2.58)$$

$$\frac{\sum \cos(\omega_0 t)}{N} = 0 \quad (2.59)$$

$$\frac{\sum \sin^2(\omega_0 t)}{N} = \frac{1}{2} \quad (2.60)$$

$$\frac{\sum \cos^2(\omega_0 t)}{N} = \frac{1}{2} \quad (2.61)$$

$$\frac{\sum \cos(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t)}{N} = 0 \quad (2.62)$$

İlgili eşitliklerden yola çıkılarak Denklem (2.63)-(2.65) ile ilgili parametreler kolayca hesaplanabilir.

$$A_0 = \frac{\sum y}{N} \quad (2.63)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum y \cos(\omega_0 t) \quad (2.64)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum y \sin(\omega_0 t) \quad (2.65)$$

Denklem (2.57)'e benzer olarak, Denklem (2.66)'deki ifadeye karşılık gelen EKY amaç fonksiyonu Denklem (2.67) ile yazılır ve bu amaç fonksiyonunun genlik katsayılarına göre kısmı türevleri alınarak genel çözüm elde edilebilir. Bir önceki durum için geçerli olan şartlarda, genlik katsayılarının ve dolayısıyla fazların hesaplanması Denklem (2.68)-(2.70) ile verilir (Chapra, 2014b).

$$y = A_0 + A_1 \cos \omega_0 t + B_1 \sin \omega_0 t + \dots + A_n \cos n\omega_0 t + B_n \sin n\omega_0 t + e \quad (2.66)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^N \{y_i - [A_0 + A_1 \cos \omega_0 t_i + B_1 \sin \omega_0 t_i + \dots + A_n \cos n\omega_0 t_i + B_n \sin n\omega_0 t_i]\}^2 \quad (2.67)$$

$$A_0 = \frac{\sum y}{N} \quad (2.68)$$

$$A_j = \frac{2}{N} \sum y \cos(j\omega_0 t), j = 1, 2, \dots, n \quad (2.69)$$

$$B_j = \frac{2}{N} \sum y \sin(j\omega_0 t), j = 1, 2, \dots, n \quad (2.70)$$

Denklem (2.68)-(2.70)'in, Denklem (2.28)-(2.30) ile benzer yapıda olduğuna dikkat edilmelidir.

EKY algoritmasının frekans ve hatta ara-harmonikleri tespit edebilme yeteneğinin olduğu da belirtilmelidir. Bunu gerçekleştirmek için Denklem (2.57) eşitliğinin sol tarafındaki birinci matris, sürekli bir frekans aralığında (sayısal uygulamalar için epsilon artırımı ile birlikte) bir frekans bandını tarayacak bir biçimde kurulsun. Bu durumda, Denklem (2.68)-(2.70) için uygulanan sadeleştirmeler gerçekleştirilmeden düzenlenen matris çözümlerse, harmonik ve ara-harmoniklere karşılık gelen genlikler (sinüs ve kosinüs işaretlerinden oluştuğu için dolayısıyla fazlar) tespit edilmiş olunur. Frekans bandında, görece yüksek genlikli frekanslar var kabul edilir ve bu şekilde çözüme ulaşılabilir. Bu durum, pek çok makalede dolaylı olarak gözlemlenebilir (Chang ve diğerleri, 2009; Schmidt, 1986).

2.5.5. ADALINE yöntemi

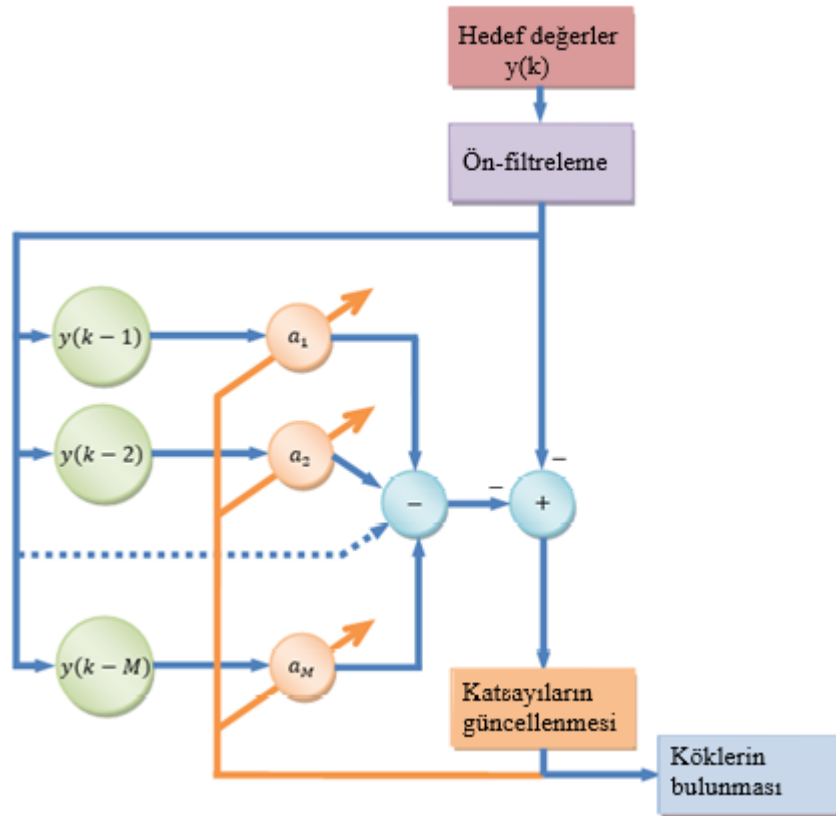
Adaptif Lineer Nöron (ADALINE) özellik çıkarımı, gürültü bastırımı ve çeşitli birçok uygulama alanında kullanılan bir adaptif filtredir (Widrow, 1960). Son yıllarda bu yöntem güç kalite çalışmalarında da sıklıkla kullanılmaktadır. ADALINE algoritması, Denklem (2.46)'yı, Prony polinom katsayılarının bulunması amacıyla stokastik bir tarzda ele alır ve polinom katsayılarından elde ettiği frekans bileşenlerini diğer bir ADALINE sinir ağına, karmaşık genlik katsayılarının belirlenmesi için girdi olarak verir (Chang ve diğerleri, 2009). Birinci YSA, işaretin belli bir andaki değeri ile önceki değerleri arasındaki ilişkiyi öğrenmek üzere eğitilir. Başka bir deyişle, işaretin şimdiki değeri çıkışı ifade etmekten, önceki değerleri girişleri ifade eder ve YSA'nın eğitilmesi sonucunda elde edilen katsayılar, Prony polinom katsayılarını verir. Hesaplanan polinom katsayılarından, frekans bileşenlerine ulaşılır. İkinci YSA tasarımı, genlik ve faz bilgilerine ulaşmaya çalışılır. Frekans bilgileri birinci YSA'dan elde edildiği için ikinci YSA elde edilen frekanslara karşılık gelen faz ve genlik bilgilerini hesaplar. Bunu başarmak amacıyla, girişte frekansları belirli sinüzoidal ifadeler tanımlanır. YSA'nın çıkışı ise işaretin anlık değeri ile beslenir. Bu işlemin sonucunda ikinci YSA'nın

katsayıları ile kompleks genlik katsayıları arasında matematiksel bir ilişki kurulur ve ilgili katsayılar hesaplanır. Bu değerlerin nasıl hesaplandığı, Denklem (2.76) ile verilmektedir. Bu şekilde, iki farklı YSA kullanılarak işaret parametrelerine ulaşılmış olunur. ADALINE ile frekans bulma adımları Şekil 2.11’de, karmaşık genlik katsayılarının bulunması ise Şekil 2.12’de özetlenmiştir.

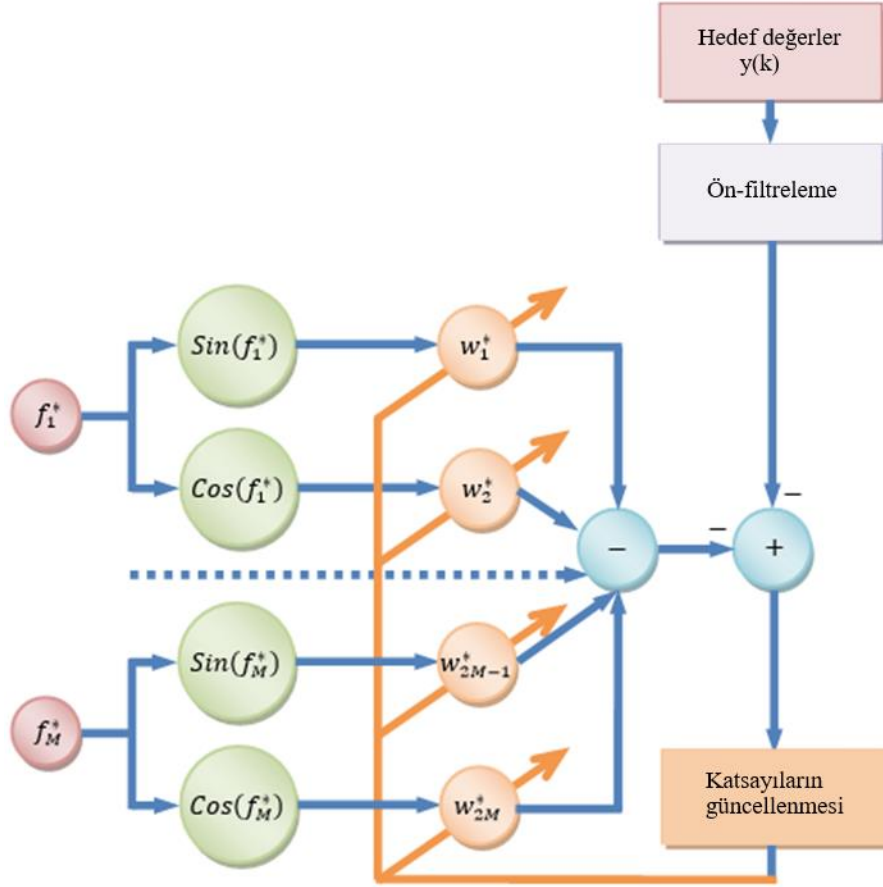
Denklem (2.71), ADALINE algoritması ile tahmin edilen anlık değeri vermektedir.

$$y_f(i) = \sum_{m=1}^k a_m(k)y(i-m) = -\check{\alpha}^T(k)\check{y}(i-1) \quad (2.71)$$

$$\check{\alpha}(k) = \begin{bmatrix} a_1(k) \\ a_2(k) \\ \vdots \\ a_M(k) \end{bmatrix}, \quad \check{y}(i-1) = \begin{bmatrix} y(i-1) \\ y(i-2) \\ \vdots \\ y(i-M) \end{bmatrix}$$



Şekil 2.11. ADALINE frekans kestirim şeması (G.W. Chang ve diğerleri, 2009)’dan değiştirilerek alınmıştır.



Şekil 2.12. ADALINE genlik ve faz kestirim şeması (G.W. Chang ve diğerleri, 2009)'dan değiştirilerek alınmıştır.

Sistem çıkışında meydana gelen hata Denklem (2.72) ile verilir.

$$e_1(i) = y(i) - y_f(i) \quad (2.72)$$

$$O_1(k) = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} e_1^2(i) \quad (2.73)$$

(2.73) Denklemindeki λ ifadesi unutma faktörü (forgetting factor) olarak isimlendirilir ve $0 - 1$ aralığında bir değer alır. Anlık hatanın ağırlıklandırılması amacıyla kullanılır. YSA'nın nöron katsayıları Denklem (2.74) kullanılarak güncellenir. Katsayılardaki

zamana bağılı değişimler Denklem (2.75) ile hesaplanır. Güncelleme katsayıları için Levenberg-Marquardt algoritması kullanılabilir (Levenberger, 1944; Marquardt, 1963).

$$\check{\alpha}(k + 1) = \check{\alpha}(k) + \Delta\check{\alpha}(k) \quad (2.74)$$

$$\Delta\check{\alpha}(k) = \frac{\partial O_1(k)}{\partial \check{\alpha}(k)} = 2 \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} e_1(i) \check{y}(i - 1) \quad (2.75)$$

Frekanslar, $a(k)$ katsayılarından elde edilir. Elde edilen frekanslar, Şekil 2.12 ile şeması verilen YSA'ya girdi olarak verilir. Bu YSA'nın çıkışı Denklem (2.76) ile hesaplanır ve Denklem (2.77)'nin minimize edilmesi amaçlanır. Denklem (2.78), YSA çıkışındaki hatayı ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} y_b(k) &= \sum_{m=1}^M (A_m^* \cos \phi_m^* \sin 2\pi f_m^* k\Delta t \\ &\quad + A_m^* \sin \phi_m^* \cos 2\pi f_m^* k\Delta t) \\ &= \sum_{m=1}^M (w_{2m-1}^* \sin \theta_m^* + w_{2m}^* \cos \theta_m^*) = w^*(k) \cdot x^*(k) \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$w^*(k) = [w_1^* \quad w_2^* \quad \dots \quad w_{2M-1}^* \quad w_{2M}^*]$$

$$w_{2m-1}^* = A_m^* \cos \phi_m^*$$

$$w_{2m}^* = A_m^* \sin \phi_m^*$$

$$x^*(k) = [\sin \theta_1^* \quad \cos \theta_1^* \quad \dots \quad \sin \theta_M^* \quad \cos \theta_M^*]$$

$$O_2(k) = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} e_2^2(i) \quad (2.77)$$

$$e_2(i) = y(i) - y_b(i) \quad (2.78)$$

Denklem (2.79) ve Denklem (2.80), sistemin güncelleme mekanizmasını ifade etmektedir. Bunun yerine Denklem (2.77)'deki Levenberg-Marquardt algoritması da kullanılabilir (Levenberger, 1944, Marquardt, 1963).

$$w^*(k + 1) = w^*(k) - \Delta w(k) \quad (2.79)$$

$$\Delta w(k) = \frac{\partial O_2(k)}{\partial w(k)} = -2 \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} e_2^2(i) \underline{y}(i - 1) \quad (2.80)$$

ADALINE algoritması tarafından Prony polinom katsayılarının tahmin edilmesi için uygulanan adımlar aşağıda özetlenmiştir.

- Rastgele $\check{a}(k)$ katsayıları ile frekans kestirimi için kullanılacak YSA'yı üret (Şekil 2.11).
- Anlık çıkış verilerini Denklem (2.71) ile hesapla.
- YSA katsayılarını, istenilen durdurma koşullarına ulaşana kadar (hata toleransı, maksimum iterasyon sayısı v.b.) Levenberg-Marquardt algoritması ile güncelle
- YSA'nın katsayıları olan Prony polinom katsayılarını kullanarak frekans değerlerini hesapla.
- İkinci YSA'nın girişten elde edilen frekans bilgilerini ata (Şekil 2.12).
- Denklem (2.76) ile tahmin edilen işareti bul.
- Denklem (2.78) ile hata değerini bul.
- İkinci YSA'yı Levenberg-Marquardt algoritmasını kullanarak durdurma kriterleri sağlanana kadar güncelle.
- Güncelleme aşaması bittikten sonra, genlik ve faz bileşenlerini ikinci YSA modelinden hesapla.

Özetle, ADALINE iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada, belirtilen listedeki ilk dört adım uygulanmaktadır ve frekanslar ile sönüm katsayıları bulunmaktadır. İkinci aşamada, son beş adım uygulanmakta, kompleks genlik katsayıları

hesaplanmaktadır. Bu adıma “faz ayarlama adımı” da denilebilir. Bu şekilde frekans, sönüm katsayısı, genlik ve faz bilgilerine ulaşılmış olur.

2.5.6. Öz-değer ayrıştırma yöntemleri

Beyaz gürültü içerisinde sinüzoidal işaretlerden meydana gelen bir zaman serisi için Oto-Kovaryans Fonksiyonu (ACF) çok özel bir yapıya sahiptir. Bu fonksiyon, frekansları sinüzoidal işaretin frekanslarına karşılık gelen ve Kronecker Delta dizisi üzerinde bulunan harmonik/ara-harmoniklerin ağırlıklı toplamıdır. ACF ile ilgili bu tanım göz önüne alınarak MUSIC, Pisarenko, ESPRIT ve Matrix Pencil yöntemleri bu bölümü takip eden başlıklar altında açıklanacaktır. Bu teknikler genel olarak öz-değer ayrıştırma yöntemleri olarak ele alınabilir. Bu tekniklerin altında yatan yaklaşım, ACF’yi temel alan ve işaret frekanslarının öz-değer ile öz-vektörlerden elde edinilebilmesini sağlayan matrislerin inşasına dayalıdır (Li, 2014b).

Bu bağlamda, Denklem (2.81) ile verilen zaman serisi göz önüne alınsın.

$$y_t := x_t + \epsilon_t \quad (t = 1, \dots, n) \quad (2.81)$$

Denklem (2.81)’de, $\{\epsilon_t\}$ sıfır ortalamalı ve σ^2 varyanslı beyaz gürültüyü göstermektedir.

$\{x_t\}$ ’nin Denklem (2.82) ile verilen formda olduğu varsayılınsın.

$$x_t = \sum_{k=1}^p \beta_k e^{i\omega_k t} \quad t \in Z \quad (2.82)$$

$$x_t = \sum_{k=1}^p C_k e^{i\omega_k t + \varphi_k} \quad t \in Z \quad (2.83)$$

Denklem (2.82)’de β_k kompleks genlik katsayısı ve ω_k açısal frekanstır. Denklem (2.83)’de C_k ifadesi, β_k ’nin normunu ifade ederken, φ_k faz açısını göstermektedir.

y_t ’nin ACF’si Denklem (2.84) ile ifade edilir (Li, 2014b).

$$r_y(u) = r_x(u) + r_\varepsilon(u) = \sum_{k=1}^p C_k^2 e^{i\omega_k u} + \sigma^2 + \delta_u \quad (2.84)$$

$m \geq 1$ olmak üzere, m boyutlu kovaryans matrisi Denklem (2.85) ile verilsin.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_y &:= r_x(u) + r_\varepsilon(u) \\ &= \begin{bmatrix} r_y(0) & r_y^*(1) & \dots & r_y^*(m-1) \\ r_y(1) & r_y(0) & \dots & r_y^*(m-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_y(m-1) & r_y(m-2) & \dots & r_y(0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.85)$$

Sinüzoidal işaretlerin fazlarının rastgele olduğu varsayılırsa, Denklem (2.81)'deki $\{y_t\}$, beklenen değeri $E(y_t + uy_t^*) = r_y(u)$ olan sıfır ortalamalı durağan bir süreçtir. Buna dayanılarak Denklem (2.86) yazılır.

$$\mathbf{R}_y = E(\mathbf{y}_t \mathbf{y}_t^H) \quad (2.86)$$

$\mathbf{y}_t := [y_t, y_{t+1}, \dots, y_{t+m-1}]^T \in C^m$ olarak tanımlıdır. \mathbf{R}_y pozitif tanımlı Hermetian matris olduğu için, bütün öz değerleri reel ve pozitifdir (Horn, Roger ve Johnson, 1985).

\mathbf{R}_y 'nin öz değerleri, $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$ olarak gösterilirse, Denklem (2.87)'deki diyagonal matris tanımlanabilir.

$$\mathbf{\Lambda} := \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m) \quad (2.87)$$

Matris teorisine göre, öyle bir birim matris vardır ki, Denklem (2.88) ve Denklem (2.89) ile ifade edilebilir (Horn, Roger ve Johnson, 2014).

$$\mathbf{V} := [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m] \quad (2.88)$$

$$\mathbf{R}_y = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H = \sum_{j=1}^m \lambda_j \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^H \quad j = 1, \dots, m \quad (2.89)$$

Denklem (2.89), \mathbf{R}_y 'nin öz değer ayrıştırması olarak isimlendirilir. \mathbf{v}_j vektörleri, ortonormal olduğu için Denklem (2.89)'dan hareketle, Denklem (2.90) yazılabilir.

$$\mathbf{R}_y \mathbf{v}_j = \lambda_j \mathbf{v}_j \quad (2.90)$$

Ölçülen işaretin üzerine binen gürültünün beyaz gürültü olduğu varsayımı ile Denklem (2.91) yazılabilir.

$$\mathbf{R}_y = \mathbf{R}_x + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (2.91)$$

\mathbf{R}_x Denklem (2.85)'de, $\{r_y(u)\}$ yerine $\{r_x(u)\}$ yazılarak elde edilen kovaryans matris formunu ifade etmektedir. $r_x(u) = \sum_{k=1}^p C_k^2 e^{i\omega_k u}$ olduğundan, Denklem (2.92) yazılabilir. Denklem (2.92)'de kullanılan değişkenler, bu denklemin alt satırlarında tanımlanmıştır.

$$\mathbf{R}_x = \sum_{k=1}^p C_k^2 \mathbf{f}_m(\omega_k) \mathbf{f}_m^H(\omega_k) = \mathbf{F}_m \mathbf{G} \mathbf{F}_m^H \quad (2.92)$$

$$\mathbf{f}_m(\omega) := [e^{i\omega}, \dots, e^{im\omega}]^T$$

$$\mathbf{F}_m := [\mathbf{f}_m(\omega_1), \dots, \mathbf{f}_m(\omega_p)]$$

$$\mathbf{G} = \text{diag}(C_1^2, \dots, C_p^2)$$

Denklem (2.92)'den, herhangi $m \geq p$ için \mathbf{R}_x matrisinin p rankına sahip olduğu görülmektedir (Li, 2014c).

$m > p$ için, Denklem (2.89), m boyutlu kovaryans matrisi $\mathbf{R}_y = \mathbf{R}_x + \sigma^2 \mathbf{I}$ 'nin öz değer ayrıştırması olsun. Bu durumda, Denklem (2.93) yazılabilir (Li, 2014b).

$$\lambda_j = \begin{cases} \mu_j + \sigma^2, & j = 1, \dots, p \text{ için} \\ \sigma^2, & j = p + 1, \dots, m \text{ için} \end{cases} \quad (2.93)$$

$\mu_1 \geq \dots \geq \mu_p \geq 0$ ile kurulan p ranklı matris, \mathbf{R}_x matrisinin sıfır olmayan öz değerleridir. v_1, \dots, v_p , ise belirtilen öz değerlerle eşleşen öz vektörlerdir.

v_1, \dots, v_m öz vektörlerini daha iyi anlamak için, $\mathbf{f}_m(\omega_1), \dots, \mathbf{f}_m(\omega_p)$ sinüzoidal vektörleri gözlemlensin. Bu sinüzoidal vektörler birbiriyle lineer bağımsızdırlar ve m -boyutlu \mathbb{C}^m uzayını, ortogonal iki alt uzaya parçalarlar.

$$\mathbb{C}_S^m := \text{span}\{\mathbf{f}_m(\omega_1), \dots, \mathbf{f}_m(\omega_p)\} \quad (2.94)$$

$$\mathbb{C}_N^m := \mathbb{C}^m \ominus \mathbb{C}_S^m \quad (2.95)$$

Bunlardan, p boyutlu alt uzay \mathbb{C}_S^m işaret alt uzayı ve $(m - p)$ boyutlu alt uzay gürültü alt uzayı olarak isimlendirilir. Bu ifadelerin matematiksel tanımları Denklem (2.94) ve (2.95) ile verilmiştir. Buradan, \mathbf{R}_x 'in v_{p+1}, \dots, v_m öz vektörlerinin, sıfır öz değerleriyle eşleştiği sonucuna ulaşılır. Bu bilgi Denklem (2.92) ile birleştirilirse, Denklem (2.96) ve (2.97) yazılabilir.

$$\mathbf{R}_x \mathbf{v}_j = \mathbf{F}_m \mathbf{G} \mathbf{F}_m^H \mathbf{v}_j = 0, j = p + 1, \dots, m \quad (2.96)$$

$$\mathbf{f}_m^H(\omega_k) \mathbf{v}_j = 0, \quad j = p, \dots, m; k = 1, \dots, p \quad (2.97)$$

Diğer bir deyişle, v_{p+1}, \dots, v_m vektörleri $\mathbf{f}_m(\omega_1), \dots, \mathbf{f}_m(\omega_p)$ vektörlerine ortogonaldır ve bu nedenle gürültü alt uzayı \mathbb{C}_N^m 'de bulunur. Dahası \mathbb{C}_N^m , $(m - p)$ boyutludur ve birbiriyle lineer bağımsız olan $(m - p)$ tane v_{p+1}, \dots, v_m vektör (bu vektörler birbirlerine göre ortonormaldir), \mathbb{C}_N^m 'nin bazlarını oluşturur. Bu durum, Denklem (2.98) ile ifade edilebilir (Li, 2014b).

$$\text{span}\{v_{p+1}, \dots, v_m\} = \mathbb{C}_N^m \quad (2.98)$$

Diğer v_1, \dots, v_p vektörleri, v_{p+1}, \dots, v_m vektörlerine ortogondur ve \mathbb{C}_S^m 'in bazlarını oluştururlar. Bu durum Denklem (2.99) ile gösterilir.

$$\text{span}\{v_1, \dots, v_p\} = \mathbb{C}_S^m \quad (2.99)$$

Böylelikle, sırasıyla v_1, \dots, v_p ve v_{p+1}, \dots, v_m vektörlerinin işaret ve gürültü alt uzaylarını belirlediği, aynı zamanda da \mathbf{R}_y 'nin öz vektörleri olduğu gösterilmiş olur.

Özet olarak; \mathbf{R}_y 'nin, en büyük p tane öz değeriyle eşleşen öz vektörler \mathbb{C}_S^m 'in span'ıdır. $\mathbb{C}_S^m := \text{span}\{\mathbf{f}_m(\omega_1), \dots, \mathbf{f}_m(\omega_p)\}$. Diğer öz vektörler ise, gürültü uzayının span'ıdır $\mathbb{C}_N^m := \mathbb{C}^m \ominus \mathbb{C}_S^m$.

Buradan hareketle Denklem (2.100) yazılabilir. Denklem (2.101)-(2.105)'deki tanımlamalara dikkat edilmelidir.

$$\mathbf{R}_y = \mathbf{V}_S \mathbf{\Lambda}_S \mathbf{V}_S^H + \sigma^2 \mathbf{V}_N \mathbf{V}_N^H \quad (2.100)$$

$$\mathbf{V}_S := [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_p], \mathbf{V}_N := [\mathbf{v}_{p+1}, \dots, \mathbf{v}_m] \quad (2.101)$$

$$\mathbf{\Lambda}_S := \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_m) \quad (2.102)$$

$$\mathbf{V}_S^H \mathbf{V}_S = \mathbf{I}, \quad \mathbf{V}_N^H \mathbf{V}_N = \mathbf{I}, \quad \mathbf{V}_S^H \mathbf{V}_N = \mathbf{0} \quad (2.103)$$

$$\mathbf{V}_S \mathbf{V}_S^H + \mathbf{V}_N \mathbf{V}_N^H = \mathbf{I} \quad (2.104)$$

$$\mathbf{P}_S + \mathbf{P}_N = \mathbf{I} \quad (2.105)$$

Bu bölümde açıklanan öz değer ayrıştırma yöntemi, ilerleyen iki bölümde yer alan MUSIC, Pisarenko, ESPRIT ve Matrix Pencil yöntemlerinin anlaşılmasına ışık tutacaktır (Li, 2014b).

2.5.7. MUSIC ve Pisarenko harmonik ayrıştırması

Herhangi bir $m > p$ için, \mathbf{v}_j ($j = 1, \dots, m$) vektörü, Denklem (2.89) ile öz değer ayrıştırması verilen \mathbf{R}_y matrisinin öz vektörlerini temsil etsin. Denklem (2.99)'daki $m \times (m - p)$ \mathbf{V}_N matrisi göz önüne alınsın. \mathbf{V}_N tam sütun $\times (m - p)$ rank olduğu için, Denklem (2.97)'deki ortogonalite özelliği, yalnız ve yalnızca p tane $\omega_1, \dots, \omega_p$ işaret frekansı için sağlanır. Buradan hareketle, Denklem (2.106) ve (2.107) yazılabilir (Li, 2014d).

$$\mathbf{V}_N^H \mathbf{f}_m(\omega) = \mathbf{0} \quad (2.106)$$

$$\|\mathbf{V}_N^H \mathbf{f}_m(\omega)\|^2 = \sum_{j=p+1}^m |\mathbf{v}_j^H \mathbf{f}_m(\omega)|^2 = 0 \quad (2.107)$$

$\widehat{\mathbf{R}}_y$, \mathbf{R}_y 'nin bir kestiricisi olsun ve matematiksel formu Denklem (2.108) ile ifade edilsin.

$$\widehat{\mathbf{R}}_y = \sum_{j=1}^m \hat{\lambda}_j \hat{\mathbf{v}}_j \hat{\mathbf{v}}_j^H \quad (2.108)$$

Denklem (2.108)'de $\hat{\lambda}_1 \geq \dots \geq \hat{\lambda}_m \geq 0$ olarak tanımlıdır. $\widehat{\mathbf{V}}_N := |\hat{\mathbf{v}}_{p+1}, \dots, \hat{\mathbf{v}}_m|$ ifadesi göz önüne alınsın. Denklem (2.107) temel alınarak, Denklem (2.109)'daki fonksiyonun yerel minimumları hesaplanabilir ve ω_k 'lar bulunur (Li, 2014d).

$$\hat{g}_m(\omega) := \|\widehat{\mathbf{V}}_N^H \mathbf{f}_m(\omega)\|^2 = \sum_{j=p+1}^m |\hat{\mathbf{v}}_j^H \mathbf{f}_m(\omega)|^2 \quad (2.109)$$

Denklem (2.109)'daki kestirici, MUSIC algoritması olarak literatüre kazandırılmıştır (Bienvenu ve Kopp, 1983; Stoica, 1997; Schmidt, 1986).

$m = p + 1$ özel durumu için $\hat{g}_{p+1}(\omega) = |\hat{\mathbf{v}}_{p+1}^H \mathbf{f}_{p+1}(\omega)|^2$ yazılabilir. $[\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_p]^T := \hat{\mathbf{v}}_{p+1}$ ve $\hat{A}(\omega) := \sum_{j=0}^p \hat{a}_j e^{-ij\omega}$ olarak tanımlansın. Buradan hareketle, Denklem (2.110) yazılabilir (Li, 2014d).

$$\hat{g}_{p+1}(\omega) = |\mathbf{f}_{p+1}^H(\omega)\hat{\mathbf{v}}_{p+1}|^2 = |\hat{A}(\omega)|^2 \quad (2.110)$$

\mathbf{R}_y 'nin en küçük öz değeri $\hat{\mathbf{v}}_{p+1}$ olduğu için aynı zamanda $\mathbf{v}^H \mathbf{R}_y \mathbf{v}$ ifadesinin de birim norm sınırlaması, $\|\mathbf{v}\| = 1$ ifadesini minimize eden fonksiyonudur. Ayrıca, $\hat{g}_{p+1}(\omega)$ 'i minimize etmek, p . dereceden $\hat{\mathbf{v}}_{p+1}$ öz vektörüyle eşleşen ($\hat{a}_0 \hat{a}_p \neq 0$) AR spektrumu olan $1/|\hat{A}(\omega)|^2$ 'yi maksimize etmekle eşdeğerdir. Bu Pisarenko Harmonik Ayırıştırması olarak bilinir (Li, 2014d).

2.5.8. ESPRIT ve Matrix Pencil algoritması

$m \geq p$ için Denklem (2.85)'de tanımlanan $m \times m$ \mathbf{R}_y matrisi göz önüne alınsın ve yardımcı bir \mathbf{R}'_y kovaryans matrisi Denklem (2.111) ile tanımlansın (Li, 2014e).

$$\mathbf{R}'_y = \begin{bmatrix} r_y(1) & r_y(0) & r_y^*(1) & \dots & r_y^*(m-2) \\ r_y(2) & r_y(1) & r_y(0) & \dots & r_y^*(m-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_y(m) & r_y(m-1) & r_y(m-2) & \dots & r_y(1) \end{bmatrix} \quad (2.111)$$

Sinüzoidal işaretlerin fazları rasgeleleştirilerek, $\{y_t\}$ 'nin beklenen değeri $E(y_t + uy_t^*) = r_y(u)$ olan sıfır ortalamalı durağan süreç elde edilebileceğine Öz değer ayrıştırması ile mümkün olacağı Denklem (2.86) ile ifade edilmişti. Benzer şartlar altında Denklem (2.112) yazılabilir (Li, 2014e).

$$\mathbf{R}'_y = E(\mathbf{y}_t \mathbf{y}_{t-1}^H) \quad (2.112)$$

Denklem (2.112), başka bir deyişle y_t ve y_{t-1} arasındaki çapraz kovaryans matrisidir.

\mathbf{R}_x ve \mathbf{R}'_x matrisleri, \mathbf{R}_y ve \mathbf{R}'_y matrislerinin öz değer ayrıştırması yöntemine kıyasla benzerleri olsunlar. Denklem (2.84)'de tanımlanan $r_y(u)$ ifadesinde, $r_x(u)$ üzerinden tanımlamalarda bulunulsun. \mathbf{R}_x 'in Denklem (2.92)'deki formda olduğu göz önüne bulunulursa, \mathbf{R}'_x Denklem (2.113) ile verilir (Li, 2014e).

$$\mathbf{R}'_x = \sum_{k=1}^p C_k^2 z_k \mathbf{f}_m(\omega_k) \mathbf{f}_m^H(\omega_k) = \mathbf{F}_m \mathbf{Z} \mathbf{G} \mathbf{F}_m^H \quad (2.113)$$

$$z_k := e^{i\omega_k}$$

$$\mathbf{Z} := \text{diag}(z_1, \dots, z_p) \quad (2.114)$$

Herhangi bir $\mathbf{c} \in \mathbb{C}^m$ için $\mathbf{G} \mathbf{F}_m \mathbf{c}$ vektörü, \mathbf{c} katsayılarının \mathbf{F}_m 'in sütunları üzerine teker teker yeniden ölçeklenerek iz düşümünden oluştuğu gözlemlenebilir. Bundan dolayıdır ki, $\mathbf{R}_x \mathbf{c} = \mathbf{F}_m (\mathbf{G} \mathbf{F}_m^H \mathbf{c})$, \mathbf{F}_m 'nin sütunlarının kullanılmasıyla yeniden ölçeklenen iz düşüm katsayılarından \mathbf{c} 'nin yeniden inşası olarak düşünülebilir. Benzer şekilde, $\mathbf{R}'_x \mathbf{c} = \mathbf{F}_m \mathbf{Z} (\mathbf{G} \mathbf{F}_m^H \mathbf{c})$, $\mathbf{F}_m \mathbf{Z}$ 'nin sütunlarının kullanılmasıyla, \mathbf{c} 'nin yeniden oluşturulması olarak ele alınabilir. $\mathbf{F}_m \rightarrow \mathbf{F}_m \mathbf{Z}$ dönüşümü \mathbf{F}_m 'in sütunlarını teker teker döndürülmesine neden olmakta, böylelikle işaret alt uzayının rotasyona tabii tutulması yorumunun geçerlilik kazanmasını sağlamaktadır. Bu alt uzay rotasyonu, y_t ve onun bir adım geriye kaydırılmış kopyası olan y_{t-1} arasındaki çapraz korelasyonun dikkate alınmasıyla anlaşılır. Tek tek gerçekleştirilen rotasyonun ölçüsü, z_k 'yı belirler. Burası frekans tahmininde alt uzay rotasyonu yönteminin başarılması için kilit noktadır (Li, 2014e).

\mathbf{R}_x ve \mathbf{R}'_x verildiğinde, $\mathbf{R}'_x - z \mathbf{R}_x$, $z \in \mathbb{C}^m$ “Pencil” olarak adlandırılır (Gene H. Golub 1996). Denklem (2.92) ve Denklem (2.113)'den hareketle, Denklem (2.115) yazılabilir.

$$\mathbf{R}'_x - z \mathbf{R}_x = \mathbf{F}_m (\mathbf{Z} - z \mathbf{I}) \mathbf{G} \mathbf{F}_m^H \quad (2.115)$$

Bu özel yapı, z_k 'nin “Pencil”ın öz değerleri ya da $(\mathbf{R}'_x, \mathbf{R}_x)$ matris çiftinin genelleştirilmiş öz değerleri olduğunu garanti eder. \mathbf{F}_m 'in sütunları p ranklı olduğu için ve \mathbf{G} tekil olmadığı için Denklem (2.116) sağlanır (Li, 2014e).

$$\mathbf{R}'_x \mathbf{q} = z \mathbf{R}_x \mathbf{q} \quad (2.116)$$

Denklem (2.116) ifadesi, $\mathbf{q} \in \mathbb{C}^m$ olmak üzere $\mathbf{F}_m^H \mathbf{q} \neq 0$ şartı altında geçerlidir Gürültü alt uzayı \mathbb{C}_N^m 'de bulunan \mathbf{q} bileşenlerinin z_k karakteristiği üzerinde bir etkisinin

olmamasından dolayı $(\mathbf{R}'_x, \mathbf{R}_x)$ matris çiftinin genelleştirilmiş öz değerlerini, karşılık gelen öz vektörlerin işaret alt uzayında bulunduğu varsayımı altında göz önüne almak yeterlidir.

Denklem (2.116)'da verilen sınırlandırılmış genel öz değer problemi, sınırlandırılmamış öz değer problemine çevrilebilir. \mathbf{R}_y 'nin Denklem (2.89)'da verilen öz değer ayrıştırma denklemi göz önüne alınsın. Denklem (2.93)'ün türetilme yaklaşımı göz önüne alındığında, tüm $\mathbf{q} \in \mathbb{C}_S^m$ için öyle bir $\mathbf{d} \in \mathbb{C}^p$ bulunabilir ki, tektir ve Denklem (2.117) ile gösterilmiştir (Li, 2014e).

$$\mathbf{q} = \mathbf{V}_S \mathbf{d} \quad (2.117)$$

$\mathbf{V}_S := [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_p]$ olarak tanımlıdır. Buradan hareketle, Denklem (2.116), Denklem (2.118)'deki gibi yeniden yazılabilir.

$$\mathbf{R}'_x \mathbf{V}_S \mathbf{d} = z \mathbf{R}_x \mathbf{V}_S \mathbf{d} \quad (2.118)$$

Denklem (2.118), matris işlemlerinin ardından Denklem (2.119) formuna getirilebilir.

$$\mathbf{Q} \mathbf{d} = z \mathbf{d} \quad (2.119)$$

$$\mathbf{Q} := \mathbf{V}_S^H \mathbf{R}'_x \mathbf{R}_x \mathbf{V}_S \quad (2.120)$$

Bundan dolayı z , Denklem (2.116) ifadesini sıfır olmayan $\mathbf{q} \in \mathbb{C}_S^m$ vektörü için sağlıyorsa, Denklem (2.119) ve sıfır olmayan $\mathbf{d} \in \mathbb{C}^p$ vektörü için de sağlıyordur. Bu, z_k 'ların sınırlandırılmamış adi öz değer problemi ile elde edilebileceğini gösterir.

Bu gözlemden hareketle, Denklem (2.120)'deki gibi $p \times p$ \mathbf{Q} matrisini, kaydedilen gürültülü veri $\{y_1, \dots, y_n\}$ 'yi tahmin eden $\hat{\mathbf{Q}}$ ile değiştirilerek, karşılık gelen öz değerler $\{\hat{z}_k\}$ ($k = 1, \dots, p$) ile gösterilsin. \hat{z}_k ifadesi, z_k 'nın bir tahmini olduğu için işaret frekansları ω_k 'lar, \hat{z}_k ifadelerinden (açılarından) tahmin edilebilirler. Bu tahmin edici, Birinci tür SSR tahmin edicisi ya da SSR1 olarak isimlendirilir. Genelliği kaybetmeden, \hat{z}_k 'ların açılarına göre artan şekilde $\mathbf{z} := [z_1, \dots, z_p]^T$ ifadesinin kestiricisi $\hat{\mathbf{z}} :=$

$[\hat{z}_1, \dots, \hat{z}_p]^T$ sıralandığı varsayılınsın. Buradan hareketle açılal frekansları $\boldsymbol{\omega} := [\omega_1, \dots, \omega_p]^T := [\angle z_1, \dots, \angle z_p]$ ifadesiyle ve tahmin edicisi $\hat{\boldsymbol{\omega}} := [\hat{\omega}_1, \dots, \hat{\omega}_p]^T$ ile tanımlanabilir.

$\hat{\mathbf{Q}}$ 'nın farklı kurulum şekilleriyle, başka SSR1 tahmin edicileri de elde edilebilir. Örneğin $\hat{\mathbf{R}}_y$ ve $\hat{\mathbf{R}}_y'$ ifadeleri \mathbf{R}_y ve \mathbf{R}_y' 'nin iki farklı tutarlı tahmin edicileri olsunlar $\hat{\mathbf{R}}_y$, Öz-değer Ayırıştırması (EVD)'si Denklem (2.121) ile verilsin (Li, 2014e).

$$\hat{\mathbf{R}}_y = \sum_{j=1}^m \hat{\lambda}_j \hat{\mathbf{v}}_j \hat{\mathbf{v}}_j^H \quad (2.121)$$

Denklem (2.121)'de, $\hat{\lambda}_1 \geq \dots \geq \hat{\lambda}_p > 0$ sıralaması geçerlidir. \mathbf{V}_S 'nin tahmin edicisi, Denklem (2.122) ile verilir.

$$\hat{\mathbf{V}}_S := [\hat{\mathbf{v}}_1, \dots, \hat{\mathbf{v}}_p]^T \quad (2.122)$$

Denklem (2.120)'de, $\hat{\mathbf{R}}_y'$, \mathbf{R}_x' yerini alır ve Denklem (2.120)'deki \mathbf{R}_x , p-rank'lı matris ile değiştirilmiş olur.

$$\tilde{\mathbf{R}}_y = \sum_{j=1}^m \hat{\lambda}_j \hat{\mathbf{v}}_j \hat{\mathbf{v}}_j^H = \hat{\mathbf{V}}_S \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_S \hat{\mathbf{V}}_S^H \quad (2.123)$$

$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}_S := (\hat{\lambda}_1, \dots, \hat{\lambda}_p)$ olarak tanımlıdır.

$\mathbf{R}_x^\dagger := \sum_{j=1}^p \hat{\lambda}_j^{-1} \hat{\mathbf{v}}_j \hat{\mathbf{v}}_j^H = \hat{\mathbf{V}}_S \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_S^{-1} \hat{\mathbf{V}}_S^H$ ifadesi, $\tilde{\mathbf{R}}_y$ 'nin "pseudo inverse"idir ve $\hat{\mathbf{Q}}$ 'nin kestiricisi, Denklem (2.124) ile ifade edilir.

$$\hat{\mathbf{Q}} := \mathbf{V}_S^H \mathbf{R}_x^\dagger \mathbf{R}_y' \mathbf{V}_S = \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_S^{-1} \hat{\mathbf{V}}_S^H \mathbf{R}_y' \hat{\mathbf{V}}_S \quad (2.124)$$

Denklem (2.124)'deki $\hat{\mathbf{Q}}$ 'nın, EKY probleminin minimum norm çözümü olduğu gözlemlenmektedir. $\|\hat{\mathbf{R}}_y' \hat{\mathbf{V}}_S - \tilde{\mathbf{R}}_y \hat{\mathbf{V}}_S \hat{\mathbf{Q}}\|^2$, $\hat{\mathbf{Q}} \in \mathbb{C}^{p \times p}$

$\widehat{\mathbf{R}}_y$ ve $\widehat{\mathbf{R}}'_y$ 'nin tahmin edilmesi için bir çok kestirici vardır. Önemli bir örnek Denklem (2.125) ve (2.126) ile verilebilir (Li, 2014e).

$$\widehat{\mathbf{R}}_y = (2n)^{-1} \mathbf{Y}_{fb}^H \mathbf{Y}_{fb} \quad (2.125)$$

$$\widehat{\mathbf{R}}'_y = (2n)^{-1} \mathbf{Y}_{fb}^H \mathbf{Y}'_{fb} \quad (2.126)$$

Denklem (2.125) ve (2.126)'daki parametreler, Denklem (2.127) ve (2.128)'deki eşitliklerle açıklanmıştır.

$$\mathbf{Y}_{fb} := \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_f \\ \mathbf{Y}_b \end{bmatrix} \quad (2.127)$$

$$\mathbf{Y}'_{fb} := \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_b^* \mathbf{I} \\ \mathbf{Y}_f^* \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (2.128)$$

Yukarıdaki denklemlerde \mathbf{I}' , $m \times m$ ters permütasyon matrisini ifade etmektedir. Bu matrisin tüm çapraz olmayan elemanları 1'e eşit ve diğer bütün elemanları sıfıra eşittir. Denklem (2.125) ve (2.126)'da $\widehat{\mathbf{R}}_y$ 'nin iç çarpımı, Denklem (2.124)'teki $\widehat{\mathbf{Q}}$ 'nin hesaplanabilmesini \mathbf{Y}_{fb} 'nin TDA'sı ile mümkün kılmaktadır. Böylelikle Denklem (2.129) yazılabilir. Denklem (2.130) ve (2.131), bahsedilen denklemlerdeki parametreleri açıklamaktadır (Li, 2014e).

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{Q}} &= \widehat{\mathbf{V}}_S^H \left\{ \sum_{j=1}^p \hat{\sigma}_j^{-2} \hat{\mathbf{v}}_j \hat{\mathbf{v}}_j^H \right\} \left\{ \sum_{j=1}^p \hat{\sigma}_j \hat{\mathbf{v}}_j \hat{\mathbf{u}}_j^H \right\} \mathbf{Y}'_{fb} \widehat{\mathbf{V}}_S \quad (2.129) \\ &= \widehat{\mathbf{V}}_S^H \left\{ \sum_{j=1}^p \hat{\sigma}_j^{-1} \hat{\mathbf{v}}_j \hat{\mathbf{u}}_j^H \right\} \mathbf{Y}'_{fb} \widehat{\mathbf{V}}_S \\ &= \widehat{\Sigma}_S^{-1} \widehat{\mathbf{U}}_S^H \mathbf{Y}'_{fb} \widehat{\mathbf{V}}_S \end{aligned}$$

$$\widehat{\mathbf{U}}_S := [\widehat{\mathbf{u}}_1, \dots, \widehat{\mathbf{u}}_p] \quad (2.130)$$

$$\widehat{\boldsymbol{\Sigma}}_S := \text{diag}(\widehat{s}_1, \dots, \widehat{s}_p) \quad (2.131)$$

Denklem (2.129)'daki $\widehat{\mathbf{Q}}$ 'nın öz-değerlerinden SS1 frekans tahminleri elde edilebilmektedir Bu "Matrix Pencil" (MP) kestiricisi olarak tanımlanmaktadır (Hua ve Sarkar, 1990; 1991).

Q'nun alternatif bir kestiricisi, Denklem (2.120)'deki \mathbf{R}_x^\dagger 'nün ve \mathbf{R}_x' 'nün, \mathbf{R}_y^\dagger ve \mathbf{R}_y' ile değiştirilmesi sonucu elde edilebilir. Denklem (2.132) ve (2.133) incelensin. Bu denklemlerde \mathbf{I}' elemanları, $(j, j + 1)$, $j = 1, \dots, m - 1$ için bire eşit ve diğer yerler için sıfır olan $m \times m$ matrisi temsil eder. Buradan hareketle \mathbf{R}_x ve \mathbf{R}_x' için Denklem (2.134) ve (2.135)'deki gibi bir kestirici tanımlanabilir (Li, 2014e).

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{R}_y - \sigma^2 \mathbf{I} \quad (2.132)$$

$$\mathbf{R}_x' = \mathbf{R}_y' - \sigma^2 \mathbf{I}' \quad (2.133)$$

$$\widehat{\mathbf{R}}_x := \widetilde{\mathbf{R}}_y - \widehat{\sigma}^2 \mathbf{I} \quad (2.134)$$

$$\widehat{\mathbf{R}}_x' := \widetilde{\mathbf{R}}_y' - \widehat{\sigma}^2 \mathbf{I}' \quad (2.135)$$

Denklem (2.136)'da, $\widetilde{\mathbf{R}}_y$ ifadesi, $\widehat{\mathbf{R}}_y$ 'nin optimum rank-p yaklaşımıdır ve Denklem (2.123)'de tanımlanmıştır. $\widehat{\sigma}^2$ ise σ^2 'nin kestiricisidir ve matematiksel ifadesi Denklem (2.136) ile verilmiştir.

$$\widehat{\sigma}^2 := (m - p)^{-1} \sum_{j=p+1}^m \widehat{\lambda}_j \quad (2.136)$$

İncelenen ifadeler birleştirilerek, $\widehat{\mathbf{Q}}$ 'nin ifadesi Denklem (2.137) ile verilebilir.

$$\widehat{\mathbf{Q}} := \widehat{\mathbf{V}}_S^H \widehat{\mathbf{R}}_x^\dagger \widehat{\mathbf{R}}_x' \widehat{\mathbf{V}}_S == (\widehat{\Lambda}_S - \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \widehat{\mathbf{V}}_S^H (\widehat{\mathbf{R}}_y' - \hat{\sigma}^2 \mathbf{I}') \widehat{\mathbf{V}}_S \quad (2.137)$$

Denklem (2.137)'deki $\widehat{\mathbf{Q}}$ 'nın öz değerleri, $(\widehat{\mathbf{R}}_x^\dagger, \widehat{\mathbf{R}}_x')$ 'nün genelleştirilmiş öz değerleri ile örtüşür. $(\widehat{\mathbf{R}}_x^\dagger, \widehat{\mathbf{R}}_x')$ 'nin eşleşen öz vektörleri, $\widehat{\mathbf{V}}_S$ 'nin sütun uzayında bulunur. Bu ESPRIT kestiricisi olarak isimlendirilir (Roy ve diğerleri, 1986).

Eğer, Denklem (2.125) ve (2.126)'da $\widehat{\mathbf{R}}_y$ ve $\widehat{\mathbf{R}}_y'$ ifadeleri verilirse, Denklem (2.137) ve (2.138)'deki gibi yazılabilir. Denklem (2.139)-(2.141)'de, Denklem (2.138)'deki ifadelerin açıklmaları verilmiştir (Li, 2014e).

$$\widehat{\mathbf{Q}} = (\widehat{\Sigma}_S^H \widehat{\Sigma}_S - \zeta^2 \mathbf{I})^{-1} (\widehat{\Sigma}_S^H \widehat{\mathbf{U}}_S^H \mathbf{Y}'_{fb} \widehat{\mathbf{V}}_S - \zeta^2 \widehat{\mathbf{V}}_S^H \mathbf{I}' \widehat{\mathbf{V}}_S) \quad (2.138)$$

$$\widehat{\mathbf{U}}_S := [\widehat{\mathbf{u}}_1, \dots, \widehat{\mathbf{u}}_p] \quad (2.139)$$

$$\widehat{\Sigma}_S := \text{diag}(\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_p) \quad (2.140)$$

$$\zeta^2 = 2n\hat{\sigma}^2 \quad (2.141)$$

$\mathbf{I}' \widehat{\mathbf{V}}_S$ matrisi, $\widehat{\mathbf{V}}_S$ 'nin ilk satırı silinerek ve bunun yerine sıfır elemanlarından oluşmuş bir satır eklenerek elde edilebilir. $\hat{\sigma}^2$ ifadesine bağlı olarak, ζ^2 Denklem (2.142)'deki gibi tanımlansın.

$$\zeta^2 := (m - p)^{-1} \sum_{j=p+1}^m |\hat{s}_j|^2 \quad (2.142)$$

$\zeta^2 := 0$ için Denklem (2.138)'in, Denklem (2.129)'a eşit olacağı anlaşılmaktadır. ζ^2 'yi çıkartmak, \mathbf{R}_x ve \mathbf{R}_x' ifadelerinin tahminindeki asimptotik biası çıkarmak anlamına geldiği için, ESPRIT kestiricisi, MP kestiricisinin bias düzeltilmiş hali olarak yorumlanabilir (Li, 2014e).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, işaret parametrelerinin tahmini için öne sürülen iki yeni yaklaşım açıklanmıştır. İleri sürülen yaklaşımların dayandığı temel yöntemler özetlenmiştir. Önerilen yöntemlerin gürültüye dayanıklılığı ve hesaplama karmaşıklığı gibi konulara değinilmiştir. Ayrıca, tez içerisinde önerilen iki yeni yaklaşım arasındaki ilişki de ilgili alt bölümlerde sunulmuştur. Son olarak, türetilen yaklaşımlara ait algoritmalar ilgili alt bölümlerde maddeler halinde özetlenmiştir.

3.1. Önerilen Yöntemler için Öncül Metotlar

Bu bölümde, önerilen yöntemin yapıtaşlarından birisi olan AHD algoritması incelenecektir. Önerilen yöntemin diğer yapıtaşı Prony yöntemi ise önceki bölümde incelendiği için bu bölümde özet olarak temel denklemlerinden bahsedilecektir.

AHD yöntemi Prony yönteminin temel denklemleri üzerine uygulanarak mevcut Prony yönteminden daha hızlı ve daha doğru sonuçlar veren hibrit bir yöntem türetilmiştir. Bu nedenle AHD'nin incelenmesinin yapılması gereklidir.

3.1.1. Ayrık Haar dönüşümü

AHD basit bir yapıya sahip olmasına rağmen, harmonik analizinde eşzamanlı olarak frekans ve zaman bilgisini üzerinde taşıma kapasitesi sebebiyle önemli bir yere sahiptir (Kovacevic ve Vetterli, 1995). AHD temel olarak, ayrık bir işaretin elemanlarını ikişerli olarak toplam ve farklar halinde gruplayan matematiksel bir işlemi ifade eder. Elde edilen bu gruplar üzerinde aynı işlemlerin tekrarlanması sonucunda daha yüksek dereceden AHD'ler hesaplanır. Bir işaretin birinci dereceden AHD'si ile elde edilen toplam gruplarına “birinci dereceden ortalamalar”, fark gruplarına ise “birinci dereceden ayrıntılar” ismi verilir. Derecesi n olan ortalamalar/ayrıntılar ise n . derece ortalamalar/ayrıntılar olarak adlandırılır.

AHD'nin baz fonksiyonları Denklem (3.1) ve (3.2) ile verilmiştir.

$$\varphi_{2k}[n] = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & n = 2k, n = 2k + 1 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\varphi_{2k+1}[n] = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & n = 2k \\ -1/\sqrt{2}, & n = 2k + 1 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.2)$$

Her bir baz fonksiyonu, işaretin elemanlarına sırasıyla uygulanır ve bunun sonucunda ele alınan işaretin AHD'si elde edilmiş olur. Denklem (3.3) ve (3.4) bu işlemleri ifade eder.

$$\varphi_{2k}[n] = \varphi_0[n - 2k] \quad (3.3)$$

$$\varphi_{2k+1}[n] = \varphi_1[n - 2k] \quad (3.4)$$

Özet olarak AHD Denklem (3.5) ve (3.6) ile verilir. Dönüştürülen işaretin geri elde ediniimi Denklem (3.7) ile verilir. Denklem (3.5) ortalama katsayıları olarak isimlendirilirken, Denklem (3.6) ayrıtı katsayıları olarak isimlendirilir.

$$X[2k] = \langle \varphi_{2k}, x \rangle = (x[2k] + x[2k + 1])/\sqrt{2} \quad (3.5)$$

$$X[2k + 1] = \langle \varphi_{2k+1}, x \rangle = (x[2k] - x[2k + 1])/\sqrt{2} \quad (3.6)$$

$$x[n] = \sum_{k \in \mathbb{Z}} X[k] \varphi_k[n] \quad (3.7)$$

3.1.2. Prony yöntemi

Prony yöntemi, Denklem ile (3.8) ile verilen bir işaret modelinin parametrelerini ortaya çıkarmak için tasarlanmış frekans kestirim yöntemlerinden birisidir. Kuramsal temeller bölümünde ayrıntılarıyla tartışılan bu yöntem temel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, kökleri frekans bileşenini ve sönüm katsayısını barındıran polinomun katsayıları Denklem (3.9) ile bulunur. İkinci aşamada ise genlik ve faz bilgilerini içeren katsayılar Denklem (3.10) ile elde edilir.

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (3.8)$$

$$\mathbf{F} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n+0) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \dots & y(0) \\ y(n-0) & y(n-1) & \dots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \dots & y(N-n-1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_n^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_n^1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.2. Önerilen AHD Tabanlı Prony Algoritması

Tezin bu aşamasında, önerilen birinci yöntem ortaya konacaktır. Bunun için Denklem (3.9)'un tek bir çözümünün olmadığı birden fazla çözümünün olabileceği varsayımından yola çıkılarak bir yöntem türetilenektir. Bu varsayımın hangi koşullarda doğru olduğu irdelenecektir.

Eğer Denklem (3.9)'da \mathbf{F} matrisinin rankı, seçilen polinomun derecesinden küçükse, en az bir polinom katsayısı sonsuz farklı keyfi değer alabilir. İlgili durumun gerçekleşmesi için gereken matematiksel ilişki Denklem (3.11) ile verilir.

$$\text{rank}(\mathbf{F}) < n \quad (3.11)$$

(3.11) Denkleminde verilen koşulun gerçekleşmesi için polinom derecesinin görece olarak yüksek seçildiği varsayılınsın. Bu varsayım, birçok uygulama için geçerli bir kabuldür. Buna örnek olarak, Chang ve diğerleri (2009) tarafından yapılan YSA uygulaması gösterilebilir. Bu çalışmada polinom derecesi, normal Prony yöntemine göre yüksek olarak seçilmektedir ve program her bir çalışmasında farklı polinom katsayılarını

bulmasına rağmen, bulunan bu polinomların kökleri, ortak kökler barındırmaktadır. Bulunan bu ortak kökler, frekans ile sönüm katsayısı bilgilerine sahiptir.

Bu tezde, belirtilen varsayıma bağlı kalınarak, Prony polinomunun köklerine matematiksel bir ilişki ile bağlı daha düşük dereceli bir polinomun varlığı gösterilmiştir ve bu matematiksel ilişki ortaya konmuştur. Türetilen daha düşük dereceli polinom sayesinde, Denklem (3.9)'un yapısı değiştirilerek hesaplama karmaşıklığı önemli ölçüde azaltılmış, ayrıca polinom köklerinin daha az işlem adımı ile bulunabilmesi sağlanmıştır. Bunlara ek olarak, Denklem (3.10) da yeni bir düzenleme ile ele alınmış, daha az hesaplama yüküyle genlik ve faz katsayılarına ulaşılabilmesi sağlanmıştır.

Önerilen yöntem bölümü, üç alt başlıktan oluşmaktadır. Birinci alt başlık önerilen frekans kestirim yöntemini anlatırken ikinci alt başlık genlik kestirim yöntemini ele almaktadır. Son alt başlık ise, önerilen yöntemin hesaplama karmaşıklığı analizini sunmaktadır.

3.2.1. Frekans kestirimi

Bu bölümden itibaren basitlik açısından, Prony yönteminde klasik olarak hesaplanan ve Denklem (3.9) ile elde edilen katsayılara sahip polinom “esas polinom” olarak isimlendirilirken, bu polinomun köklerine matematiksel bir yolla ulaşan daha düşük dereceli polinom “yardımcı polinom” olarak adlandırılacaktır.

Eleman sayısı N olan ayrık bir y işaretinin birinci derece ortalama katsayıları Denklem (3.12) ile verilir.

$$\langle \varphi_{2k}, y \rangle = \left[\frac{y[0] + y[1]}{\sqrt{2}}, \frac{y[2] + y[3]}{\sqrt{2}}, \dots, \frac{y[k-1] + y[k]}{\sqrt{2}} \right] \quad (3.12)$$

Ele alınan y işaretinin birinci derece detay katsayıları Denklem (3.13) ile verilir.

$$\langle \varphi_{2k}, y \rangle = \left[\frac{y[0] - y[1]}{\sqrt{2}}, \frac{y[2] - y[3]}{\sqrt{2}}, \dots, \frac{y[k-1] - y[k]}{\sqrt{2}} \right] \quad (3.13)$$

Denklem (3.12)'ye dayanılarak, Denklem (3.14)(3.16) yazılabilir.

$$y[k - 1] = a_{k-1}y[0] + a_{k-2}y[1] + \dots + a_1y[k - 2] \quad (3.14)$$

$$y[k] = a_{k-1}y[1] + a_{k-2}y[2] + \dots + a_1y[k - 1] \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} y[k - 1] + y[k] \\ &= a_{k-1}(y[0] + y[1]) + a_{k-2}(y[1] + y[2]) + \dots \quad (3.16) \\ &+ a_1(y[k - 2] + y[k - 1]) \end{aligned}$$

Denklem (3.16)'da y işaretinin $(k - 1)$. elemanı göz önüne alınmıştır ve ilk eleman $y[0]$ seçildiği için katsayı sayısı $k - 1$ 'dir. Denklem (3.9)'da ayrı y işaretinin n . elemanı ile ilgilenilmiştir ve yine aynı şekilde başlangıç olarak $y[0]$ elemanı seçilmiştir. Bundan dolayı katsayı sayısı n 'dir.

Esas polinomun katsayıları yeteri kadar büyük seçilirse, bazı a_i katsayılarının keyfi olarak sıfır seçilmesi durumunda da $y[k - 1] + y[k]$ toplamı elde edilebilir. Esas polinom katsayıları a_i 'ler $i = 2m + 1, m \in N^+$ için sıfır seçilsin. Bu durumda, Denklem (3.17) ve (3.18) yazılabilir. Burada, k değeri tek sayı olarak seçilmiştir.

$$\begin{aligned} y[k - 1] + y[k] \\ &= a_{k-1}(y[0] + y[1]) + a_{k-3}(y[2] + y[3]) + \dots \quad (3.17) \\ &+ a_2(y[k - 3] + y[k - 2]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y[k - 1] + y[k] \\ &= a'_{(k-1)/2}(y[0] + y[1]) + a'_{(k-3)/2}(y[2] + y[3]) \quad (3.18) \\ &+ \dots + a'_1(y[k - 2] + y[k - 1]) \end{aligned}$$

Denklem (3.18)'da kullanılan katsayı vektörü $\mathbf{a}' = [a'_1, a'_2, \dots, a'_{(k-1)/2}]$, Denklem (3.17)'deki katsayı vektörü $\mathbf{a} = [0, a_2, 0, a_4, \dots, a_{(k-3)}, 0, a_{(k-1)}]$ 'nin tek indisli katsayılarının (keyfi olarak sıfıra eşitlenen katsayılarının) atılması sonucu elde edilen vektördür.

Eğer Denklem (3.9) y işareti yerine, y işaretinin birinci derece ortalamalarıyla kurulursa, elde edilecek katsayılar \mathbf{a}' vektörünü verir. Katsayıları \mathbf{a} ve \mathbf{a}' vektörü olan polinomlar arasındaki ilişki, Denklem (3.19) ve (3.20)'de verilmiştir. Daha açık bir tabirle, Denklem (3.9)'un çözümü Denklem (3.18)'deki değerler kullanılarak bulunursa \mathbf{a}' vektörü elde edilir. Bu aşamada, \mathbf{a} vektörü, \mathbf{a}' vektöründeki uygun indislere sıfır değerleri yerleştirilerek bulunabilir. Denklem (3.19) katsayıları \mathbf{a} vektörü olan polinomun köklerini veren eşitliği göstermektedir. Denklem (3.20), Denklem (3.19)'un düzenlenmiş halidir.

$$a_{k-1}x^{k-2} + 0x^{k-3} + \dots + a_4x^3 + 0x^2 + a_2x^1 + 0x^0 = 0 \quad (3.19)$$

$$x(a_{k-1}x^{k-3} + \dots a_8x^6 + a_6x^4 + a_4x^2 + a_2x^0) = 0 \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'de $y = x^2$ uygulanırsa, Denklem (3.21) yazılabilir.

$$\sqrt{y}(a_{k-1}y^{(k-3)/2} + \dots + a_8y^3 + a_6y^2 + a_4y + a_2) = 0 \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)'deki polinom katsayılarının \mathbf{a}' vektörü olduğu kolayca görülebilmektedir. Ayrıca Denklem (3.20) ve (3.21) incelenirse, \mathbf{a}' vektörünün katsayılarına sahip bir polinomun kökleriyle, katsayıları \mathbf{a} vektörü olan esas polinomun kökleri arasında matematiksel bir ilişkinin olduğu gözlemlenebilir. Bu ilişki Denklem (3.22) ile verilmiştir.

$$x = \sqrt{y} \quad (3.22)$$

Esas polinomun kökleriyle, ikinci derece ortalama katsayıları ile elde edilen ve katsayıları \mathbf{a}'' vektörü olan polinomun kökleri arasındaki ilişki, Denklem (3.14)-(3.16)'ya benzer olarak Denklem (3.23)-(3.28)'inn yazılmasıyla incelenebilir.

$$E_1 = y[k-1] = a_{k-1}y[0] + a_{k-2}y[1] + \dots + a_1y[k-2] \quad (3.23)$$

$$E_2 = y[k] = a_{k-1}y[1] + a_{k-2}y[2] + \dots + a_1y[k-1] \quad (3.24)$$

$$E_3 = y[k + 1] = a_{k-1}y[2] + a_{k-2}y[3] + \dots + a_1y[k] \quad (3.25)$$

$$E_4 = y[k + 2] = a_{k-1}y[3] + a_{k-2}y[4] + \dots + a_1y[k + 1] \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \\ = a_{k-1}(y[0] + y[1] + y[2] + y[3]) + \dots \\ + a_1(y[k - 2] + y[k - 1] + y[k] + y[k + 1]) \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \\ = a'_{(k-1)/4}(y[0] + y[1] + y[2] + y[3]) + \dots \\ + a'_1(y[k - 2] + y[k - 1] + y[k] + y[k + 1]) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Denklem (3.27)'de, $a_i, i = 4m, m \in N^+$ haricinde bütün katsayılar keyfi olarak sıfır seçilmiştir. Denklem (3.27)'de a_{k-1} en son katsayıyı göstermektedir ve indis değeri $k - 1 = 4n, n \in N^+$ ifadesine göre belirlenmiştir. Bu şekilde Denklem (3.9) sadece ikinci derece ortalama katsayılarına uygulanmış olur. Denklem (3.28)'de kullanılan katsayı vektörü $\mathbf{a}'' = [a'_1, a'_2, \dots, a'_{(k-5)/4}, a'_{(k-1)/4}]$, esas polinoma ait katsayı vektörü $\mathbf{a} = [0, 0, 0, a_4, 0, 0, 0, a_8, \dots, a_{k-5}, 0, 0, 0, a_{k-1}]$ 'in yeniden kurulmuş halidir ve \mathbf{a}'' vektörü, \mathbf{a} vektöründeki ilgili indislerdeki değerler (sıfırlar) kaldırılarak bulunabilir.

Eğer Denklem (3.9), ikinci derece ortalama katsayıları kullanılarak çözümlerse \mathbf{a}'' vektörü elde edilir. Denklem (3.29) ve (3.30), \mathbf{a} ve \mathbf{a}'' katsayılarına sahip polinomların köklerini veren eşitlikleri göstermektedir. Daha açık bir deyişle, Denklem (3.28)'deki değerler kullanılarak Denklem (3.9)'un çözümü, \mathbf{a}'' vektörünü verir. Bu aşamada, \mathbf{a} vektörü, \mathbf{a}'' vektöründeki uygun yerlere sıfırlar yerleştirilerek bulunabilir. Denklem (3.29), \mathbf{a} katsayılı esas polinomun köklerini veren eşitlik ve Denklem (3.30), Denklem (3.29)'un yeniden düzenlenmiş şeklidir.

$$a_{k-1}x^{k-2} + 0x^{k-3} + \dots + a_4x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0 = 0 \quad (3.29)$$

$$x^3(a_{k-1}x^{k-5} + \dots + a_{16}x^{12} + a_{12}x^8 + a_8x^4 + a_4) = 0 \quad (3.30)$$

Eğer $y = x^4$ uygulanırsa, Denklem (3.30), Denklem (3.31)'e dönüşür.

$$\sqrt[4]{y^3}(a_{k-1}y^{(k-5)/4} + \dots + a_{16}y^3 + a_{12}y^2 + a_8y + a_4) = 0 \quad (3.31)$$

Denklem (3.31)'deki katsayıların, \mathbf{a}'' vektörü olduğu açıkça görülmektedir. Buradan hareketle, katsayıları \mathbf{a}'' vektörü olan polinomun kökleri, katsayıları \mathbf{a} vektörü olan polinomun kökleri arasında matematiksel bir bağıntı vardır. Bu bağıntı Denklem (3.32) ile verilir.

$$x = \sqrt[4]{y} \quad (3.32)$$

Eğer Denklem (3.17), (3.21), (3.27) ve (3.31) incelenirse, tümevarım yöntemiyle n . derece ortalama katsayıları için esas polinom ve yardımcı polinomun kökleri ile katsayıları arasındaki ilişki (3.33)-(3.35) Denklemlerindeki gibi elde edilir.

$$\sqrt[v]{y^{v-1}}(a_{(k-1)v}y^{(k-v-1)/v} + \dots + a_{3v}y^2 + a_{2v}y + a_v) = 0 \quad (3.33)$$

$$x = \sqrt[v]{y} \quad (3.34)$$

$$v = 2^n, \quad k, n \in N^+ \quad (3.35)$$

Esas polinomun kökleri bulunduktan sonra, ele alınan işaretin frekans ve sönüm katsayısı parametreleri hesaplanabilir. Ayrıca burada üzerinde durulmalıdır ki, Denklem (3.33)-(3.35), sadece ortalama katsayıları için değil aynı zamanda detay katsayıları için de geçerlidir. Bu durum, Denklem (3.9)'da ortalama katsayılarının yerine fark katsayıları koyularak kolayca görülebilir.

Önerilen yöntem için frekansların ve sönüm katsayılarının bulunması aşağıdaki adımlarla özetlenebilir.

- i. Analiz edilen işaretin n . derece ortalama katsayılarını bul.
- ii. Denklem (3.9)'u hesaplanan ortalamaları kullanarak çöz ve \mathbf{a}^n katsayı vektörünü bul

- iii. Katsayıları \mathbf{a}^n vektörü olan polinomu kur
- iv. Polinomun köklerini bul
- v. Esas polinomun köklerini Denklem (3.34)'ü kullanarak hesapla.
- vi. Esas polinomun köklerinden frekans ve sönüm katsayısı bilgilerini elde et.

Önerilen yöntemin bilgisayar programı içerisinde uygulanması, önemli bir husus içermektedir. Yukarıdaki maddelerin beşinci aşaması için v . derece köklerin hesaplanması gerekmektedir. Birçok programlama dilinde, v . derece kökler doğrudan hesaplanamaz. Örneğin, $v = 4$ için $\sqrt[4]{1}$ değeri hesaplanmak istensin. Birçok programlama dilinde bu ifadenin köklerini bulan fonksiyon çağrıldığında, $(-1,1)$ sonuçları döndürülür. Fakat gerçekte bu ifade karmaşık köklere de sahiptir ve program tarafından dört farklı kök hesaplanmalıdır. Bu ifade için çözüm, $\sqrt[4]{1} = e^{2\pi j/4}, i \in N$ ile hesaplanmalıdır ve sonuç olarak $(-1,1, -j, j)$ değerleri döndürülmelidir. Bundan dolayı, kullanılacak programlama dili içerisinde, uygun bir algoritmayla bu kökleri de bulabilen bir program yazılmalıdır.

3.2.2. Genlik ve faz kestirimi

Önerilen yöntem ile tahmin edilen z_i değerleri kullanılarak genlik ve faz kestirimi yapılabilir. Bu amaç doğrultusunda, Denklem (3.10) yeniden düzenlenmelidir. Analiz edilen işaretin AHD katsayılarını kullanarak genlik ve fazlarını ortaya çıkaran genel denklemi bulmak için öncelikle, birinci derece ortalama katsayıları üzerinden bir formülün türetilmesi faydalı olacaktır. Daha sonra, tüme varım yöntemiyle genel eşitliğe ulaşılabilecektir.

Yöntemin bu aşamasında, AHD hesaplanırken her adımda yer alan $1/\sqrt{2}$ çarpımı göz ardı edilecek, en son aşamada etkisi hesaplanacaktır. Bu nedenle her aşama için sadece $y[k] + y[k + 1]$ ikili toplamlarına odaklanılacaktır.

Birinci dereceden AHD katsayıları dönüşüm sonucu elde edildiği için Denklem (3.10)'un satırları, ikişerli olarak toplanıp yeni bir matris eşitliği oluşturulmalıdır. Bu matris Denklem (3.36) ile verilmektedir.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} (1+z_1^1) & (1+z_2^1) & \dots & (1+z_n^1) \\ z_1^2(1+z_1^1) & z_2^2(1+z_2^1) & \dots & z_n^2(1+z_n^1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{(N-2)}(1+z_1^1) & z_2^{(N-2)}(1+z_2^1) & \dots & z_n^{(N-2)}(1+z_n^1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} y[0] + y[1] \\ y[2] + y[3] \\ \vdots \\ y[N-2] + y[N-1] \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Aynı işlemler, ikinci dereceden ortalama katsayıları kullanılarak da tekrarlanabilir. Bunun için Denklem (3.36)'nın satırları ikişerli olarak toplanmalıdır. Bu işlemler sonucunda, ikinci dereceden ortalama katsayıları ile genlik ve fazları veren eşitlik Denklem (3.37) ile verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} (1+z_1^1)(1+z_1^2) & (1+z_2^1)(1+z_2^2) & \dots & (1+z_n^1)(1+z_n^2) \\ z_1^4(1+z_1^1)(1+z_1^2) & z_2^4(1+z_2^1)(1+z_2^2) & \dots & z_n^4(1+z_n^1)(1+z_n^2) \\ z_1^8(1+z_1^1)(1+z_1^2) & z_2^8(1+z_2^1)(1+z_2^2) & \dots & z_n^8(1+z_n^1)(1+z_n^2) \\ z_1^{12}(1+z_1^1)(1+z_1^2) & z_2^{12}(1+z_2^1)(1+z_2^2) & \dots & z_n^{12}(1+z_n^1)(1+z_n^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{(N-4)}(1+z_1^1)(1+z_1^2) & z_2^{(N-4)}(1+z_2^1)(1+z_2^2) & \dots & z_n^{(N-4)}(1+z_n^1)(1+z_n^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} y[0] + y[1] + y[2] + y[3] \\ y[4] + y[5] + y[6] + y[7] \\ y[8] + y[9] + y[10] + y[11] \\ y[12] + y[13] + y[14] + y[15] \\ \vdots \\ y[N-4] + y[N-3] + y[N-2] + y[N-1] \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Denklem (3.36) ve (3.37) incelendiğinde, ele alınan işaretin v . derece ortalama katsayılarını kullanarak genlik ve faz bilgilerini ortaya çıkaran genel bir formül Denklem (3.38)'deki gibi yazılır. Denklem (3.38)'de $k + 1$ matrisin satır numarasını gösterirken z_i^k Denklem (3.39)'da tanımlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} z_1^{0 \times (2^v)} z_1' & \dots & z_n^{0 \times (2^v)} z_n' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{k \times (2^v)} z_1' & \dots & z_n^{k \times (2^v)} z_n' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{2^v-1} y[j] \\ \vdots \\ \sum_{j=k \times 2^v}^{(k+1) \times 2^v-1} y[j] \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$z_i' = \prod_{p=1}^v \left(1 + z_i^{(2^{p-1})} \right) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.39)$$

Genlik ve faz bilgilerini, ayrıntı katsayılarını kullanarak da hesaplamak mümkündür. Bu eşitlik, birinci derece ayrıntı katsayıları için, Denklem (3.10)'un satırlarının ikişerli olarak çıkarılması ile elde edilebilir. Fakat yüksek dereceli ayrıntı katsayılarının ele alınması halinde, farklı bir durum ile karşılaşılır. Bilindiği üzere, yüksek dereceli fark katsayılarının hesaplanabilmesi için, hesaplanmak istenen derecenin bir önceki adımına kadar, ortalama katsayılarının bulunması gerekmektedir. Sonraki adımda, yani en son aşamadaysa ikişerli olarak en son bulunan ortalama katsayılarının ikişerli farklarının hesaplanması gerekir. Bunun sonucunda yüksek dereceli detay katsayıları hesaplanmış olur. Tüm bunlar göz önüne alındığı zaman genel formülün Denklem, (3.40) ile verileceği açıktır. Bu eşitlik, Denklem (3.38)'in sağ tarafının görüldüğü biçimde, sol tarafındaki z_i' değerlerinin ise Denklem (3.41)'deki gibi değiştirilmesiyle elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} z_1^{0 \times (2^v)} z_1' & \dots & z_n^{0 \times (2^v)} z_n' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{k \times (2^v)} z_1' & \dots & z_n^{k \times (2^v)} z_n' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{2^{v-1}-1} y[j] - \sum_{j=2^{v-1}}^{2^v-1} y[j] \\ \vdots \\ \sum_{j=k \times 2^v}^{2^{v-1}(2 \times k + 1) - 1} y[j] - \sum_{j=2^{v-1}(2 \times k + 1)}^{(k+1)2^v-1} y[j] \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$z'_i = \left(1 - z_i^{(2^v)}\right) \prod_{p=1}^{v-1} \left(1 + z_i^{(2^{p-1})}\right) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.41)$$

Bu altbölümün başında belirtildiği üzere, Denklem (3.38) ve Denklem (3.40) türetilirken $1/\sqrt{2}$ katsayıları göz ardı edilmiştir. Gerçekte, Denklem (3.38) ve Denklem (3.40)'ın sağ tarafındaki değerlerde, $(1/\sqrt{2})^v$ katsayı çarpanı bulunmaktadır. Burada v ortalama veya detay katsayılarının derecesini göstermektedir ve gerçek kompleks genlik katsayıları olan \mathbf{B} yerine Denklem (3.38) ve Denklem (3.40)'ın çözümü, belirtilen katsayı ile çarpılmış \mathbf{B}_{haar} vektörünü verecektir. Sonuç olarak, kompleks genlik (genlik ve faz) değerlerinin elde edilebilmesi için, Denklem (3.42)'deki işlemin uygulanması gerekir.

$$\mathbf{B} = (\sqrt{2})^v \mathbf{B}_{\text{haar}} \quad (3.42)$$

3.2.3. Önerilen AHD tabanlı Prony algoritması için karmaşıklık analizi

Prony yöntemi iki önemli aşamadan oluşmaktadır. Bunlar frekans kestirimi ve kompleks genlik kestirimidir. Frekans kestirimi de iki alt başlıktan oluşmaktadır. Birinci alt başlık Denklem (3.9)'daki matrisin çözümünü bulmak üzerinde kurulmuştur. Bu matrisin çözümünden sonra ikinci olarak, elde edilen katsayılarla oluşturulan Prony polinomun köklerinin hesaplanması gerekmektedir. Prony yönteminde frekanslar kestirildikten sonra kompleks genlik katsayılarının hesaplanması gerekmektedir ki, bu da $N \times N$ boyutundaki Denklem (3.10)'daki matrisinin çözümünü bulunmasını içermektedir.

Bu bilgiler ışığında, N elemanlı bir y işareti için Denklem (3.9)'da matrisin $N \times N$ boyutunda kurulduğu varsayalım. Basitlik açısından, Prony polinom katsayısının, veri sayısına eşit seçildiği durum göz önüne alınmıştır. Belirtilen boyuttaki matrisin çözümü Gauss-Jordan eliminasyon yöntemine göre $O(N^3)$ karmaşıklığına sahiptir (Mucha ve Sankowski 2004). Diğer yandan, frekans kestirimindeki ikinci alt başlık olan polinom köklerinin bulunması, eğer tüm kökler kompleks kabul edilirse N . derece polinom için $O(N^3 \log^2(N))$ karmaşıklığını haiz olduğu görülür (Pan 1987). Prony yönteminin frekans kestirimi tamamlandıktan sonraki diğer ayağı, kompleks genlik katsayılarının

bulunmasıdır ki, bu işlem de $N \times N$ matrisin çözümünden oluşur ve Gauss-Jordan yöntemine göre $O(N^3)$ karmaşıklığına sahiptir.

Önerilen yöntem, orijinal y işaretini kullanmak yerine, bu işaretin n . derece ortalama veya detay Haar katsayılarını kullanmaktadır. Haar katsayılarının bulunmasından sonraki diğer adımlar, Prony yöntemiyle aynıdır. Bu yöntemin üstün tarafı, Haar katsayı vektörünün eleman sayısının orijinal y işaretinin eleman sayısından daha az olduğu gerçeğidir. Bu bilgiler ışığında ve polinom katsayı vektörünün eleman sayısının Haar katsayı vektörünün eleman sayısına eşit olduğu varsayımı altında, Denklem (3.9)'un n adımlı olarak satırlarının toplanmış halinin önerilen yöntem ile çözümünün $O(N^3/2^{3n})$ karmaşıklığına sahip olduğu görülür. Öte yandan, bütün köklerin kompleks olduğu kabul edilirse, $N^3/2^{3n}$ derecesine sahip polinomun çözümünün $O((N^3/2^{3n})(\log N - 3n \log 2)^2)$ karmaşıklığına haiz olduğu açıktır. Benzer şekilde, Haar katsayıları ile kompleks genlik katsayılarının çözümü de, Denklem (3.10) ve Denklem (3.38) kıyaslandığında yaklaşık olarak $O(N^3/2^{3n})$ karmaşıklığına sahiptir.

Yapılan bu analizlerden sonra, Prony yönteminin ve önerilen yöntemin toplam karmaşıklığı yaklaşık olarak sırasıyla Denklem (3.43) ve (3.44) ile verilebilir.

$$Cost_{Prony} \cong 2 \times O(N^3) + O(N^3 \log^2(N)) \quad (3.43)$$

$$Cost_{önerilen_1} \cong 2 \times O(N^3/2^{3n}) + O\left(\frac{N^3}{2^{3n}}(\log N - n \log 2)^2\right) \quad (3.44)$$

3.3. Önerilen AHD Tabanlı Prony Algoritmasının Genelleştirilmesi

Önerilen birinci yöntemde, AHD'nin Prony matrisi üzerinde uygulanması, ardından oluşturulan yeni matrislerle genlik ve fazların kestirilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde kullanılan AHD, işareti ikiyeşerli gruplar halinde indirgemekte, Prony yöntemindeki matrisleri daha düşük eleman sayısı ile oluşturabilmekte ve daha düşük dereceli fakat standart Prony yöntemi ile elde edilecek polinomun köklerine ulaşabilen bir polinomun elde edilmesini sağlamaktadır.

Önerilen genelleştirilmiş yöntem, birinci yöntemin işareti ikiyeşerli gruplamasından ziyade, r bir asal sayı olmak üzere, işaretin bu r asal sayısına göre gruplanması ve ikiyeşerli değil

de r 'şer r 'şer indirgenmesi esasına dayanmaktadır. Bu şekilde Prony matrisi küçültülmekte ve genel bir formüle ulaşılmaktadır.

Birden büyük ve asal olmayan tüm r sayıları, asal olan r sayılarının alt gruplarını oluşturmaktadır. Örneğin 4 sayısının birinci derece gruplanması, 2 sayısının ikinci derece gruplanması ile elde edilebilir. Bundan dolayı genel bir formülün kurulabilmesi için r 'nin sadece asal olduğu durumlarının incelenmesi yeterlidir.

3.3.1. Frekans kestirimi

Prony yönteminde klasik olarak hesaplanan ve Denklem (3.9) ile elde edilen katsayılara sahip polinomun “esas polinom” olarak isimlendirileceğine ve bu polinomun köklerine matematiksel bir yolla ulaşan daha düşük dereceli polinoma ise “yardımcı polinom” denileceğine birinci yöntem bölümünde değinilmiştir.

Eleman sayısı N olan ayrık bir y işaretinin birinci derece r 'şer gruplanmasının ortalaması Denklem (3.45) ile tanımlansın.

$$\langle \varphi_{2k}, y \rangle = \left[\frac{y[0] + \dots + y[r-1]}{\sqrt{r}}, \frac{y[r] + \dots + y[2r-1]}{\sqrt{r}}, \dots, \frac{y[k-r+1] + \dots + y[k]}{\sqrt{r}} \right] \quad (3.45)$$

Ele alınan y işaretinin birinci derece r 'şer gruplanmasının detay katsayıları Denklem (3.46) ile tanımlansın.

$$\langle \varphi_{2k}, y \rangle = \left[\frac{y[0] - \dots - y[r-1]}{\sqrt{r}}, \frac{y[r] - \dots - y[2r-1]}{\sqrt{r}}, \dots, \frac{y[k-r+1] - \dots - y[k]}{\sqrt{r}} \right] \quad (3.46)$$

Denklem (3.45)'e dayanılarak, Denklem (3.47)(3.50) yazılabilir.

$$y[k-r+1] = a_{k-1}y[0] + a_{k-2}y[1] + \dots + a_1y[k-r] \quad (3.47)$$

$$y[k-1] = a_{k-1}y[0] + a_{k-2}y[1] + \dots + a_1y[k-2] \quad (3.48)$$

$$y[k] = a_{k-1}y[1] + a_{k-2}y[2] + \dots + a_1y[k-1] \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} y[k-r+1] + \dots + y[k-1] + y[k] \\ = a_{k-1}(y[0] + y[1] + \dots + y[r-1]) \\ + a_{k-2}(y[1] + y[2] + \dots + y[r]) + \dots \\ + a_1(y[k-r] + \dots + y[k-1]) \end{aligned} \quad (3.50)$$

Denklem (3.50)'de y işaretinin $(k-1)$. elemanı göz önüne alınmıştır ve ilk eleman $y[0]$ seçildiği için katsayı sayısı $k-1$ 'dir. Denklem (3.9)'da ayrık y işaretinin n . elemanı ile ilgilenilmiştir ve yine aynı şekilde başlangıç olarak $y[0]$ elemanı seçilmiştir. Bundan dolayı katsayı sayısı n 'dir.

Esas polinomun katsayıları yeteri kadar büyük seçilirse, bazı a_i katsayılarının keyfi olarak sıfır seçilmesi durumunda da $y[k-r+1] + \dots + y[k-1] + y[k]$ toplamı elde edilebilir. Esas polinom katsayıları a_i 'lerin indisleri, r sayısına tam olarak bölünemiyorsa, bu indislere karşılık gelen katsayılar sıfır olarak seçilsin. Bu durumda, Denklem (3.51) ve (3.52) yazılabilir. Burada, $k = rm + 1, m \in N^+$ olarak seçilmiştir.

$$\begin{aligned} y[k-r+1] + \dots + y[k-1] + y[k] \\ = a_{k-1}(y[0] + y[1] + \dots + y[r-1]) \\ + a_{k-r}(y[r] + y[r+1] + \dots + y[2r-1]) + \dots \\ + a_r(y[k-r] + \dots + y[k-1]) \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} y[k-r+1] + \dots + y[k-1] + y[k] \\ = a'_{(k-1)/r}(y[0] + \dots + y[r-1]) \\ + a'_{(k-r-1)/r}(y[r] + \dots + y[2r-1]) + \dots \\ + a'_1(y[k-r] + \dots + y[k-1]) \end{aligned} \quad (3.52)$$

Denklem (3.52)'de kullanılan katsayı vektörü $\mathbf{a}' = [a'_1, a'_2, \dots, a'_{(k-1)/r}]$, Denklem (3.51)'deki katsayı vektörü $\mathbf{a} = [0, \dots, 0, a_r, 0, \dots, 0, a_{(k-r-1)}, 0, \dots, 0, a_{(k-1)}]$ 'nin r 'ye bölünemeyen katsayılarının (keyfi olarak sıfıra eşitlenen katsayılarının) atılması sonucu elde edilen vektördür.

Eğer Denklem (3.9) y işareti yerine; y işaretinin r sayısına göre birinci derece ortalamalarıyla kurulursa, elde edilecek katsayılar \mathbf{a}' vektörünü verir. Katsayıları \mathbf{a} ve \mathbf{a}' vektörü olan polinomlar arasındaki ilişki, Denklem (3.53) ve (3.54)'de verilmiştir. Daha açık bir tabirle, Denklem (3.9)'un çözümü Denklem (3.52)'deki değerler kullanılarak bulunursa \mathbf{a}' vektörü elde edilir. Bu aşamada, \mathbf{a} vektörü, \mathbf{a}' vektöründeki uygun indislere sıfır değerleri yerleştirilerek bulunabilir. Denklem (3.53), katsayıları \mathbf{a} vektörü olan polinomun köklerini veren eşitliği göstermektedir. Denklem (3.54), Denklem (3.53)'ün düzenlenmiş halidir.

$$a_{k-1}x^{k-2} + 0x^{k-3} + \dots + a_{2r}x^{2r-1} + 0x^{2r-2} + \dots + a_r x^{r-1} + 0x^{r-2} + \dots + 0x^0 = 0 \quad (3.53)$$

$$x^{r-1}(a_{k-1}x^{k-r-1} + \dots + a_{4r}x^{3r} + a_{3r}x^{2r} + a_{2r}x^r + a_r x^0) = 0 \quad (3.54)$$

Denklem (3.54)'de $y = x^r$ uygulanırsa, Denklem (3.55) yazılabilir.

$$\sqrt[r]{y^{r-1}}(a_{k-1}y^{(k-r-1)/r} + \dots + a_{4r}y^3 + a_{3r}y^2 + a_{2r}y + a_r) = 0 \quad (3.55)$$

Denklem (3.55)'deki polinom katsayılarının \mathbf{a}' vektörü olduğu kolayca görülebilmektedir. Ayrıca Denklem (3.54) ve (3.55) incelenirse, \mathbf{a}' vektörünün katsayılarına sahip bir polinomun kökleriyle, katsayıları \mathbf{a} vektörü olan esas polinomun kökleri arasında matematiksel bir ilişkinin olduğu gözlemlenebilir. Bu ilişki Denklem (3.56) ile verilmiştir.

$$x = \sqrt[r]{y} \quad (3.56)$$

Denklem (3.55) ve (3.56) incelendiğinde, Denklem (3.33) ve (3.34) ile eşdeğer olduğu görülür. Fakat, burada ince bir nüans vardır ki, Denklem (3.35)'deki şartın, (r veyahut ilgili denklemdeki v sayısının ikinin bir kuvveti olma şartının) sağlanmasına gerekliliğin olmamasıdır. Burada, r birden büyük herhangi bir tamsayı olabilir. Böylelikle, sadece ikili toplam veya farkların değil, aynı zamanda daha farklı gruplanmalara sahip alt

kümelerin de, frekans ve sönüm katsayısı parametrelerinin nasıl kestirileceğine dair daha genel eşitlikler Denklem (3.55) ve (3.56) ile verilmiştir.

Esas polinomun kökleri bulunduktan sonra, ele alınan işaretin frekans ve sönüm katsayısı parametreleri hesaplanabilir. Ayrıca burada üzerinde durulmalıdır ki, Denklem (3.55) ve (3.56), toplam katsayıları için türetilmiş bir yöntemdir fakat fark katsayıları söz konusu olduğunda, Haar katsayılarının aksine, fark katsayılarının da türetilen denklemlere uygun bir biçimde tanımlanması gerekir. Haar için detay katsayıları, doğal olarak, Denklem (3.9)'a uygunluk gösterir.

Önerilen genelleştirilmiş yöntem için frekansların ve sönüm katsayılarının bulunması aşağıdaki adımlarla özetlenebilir.

- i. Analiz edilen işareti r 'li toplamlar biçiminde yaz
- ii. Denklem (3.9)'un hesaplanan toplamlarını kullanarak çöz ve \mathbf{a}' katsayı vektörünü bul
- iii. Katsayıları \mathbf{a}' vektörü olan polinomu kur
- iv. Polinomun köklerini bul
- v. Esas polinomun köklerini Denklem (3.56)'yı kullanarak hesapla.
- vi. Esas polinomun köklerinden frekans ve sönüm katsayısı bilgilerini elde et.

3.3.2. Genlik ve faz kestirimi

Önerilen genelleştirilmiş yöntem ile tahmin edilen z_i değerleri kullanılarak genlik ve faz kestirimi yapılabilir. Bu amaç doğrultusunda, Denklem (3.10) yeniden düzenlenmelidir. Analiz edilen işaretin r 'li toplamlarını kullanarak genlik ve fazlarını ortaya çıkaran genel denklemi bulmak için önerilen birinci yöntemin genlik ve fazları bulmak için kullandığı genel formülü göz önüne almak faydalı olacaktır.

Yöntemin bu aşamasında, r 'li toplamlar hesaplanırken tanım gereği var olan $1/\sqrt{r}$ çarpımları göz ardı edilecek, en son aşamada etkisi hesaplanacaktır. Bu nedenle her aşama için sadece $y[k - r + 1] + \dots + y[k]$ r 'li toplamlarına odaklanılacaktır.

Denklem (3.36)(3.38) incelendiğinde, ele alınan işaretin r 'li toplamlarının kullanılmasıyla genlik ve faz bilgilerini ortaya çıkaran genel bir formül Denklem

(3.57)'deki gibi yazılır. Denklem (3.57)'de $k + 1$ matrisin satır numarasını gösterirken z'_i Denklem (3.58)'de tanımlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} z_1^{0 \times (r)} z'_1 & \dots & z_n^{0 \times (r)} z'_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{k \times (r)} z'_1 & \dots & z_n^{k \times (r)} z'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{r-1} y[j] \\ \vdots \\ \sum_{j=k \times r}^{(k+1) \times r - 1} y[j] \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$z'_i = \sum_{p=0}^{r-1} z_i^p, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.58)$$

Denklem (3.57) için göz ardı edilen $1/\sqrt{r}$ katsayıları türetilen formüle dahil edildiğinde Denklem (3.59) yazılır ve bu denklemde \mathbf{B} vektörü gerçek kompleks genlik katsayılarını verirken, \mathbf{B}_r vektörü Denklem (3.57) ile hesaplanan kompleks genlik katsayılarını göstermektedir.

$$\mathbf{B} = \sqrt{r} \mathbf{B}_r \quad (3.59)$$

3.4. Önerilen AHD Tabanlı Prony Algoritması İçin Gürültü Analizi

Yüksek dereceli bir polinomun köklerinin, bu polinomun katsayılarının pertürbasyonuna oldukça duyarlı olduğu iyi bilinen bir gerçektir (Guillaume ve diğerleri, 1989). Bilinen bu gerçek ışığında, Denklem (3.9)'un çözümü doğrultusunda elde edilecek katsayılar da meydana gelecek ufak bir değişimin, bu katsayılar kullanılarak oluşturulacak polinomun köklerinde ciddi sapmalara neden olacağı açıktır. Prony yönteminde, elde edilen polinomun kökleri frekans tahmini amacıyla kullanıldığı için elde edilecek frekans değerlerinde de önemli sapmalar oluşacaktır.

Prony polinom katsayılarının değişimsinin, bu polinomun köklerini ciddi bir biçimde etkilediği gerçeği altında, AHD katsayıları veya önerilen genelleştirilmiş yöntemde olduğu gibi düzenli toplamların polinom katsayılarını ne kadar etkilediğinin matematiksel

ifadesi frekans kestiriminin iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda düzenli toplamlar ele alındığından, herhangi bir gürültünün ortalama değeri incelensin. Ortalama değer, gürültü veri örnekleri kullanılarak Denklem (3.60)'daki gibi yazılır.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon_k \quad (3.60)$$

Denklem (3.60)'da; μ , ortalama değeri, N veri sayısını, ε_k ise k . gürültü örneğini ifade etmektedir.

Eğer yüksek sayıda veri elde edilmişse, daha az sayıdaki toplam ile de ortalama değer yaklaşık olarak hesaplanabilir. Örneğin, L , N 'yi kalansız bölen bir tamsayı ise ve yeteri kadar verinin olduğu varsayılırsa, Denklem (3.61)'deki toplam da yaklaşık olarak ortalama değeri verecektir.

$$\mu \cong \frac{L}{N} \sum_{k=0}^{\left(\frac{N}{L}\right)-1} \varepsilon_k \quad (3.61)$$

Bu noktada, gürültünün polinom katsayılarını nasıl etkilediğini anlamak için üzerinde gürültü olan bir işaretin k . dereceden AHD katsayı değerleri ele alınsın. Değerlerin her bir adımda $\sqrt{2}$ 'ye bölüldüğü ihmal edilirse, işaretin gerçek değerlerinin toplamı ve üzerindeki hata bileşenlerinin toplamı sırasıyla Denklem (3.62)-(3.67) ile yazılabilir. Y_0 ifadesi, k . dereceden AHD dönüşümünün $1/\sqrt{2}$ katsayıları hesaba katılmadan elde edilen ilk ortalama katsayı elemanını ifade ederken, $Y_{\left(\frac{N}{2k}\right)-1}$ ifadesi bu ortalama katsayılarının sonuncu elemanını ifade etmektedir. Hata bileşenleri de ilgili denklemlerde benzer şekilde ifade edilmektedir. Hata ile ilgili denklemlerde ε simgesi, orijinal işaretdaki hata elemanını gösterirken ϵ simgesi, $1/\sqrt{2}$ katsayıları ihmal edildiği durumdaki k . derece AHD ortalama katsayılarına karşılık gelmektedir.

$$Y_0 = \sum_{s=0}^{2^k-1} y_s \quad (3.62)$$

$$Y_1 = \sum_{s=2^k}^{2 \times 2^k-1} y_s \quad (3.63)$$

$$Y_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-1} = \sum_{s=N-2^k}^{N-1} y_s \quad (3.64)$$

$$\epsilon_0 = \sum_{s=0}^{2^k-1} \epsilon_s \quad (3.65)$$

$$\epsilon_1 = \sum_{s=2^k}^{2 \times 2^k-1} \epsilon_s \quad (3.66)$$

$$\epsilon_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-1} = \sum_{s=N-2^k}^{N-1} \epsilon_s \quad (3.67)$$

Denklem (3.9)'un AHD ortalama katsayıları ile kurulmuş haline geri dönlün. Fakat bu yazımda, hata bileşenleri de göz önüne alınsın. Bu düşünceden hareketle Denklem (3.68) yazılabilir.

$$\begin{aligned}
& \left(\begin{bmatrix} \epsilon_{n-1} & \epsilon_{n-2} & \dots & \epsilon_0 \\ \epsilon_n & \epsilon_{n-1} & \dots & \epsilon_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \epsilon_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-2} & \epsilon_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-3} & \dots & \epsilon_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-n-1} \end{bmatrix} \right. \\
& \quad \left. + \begin{bmatrix} Y_{n-1} & Y_{n-2} & \dots & Y_0 \\ Y_{n-0} & Y_{n-1} & \dots & Y_1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-2} & Y_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-3} & \dots & Y_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-n-1} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} Y_{n+0}(n+0) + \epsilon_n \\ Y_{n+1}(n+1) + \epsilon_{n+1} \\ \vdots \\ Y_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-1} + \epsilon_{\left(\frac{N}{2^k}\right)-1} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.68}$$

Denklem (3.68), daha basit bir biçimde Denklem (3.69) olarak ifade edilebilir.

$$(\mathbf{Y} + \boldsymbol{\epsilon})\mathbf{a} = \mathbf{Y}' + \boldsymbol{\epsilon} \tag{3.69}$$

Denklem (3.69) üzerinde, sırasıyla Denklem (3.70) ve (3.71)'deki işlemler yapılsın. Bu durumda, Denklem (3.61) ve bu eşitlikten türetilen Denklem (3.73)'teki varsayımlar altında, Denklem (3.72)'ye ulaşılır. Burada, $\boldsymbol{\epsilon}$ matrisinin her bir elemanı, 2^k tane ϵ değerinin toplamından oluşmaktadır. Bundan dolayı, Denklem (3.61)'deki varsayım da göz önüne alınarak $\boldsymbol{\epsilon}$ matrisinin her bir elemanının 2^k ifadesine bölümü, yaklaşık olarak gürültünün ortalama değerini vermektedir. Bu durum Denklem (3.73) ile ifade edilmiştir.

$$\frac{2^k}{2^k}(\mathbf{Y} + \boldsymbol{\epsilon})\mathbf{a} = \frac{2^k}{2^k}(\mathbf{Y}' + \boldsymbol{\epsilon}) \tag{3.70}$$

$$\left(\frac{2^k}{2^k} \mathbf{Y} + \frac{2^k}{2^k} \boldsymbol{\epsilon} \right) \mathbf{a} = \frac{2^k}{2^k} \mathbf{Y}' + \frac{2^k}{2^k} \boldsymbol{\epsilon} \tag{3.71}$$

$$(\mathbf{Y} + 2^k \mu) \mathbf{a} \cong \mathbf{Y}' + 2^k \mu \quad (3.72)$$

$$\epsilon_p = \frac{1}{2^k} \left(\sum_{s=(p-1) \times 2^k}^{p \times 2^k - 1} (\epsilon_s) \right) \quad (3.73)$$

$$\cong \mu, \quad p = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2^k} - 1 \right), \quad k \in N^+$$

Denklem (3.72)'de, Prony polinom katsayılarını gürültünün etkisinden kurtararak hesaplayabilmek için, AHD ortalama katsayılarından, gürültü bileşeninin etkisi ($2^k \mu$ değeri) çıkarılmalıdır. Bu işlemden sonra, polinom katsayıları hesaplanmalıdır. Böylelikle, gerçek değerlere daha yakın frekans değerlerine ulaşılabilir.

Denklem (3.72)'de dikkat çeken diğer bir nokta, sıfır ortalamalı herhangi bir gürültü için bir önceki paragrafta bahsedilen işlemin yapılmasına gerek yoktur. Çünkü bu tip bir gürültünün Denklem (3.72)'ye, dolayısıyla Prony polinom katsayılarını hesaplayan matris eşitliğine etkisinin sıfır olduğu açıkça görülmektedir.

Genliklerin bulunması aşaması ele alındığında, Denklem (3.38) ve Denklem (3.57)'nin yine μ ortalamalı bir gürültü ile kurulduğu varsayılırsa, bu denklemlerin sağ tarafındaki ifadeden, $2^k \mu$ ifadesinin çıkarılması gerekmektedir. Eğer gürültünün ortalaması sıfır ise, bu durumda gürültü ilgili denklemlerin sağ tarafını etkilememiş olacaktır. Sol taraftaki matris, ilk adımda kurulduğu için bu matrisin de gürültüden etkilenmediği açıktır. Eğer gürültünün ortalaması sıfır değilse, sol taraftaki elemanlar üzerinde gürültü giderme işlemi frekans tahmini adımında gerçekleştirildiği için ikinci adımda bu değerler üzerinde herhangi bir matematiksel işlem yapılmamalıdır.

3.5. Önerilen Yöntemin Frekans Kestirimi Açısından Sonuçları ve Diğer Yöntemler

Bu bölümde önerilen yöntemin frekans kestirimi açısından sonuçları ele alınacak ve bu sonuçların MUSIC ve ESPRIT algoritmalarına nasıl uygulanacağı tartışılacaktır. Bu tartışmalar, önerilen ikinci ve üçüncü yöntemleri ortaya koyacaktır. Bu bağlamda, Prony

yöntemi sonucu frekans dağılımının nasıl gerçekleştiği üzerine çıkarımlar yapmak önemlidir.

Önerilen yöntem ile bu yöntemin kullanılmasıyla elde edilen frekansların, Prony yöntemi ile elde edilen frekanslara göre karşılaştırılması ve bu mukayese sonucunda yöntemin MUSIC ve ESPRIT yöntemleri üzerine uygulanabilirliğini tartışmak faydalı sonuçlar verebilir. Probleme bu açıdan yaklaşmak için önerilen yöntemin kullanılmasıyla frekansları veren eşitlikleri ifade eden Denklem (3.33)-(3.35) incelensin. Bu denklemler, Prony yöntemi sonucu elde edilen frekanslar ile önerilen yöntem ile elde edilen frekanslar arasında bir haritalama ortaya koymak için kullanılabilir.

İlk olarak, işaretin üzerinde orijinal Prony algoritmasının uygulandığı varsayalım. Bu durumda bulunan frekanslar Denklem (3.74) ile verilir. Denklem (3.74), $e^{2\pi p} = 1$; $p = 0,1,2, \dots$ olduğu için Denklem (3.75) olarak ifade edilebilir. Bu eşitlikler, Denklem (2.40) kullanılarak elde edilir. Bu eşitliklerde x , Prony polinomunun kökleridir.

$$f = \text{imag} \left(\frac{1}{2\pi\Delta t} \ln x \right), \Delta t = t_k - t_{k-1} \quad (3.74)$$

$$f = \text{imag} \left(\frac{1}{2\pi\Delta t} \ln(xe^{2\pi p}) \right), p = 0,1, \dots \quad (3.75)$$

İkinci olarak, önerilen yöntemin işaret değerleri üzerinde uygulandığı varsayalım. Bir başka deyişle, işaretin n . derece AHD katsayıları bulunsun ve Prony algoritması uygulansın. Bu durumda elde edilen frekanslar Denklem (3.76) ile verilir. Denklem (3.77), Denklem (3.76) ifadesinin basitleştirilmiş halidir. Bu ifadelerde y önerilen yöntem ile elde edilen köklerdir ve $x = \sqrt[v]{y}$, $v = 2^n$, $k, n \in N^+$ bağıntısı geçerlidir, Δt örnekleme periyodudur.

$$f = \text{imag} \left(\frac{1}{2\pi\Delta t} \ln \left((ye^{j2\pi p}) \right)^{1/v} \right), p = 0,1, \dots, v-1 \quad (3.76)$$

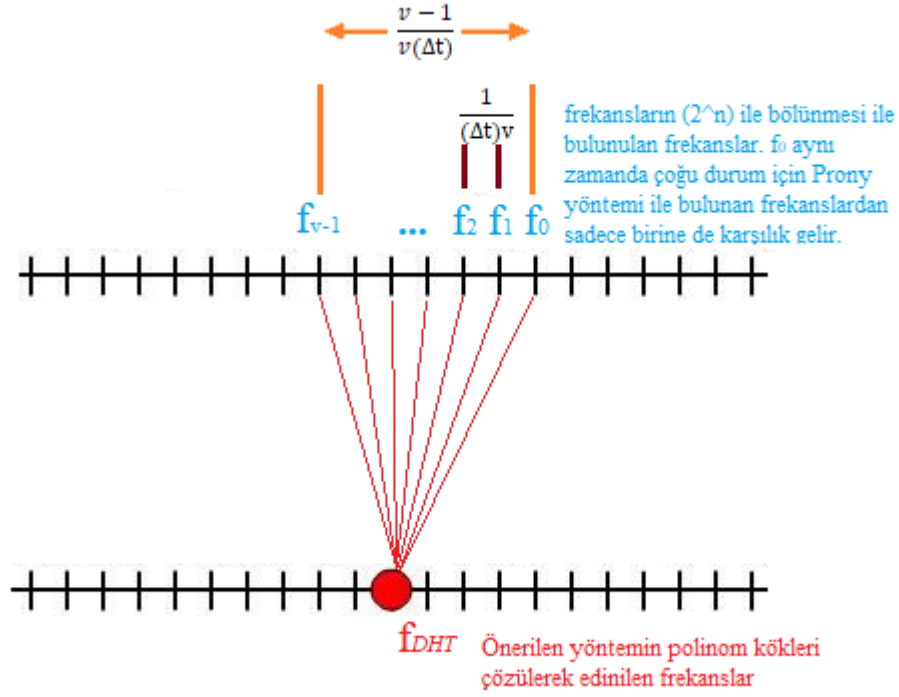
$$f = \frac{1}{2\pi(\Delta t)v} \left(\text{imag}(\ln(y) + j2\pi p) \right), p = 0,1, \dots, v-1 \quad (3.77)$$

Denklem (3.77)'nin, $v = 2^n$ tane farklı kökü olacağı açıktır ve bu durum n farklı frekans bulunacağı anlamına gelir. Bu frekansların birbirine oldukça yakın olacağı ve bu yakınlığın sayısal ifadesi Denklem (3.78)'de verilmiştir. Denklem (3.79), AHD katsayı derecesine bağlı olarak, edinilen frekansın tek bir frekansa da haritalanabileceğini göstermektedir. Çünkü frekanslar birbirlerine Denklem (3.78)'de belirtildiği ölçüde yakındır. Denklem (3.79), azami frekans aralığını temsil eder ve tek bir frekansa haritalanma yapılabileceğini ifade eder.

$$\begin{aligned}\Delta f &= f_k - f_{k-1} \\ &= \frac{1}{2\pi(\Delta t)v} \left(\text{imag} \left((\ln(y) + j2\pi k) - (\ln(y) + j2\pi(k-1)) \right) \right) \quad (3.78) \\ &= \frac{1}{(\Delta t)v}, k = 1, 2, \dots, v-1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_{v-1} - f_0 &= \frac{v-1}{v(\Delta t)} \\ &\cong \frac{1}{\Delta t}; n \text{ kabul edilebilir derecede büyükse, } v = 2^n\end{aligned} \quad (3.79)$$

Son olarak önerilen yöntemin bulduğu frekanslar ve Prony yöntemi ile elde edilen frekanslar arasındaki ilişki görsel olarak Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil içerisindeki haritalamada her bir bileşen arasındaki frekans aralığı ve azami frekans aralığı da belirtilmiştir.



Şekil 3.1. Önerilen yöntem ve Prony yöntemi arasındaki frekans eşleşmeleri.

3.6. Frekans spektrumu dağılımının MUSIC ve ESPRIT yöntemlerine uyarlanması

Bu alt bölümde önerilen ikinci ve üçüncü yöntemler sunulmuştur. Bunu başarmak için öncelikli olarak MUSIC algoritmasının AHD katsayıları ile nasıl uygulanabileceği ve hesaplama karmaşıklığı azaltılarak ne kadar verim sağlanabileceği üzerinde tartışılacaktır. Bunu gerçekleştirmek için Prony analizinde kullanılan işaret modeli ile MUSIC algoritmasının işaret modelinin eş değer olduğu gösterilmeye çalışılacak ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemiyle elde edilen frekans kestirimi sonuçlarının, MUSIC algoritması içinde geçerli olup olmadığı araştırılacaktır. Bunun birtakım ön koşullar dâhilinde başarılabilmesinin akabinde, MUSIC algoritmasının durağan işaretler üzerinde uyarlanmasına dayanan bir varyantı olan ESPRIT algoritması için de türetilen eşitliklerin geçerliliği sorgulanacaktır.

Prony yönteminin işaret modeli Denklem (3.8) ile verilmiştir. MUSIC algoritması ise, Denklem (3.80) ile verilen işaret modelini kullanarak frekansları elde etmektedir. Şayet, Denklem (3.80) ve Denklem (3.8)'in belirli şartlar altında eş değer olduğu gösterilebilirse, Şekil 3.1'deki frekans dağılım yapısının MUSIC algoritması için de geçerli olduğu sonucuna ulaşılabilir.

$$x(n) = \sum_{m=1}^M A_m (\cos(2\pi f_m n T_s + \varphi_m) + j \sin(2\pi f_m n T_s + \varphi_m)) \quad (3.80)$$

Bu bağlamda, MUSIC ve Prony yöntemlerinin işaret modellerinin benzerliğinin sağlanabilmesi için, Prony metodunda sönüm katsayısı (σ) 0 olarak seçilsin. Bu parametrenin sıfır seçilmesi, işaret modelinde çarpım durumunda bulunan sönüm katsayısını içerisinde bulunduran üssel ifadenin 1'e eşit olmasını ve sönüm katsayısının etkisinin olmamasını sağlamaktadır.

MUSIC ve Prony yöntemlerine ait işaret modellerinin devam edilmesi için Denklem (3.80), Denklem (3.81) olarak yazılabilir.

$$x(n) = \sum_{m=1}^M A_m (\cos(2\pi f_m n T_s + \varphi_m)) + j \sum_{m=1}^M A_m \left(\cos \left(2\pi f_m n T_s + \varphi_m - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (3.81)$$

Denklem (3.81), T_s örnekleme zamanı ile ayrık formda ifade edilirse, Denklem (3.82) yazılabilir. Denklem (3.82)'de, $B'_m = A_m e^{\pm j\varphi_i}$ olarak ifade edilir.

$$x(n) = \sum_{m=1}^M B'_m z_m^n + j e^{\pm \frac{j\pi}{2}} \sum_{m=1}^M B'_m z_m^n \quad , \quad z_m = e^{\lambda_m T_s} \quad (3.82)$$

Denklem (3.82) için Euler formülü kullanılır ve toplam ifadesinin ikinci terimindeki imajiner ifade faz farkı olarak üssel biçimde ifade edilirse, Denklem (3.83) yazılabilir.

$$x(n) = 2 \sum_{m=1}^M B'_m z_m^n \quad , \quad z_m = e^{\lambda_m T_s}, \lambda_m = j2\pi f_i \quad (3.83)$$

Denklem (3.8) ve Denklem (3.80)'in benzer matematiksel biçime sahip oldukları, $B_m = 2B'_m$ ifadesi göz önüne alındığında söylenebilir.

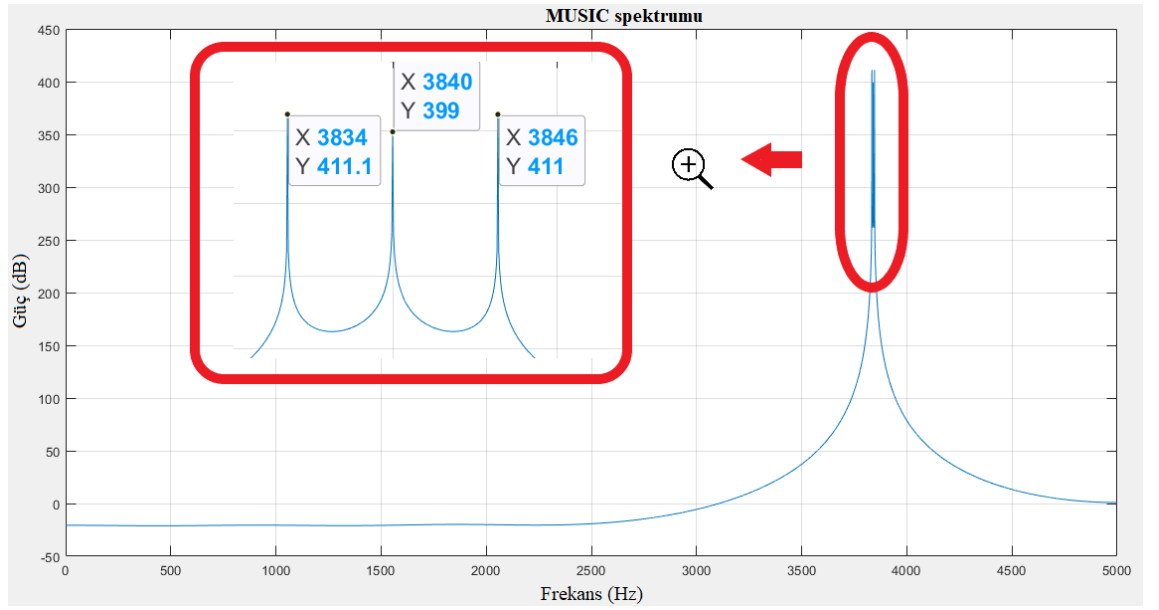
MUSIC ve Prony yöntemlerinin eşdeğer işaret modellerine sahip olduğu, Prony modelindeki sönüm katsayısının sıfır seçilmesi durumu için gösterilmiştir. Ayrıca, örnekleme periyodunun yeteri kadar küçük seçilmesi durumunda, AHD katsayıları ile MUSIC algoritmasının uygulanarak frekansların elde edilmesi senaryosunda, işaret frekanslarının gürültüsüz bir ortamda azami Denklem (3.79) ifadesindeki kadar hatayla elde edilebileceği türetilmiştir. Prony analizinde, Denklem (3.79)'daki ufak hata, kompleks genlik katsayılarının bulunmasında önemli bir fark yaratabilir fakat MUSIC algoritması ile sadece frekans kestirimi yapıldığı için bu fark önemsiz olarak değerlendirilebilir ve tek bir frekans olarak değerlendirilebilir. Bu düşünceden hareketle, Denklem (3.77) için $p = 0$ olduğu varsayılacaktır.

Bu alt bölümde türetilen denklemlere bağlı olarak MUSIC spektrumu AHD katsayıları ile kolaylıkla yorumlanabilir. Şayet MUSIC algoritması AHD katsayıları ile uygulanırsa, sözde spektrumun tepe noktaları, gerçek frekansların 2^n katı olan frekanslarda elde edilecektir. Burada n ile gösterilen parametre, AHD derecesini ifade etmektedir. Bu yöntemin görsel olarak izah edilebilmesi açısından, 10 kHz örnekleme frekansına, 59.9 Hz , 60.0 Hz , 60.1 Hz harmonik bileşenlere, bütün bileşenler için 0 faz ve 1 V genliğe sahip bir işaret ele alınsın. İlgili örneğin kolay tekrar edilebilmesi açısından MATLAB ortamındaki “pmusic” komutu kullanılsın (The MathWorks 2020a). MUSIC algoritması için Denklem (2.109)'daki $\mathbf{f}_m(\omega)$ frekans vektörü, 0.05 Hz aralıklarla sıfırdan örnekleme frekansının yarısına kadar arttırılsın (0 Hz 'dn 5 kHz 'e kadar). Benzetim, 6. dereceden AHD katsayıları ile gerçekleştirilsin. Temel harmoniğin 8 periyodu boyunca işaret tekrar edilsin. Bu durumda, benzetim içerisinde kullanılacak veri sayısı Denklem (3.84) ile verilirken, MUSIC algoritmasının AHD ile değil de işaret değerleri kullanılarak gerçekleştirilmesi durumundaki veri sayısı Denklem (3.85) ile verilir. Denklem (3.84) ve (3.85) için N veri sayısı, N_{DHT} AHD kullanılması durumundaki veri sayısı, F_s örnekleme frekansı, f temel frekans ve C çevrim sayısıdır.

$$N_{DHT} = \frac{N}{2^n} = \frac{1}{2^6} \left(\frac{10^4 \times 8}{60} + 1 \right) \cong 21 \quad (3.84)$$

$$N = \left(\frac{F_s C}{f} \right) + 1 = \frac{10^4 \times 8}{60} + 1 \cong 1334 \quad (3.85)$$

Bu benzetimin sonucunda elde edilen işaretler Şekil 3.2’de verilmiştir.

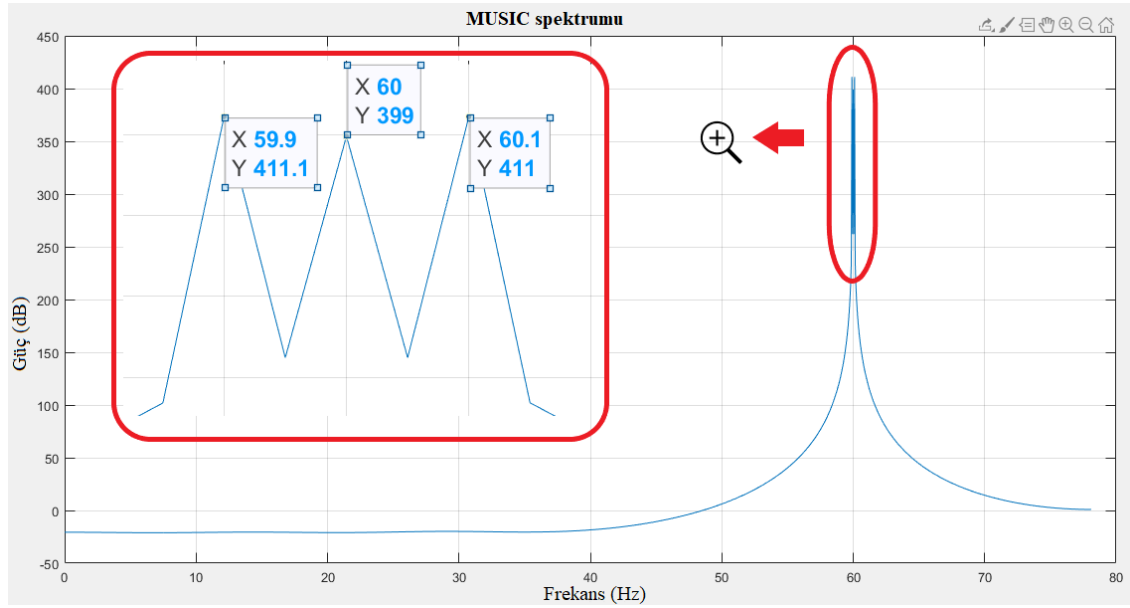


Şekil 3.2. AHD'nin MUSIC algoritmasına uygulanması sonucunda elde edilen frekans bileşenleri

Şekil 3.2 için, spektrumun tepe noktalarına karşılık gelen noktaların yatay eksendeki karşılıkları, AHD katsayıları kullanılarak elde edilen frekansları verir. AHD ile elde edilen frekanslar ile işaretin gerçek frekansları arasında, Denklem (3.77) ile verilen matematiksel ilişki bulunmaktadır. Bu durumda Denklem (3.77)'de görece büyük bir hataya mahal vermeksizin $p = 0$ seçilebilir ve Şekil 3.2 için elde edilen frekansların $\frac{1}{2^6}$ katı hesaplanarak, işaret frekansları elde edilir: (59.90625 Hz, 60 Hz, 60.09375 Hz).

Bu örnekteki hesaplamamın örnekleme frekansı $1/2^n$ kat azaltılarak gerçekleştirilmesi durumunda, AHD katsayılarının kullanılmasına rağmen, elde edilen frekansların

doğrudan işaretin gerçek frekanslarıyla örtüşeceği kolaylıkla görülebilir. Çünkü sözde-spektrumun 0 Hz 'den $0.5T_s/2^n$ ($0.5 \times \frac{10^4}{2^6} = 78.125 \text{ Hz}$)'ye kadar çizdirilmesi, genlik olarak maksimum noktalara karşılık gelen frekansları da aynı oranda küçültür. Böylelikle işaretin gerçek frekansları elde edilmiş olur. Benzetimin bu şekilde gerçekleştirilmesi durumunda elde edilen spektrum, Şekil 3.3'de verilmiştir.



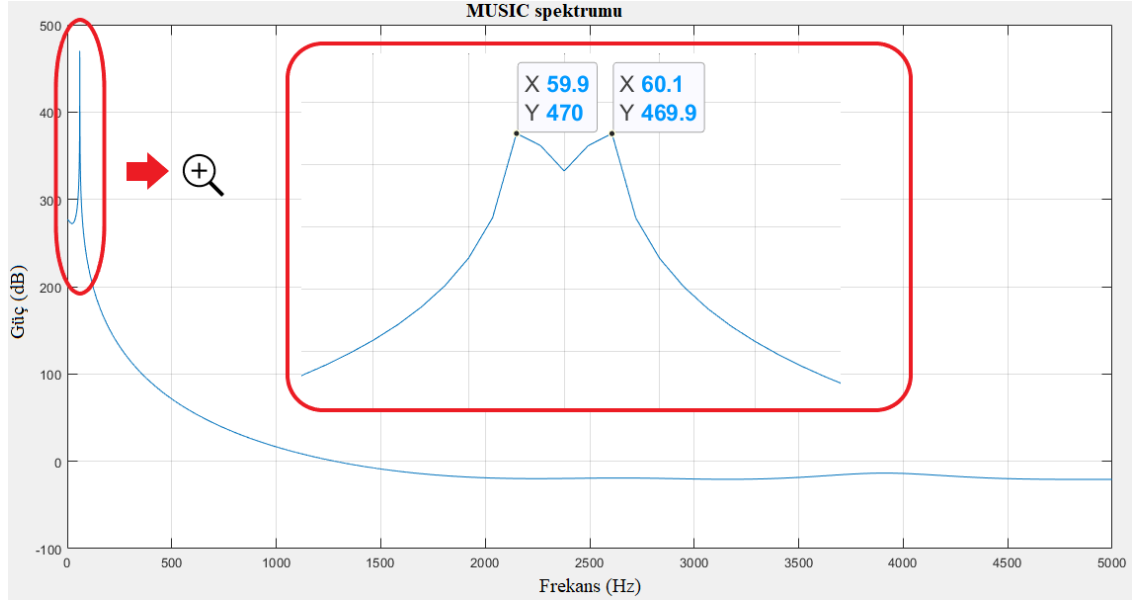
Şekil 3.3. AHD'nin MUSIC algoritmasına uygulanması ve spektrumun $1/2^6$ kat daraltılması sonucunda elde edilen frekans bileşenleri

Bu örnekten yola çıkılarak, bu durumun AHD katsayılarının MUSIC algoritması içerisinde kullanılması durumunda, örnekleme frekansının $1/2^n$ kat azaltılması ile işaretin gerçek frekanslarının bulunabileceği sonucuna ulaşılabilir. Bu durum, sözde-spektrumdaki tepe genlik değerlerinin Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 için aynı olmasının gözlemlenmesiyle de doğrulanabilir. Frekansların bu şekilde hesaplanması üç önemli faydayı da beraberinde getirir. Bunlar;

- AHD katsayılarının kullanılmasından dolayı daha düşük hesaplama maliyeti,
- Denklem (2.109)'daki $f_m(\omega)$ frekans vektörünün ilk durumdaki gibi 0.05 Hz aralıklarla arttırılmasına rağmen, hesaplamanın $0.5T_s/2^n$ ($0.5 \times \frac{10^4}{2^6} = 78.125 \text{ Hz}$) frekansına kadar yapılmasından dolayı hesaplama karmaşıklığının diğer bir açıdan düşürülmesi,
- Son olarak, frekans tahmin doğruluğunun iyileştirilmesi,

biçiminde sıralanabilir.

Bu noktada, MUSIC algoritmasının AHD katsayıları ve işaretin gerçek değerleri ile gerçekleştirilmesinin karşılaştırılmasının yapılması amacıyla, ele alınan senaryo, MUSIC üzerinde işaret değerlerinin uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, elde edilen sonuç Şekil 3.4’de verilmiştir ve 60 Hz frekansının tespit edilemediği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4. İşaret değerleri ile MUSIC algoritmasının uygulanması

Özet olarak, AHD ile MUSIC yönteminin birlikte uygulanması, algoritmadaki veri sayısında önemli ölçüde düşüş sayesinde hesaplama maliyeti açısından fayda sağlamaktadır. Önerilen yöntemin diğer bir üstünlüğü, elde edilen sonuçların kesinliğinin artırılmasıdır. Ayrıca, Denklem (3.77)’nin sadece ortalama katsayıları için değil, aynı zamanda detay katsayıları için de geçerli olması yöntemin farklı şekillerde uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Tüm bu değerlendirmeler, AHD ortalama katsayıları ile elde edilen Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 ile doğrulanmaktadır. Son olarak türetilen bu eşitliklerin, durağan işaretler için geliştirilen ESPRIT yöntemi için de geçerli olduğu, bu yöntemin MUSIC ile benzer temellere dayanmasından dolayı açıktır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, önceki bölümde açıklanan Prony ve MUSIC yöntemleriyle birlikte, bu tez içerisinde önerilen AHD katsayılarına dayanan Prony ve MUSIC yöntemleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, MATLAB 2019 yazılım ortamında (Mathworks.com 2019), 64-Bit mimariye; Windows 10 işletim sistemi yüklü, Intel Core i5-7200U 2.71 GHz CPU ve 8.00 GB RAM donanım özelliklerine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen işlemlerin kolaylıkla tekrar edilebilmesi amacıyla, MATLAB yazılım paketleri arasında bulunan “Signal Processing Toolbox”tan faydalanılmıştır (The MathWorks, 2020). Benzetimler; Tedirget-Gözlemle Azami Güç Noktası İzleyicisi (Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking - (P&O MPPT)) ile sürülen Güneş Paneli Harmonik Modellemesine dayanan harmonik ve ara-harmonik bileşenler içeren veri yapıları üzerinde gerçekleştirilmiştir (Sangwongwanich ve diğerleri, 2018). Elde edilen sonuçlar, verilen altbölümlerde şekiller ve çizelgeler halinde sunulmuştur. Önerilen yöntemlerin üstün yanları ve bu yöntemlere dayalı olası çalışmalar Sonuçlar ve Tartışma bölümünde ele alınmıştır.

4.1. Güneş Paneli Sistemi Harmonik/Ara-harmonik Modeli

Tezin bu bölümünde, benzetim verilerini üretmek amacıyla P&O MPPT) algoritması ile çalıştırılan PV sistemin, deneylerle doğrulanmış matematiksel harmonik/ara-harmonik modeli kullanılmıştır (Sangwongwanich ve diğerleri, 2018). Bu model, MPPT ile sürülen PV sistemlerin, iki temel unsur ile harmonik ve ara-harmonik ürettiğini ortaya koymaktadır. Bu bileşenler, MPPT algoritmasının adım gerilimi ve frekans parametreleridir. Adım gerilimi, harmonik ve ara-harmoniklerin genlikleri üzerinde etkili olurken frekans parametresi, harmonik ve ara-harmonikler içeren güç işaretinin biçimini belirlemektedir. Genlik ve frekans tahmini açısından, düşük genlikli ve dar bir spektruma sahip olan bir güç işaretinin bileşenlerinin tahmin edilmesinin, bu parametrelere ters özellikleri haiz bir işaretin bileşenlerinin tahmin edilmesinden daha zor olacağı söylenebilir. Kullanılan model içerisinde, MPPT frekansının ve adım geriliminin değiştirilebilme olanağının bulunması sayesinde, farklı spektrum dağılımlarına ve harmonik/ara-harmonik genliklerine sahip birçok güç işareti ve dolayısıyla birçok veri üretilebilmektedir. Kullanılan matematiksel model, Denklem (4.1) ile verilmiştir. Denklem (4.2)-(4.4), kullanılan parametreleri matematiksel olarak açıklamaktadır. Bu

eşitliklerde; f_g temel frekans (şebeke frekansı), n harmonik derecesi, f_n harmonik frekansı, A_n harmonik genliği, φ_n harmonik fazı, f_{MPPT} MPPT frekansı ve $V_{adım}$ adım gerilimidir.

$$i_g(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{2} [\cos(2\pi t(f_g - f_n) + \varphi_n) - \cos(2\pi t(f_g + f_n) + \varphi_n)] \quad (4.1)$$

$$a_n = \frac{2V_{adım}}{\pi n} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right) \quad , \quad b_n = \frac{V_{adım}}{\pi n} \cos(\pi(n-1)) \quad (4.2)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad , \quad \varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (4.3)$$

$$f_n = \frac{(2n-1)f_{MPPT}}{4} \quad (4.4)$$

P&O MPPT veri yapısından anlaşılacağı üzere, MPPT frekansının artırılması, azami güç noktasına yakınsama hızının artırılmasını sağlarken güç işareti spektrumunu genişletmektedir. Benzer olarak, yakınsamanın daha hızlı olması için adım geriliminin artırılması, harmonik ve ara-harmonik genliklerinde belirgin artışa neden olmaktadır. Güç işaret spektrumunun genişlemesi ve ara-harmonik genliklerinin artması güç kalitesini olumsuz etkilemektedir. MPPT frekansı ve adım genliğine bağlı olarak güç işaretinin frekans ve genlik bileşenlerinin hangi değerleri alacağı Çizelge 4.1 – 4.8 aralığında gösterilmiştir.

Altbölümlerde yapılan benzetimlerde, veri sayısının algoritma üzerindeki etkisini ölçmek için sabit olarak temel frekansın 24 periyodu ele alınmış ve 8 kHz ile 100 kHz örnekleme frekanslarına sahip biçimleri benzetimlerde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar,

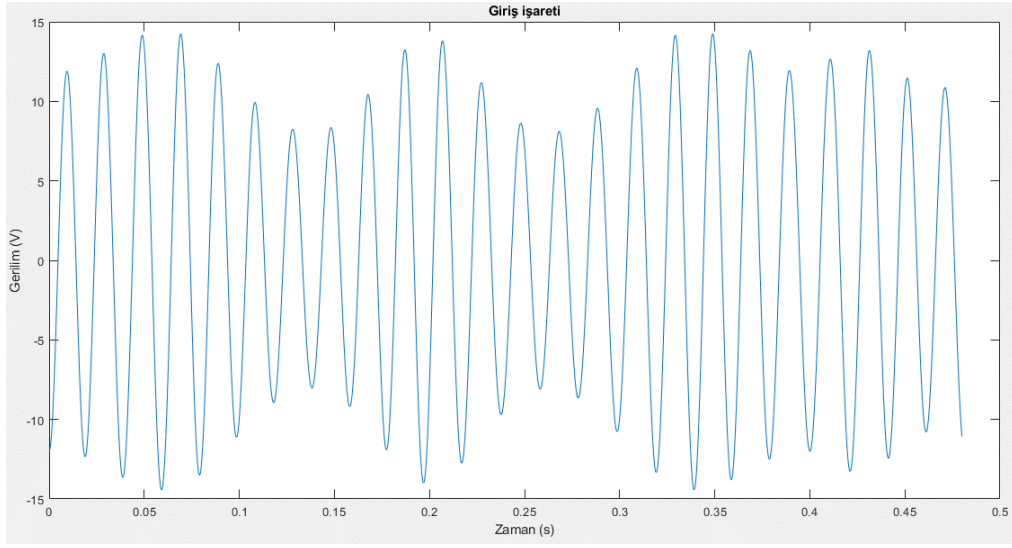
algoritmaların çalışma süresi ve bağıl hata oranları açısından değerlendirilmiştir. Bulunan değerler çizelgeler halinde sunulmuştur.

4.2. P&O MPPT ile sürülen PV sistem modeline dayalı üretilen güç işaretleri

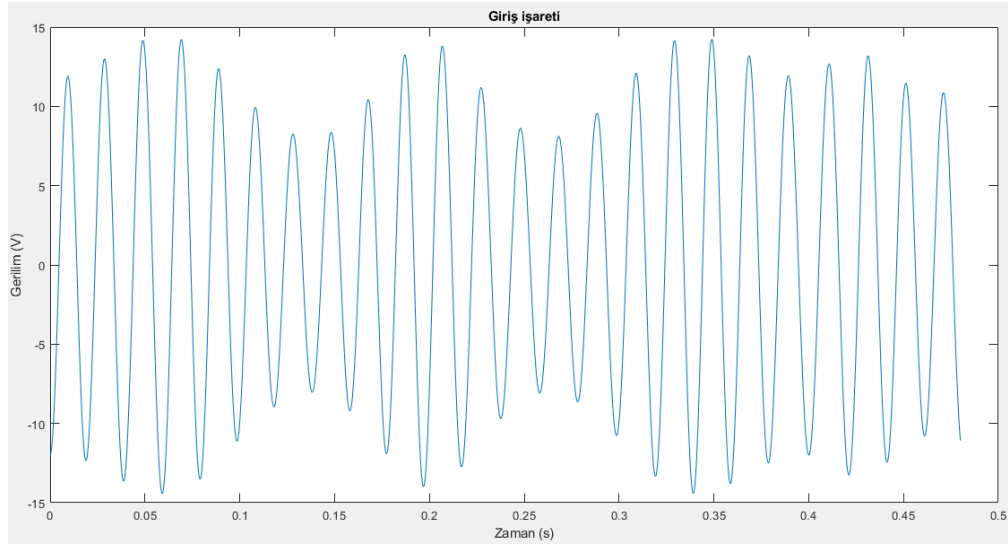
Bu alt bölümde, P&O MPPT ile sürülen PV sistemine ait harmonik ve ara-harmonikleri belirten değerler, Çizelge 4.1 – 4.8 aralığında sunulmuştur. İlgili çizelgelerde adım gerilimi ve frekans parametrelerine bağlı değerler belirtilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.8'deki veriler üzerine SNR değerleri 10 dB ve 20 dB olacak şekilde Beyaz Gauss Gürültüsü (WGS) eklenerek de benzetimler gerçekleştirilmiş ve orijinal yöntemlerle karşılaştırmalı sonuçları, Çizelge 4.45 - 4.48 aralığında verilmiştir. Değerleri Çizelge 4.1 – 4.8 aralığında verilen işaretlerin çizimleri, 8 kHz ve 100 kHz kullanılarak oluşturulmuş ve ilerleyen bölümlerdeki yöntemler üzerinde denenmiştir. Gürültüsüz işaretlerin belirtilen örnekleme frekanslarındaki çizimleri Şekil 4.1- 4.16 aralığında verilmiştir. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.8'deki değerlerin üzerine uygulanan WGS ve elde edilen 10 dB ve 20 dB SNR gücündeki işaretler, Şekil 4.17 – 4.20'de çizdirilmiştir. İlerleyen bölümler içerisinde önerilen ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırmalı analizler, bu işaretler için de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$

| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 0,8541 | 26,5651 | 38,7500 |
| 0,4775 | 90,0000 | 41,2500 |
| 1,4235 | -26,5651 | 43,7500 |
| 0,9549 | -90,0000 | 46,2500 |
| 4,2706 | 26,5651 | 48,7500 |
| 12,0000 | 0,0000 | 50,0000 |
| 4,2706 | 26,5651 | 51,2500 |
| 0,9549 | -90,0000 | 53,7500 |
| 1,4235 | -26,5651 | 56,2500 |
| 0,4775 | 90,0000 | 58,7500 |
| 0,8541 | 26,5651 | 61,2500 |



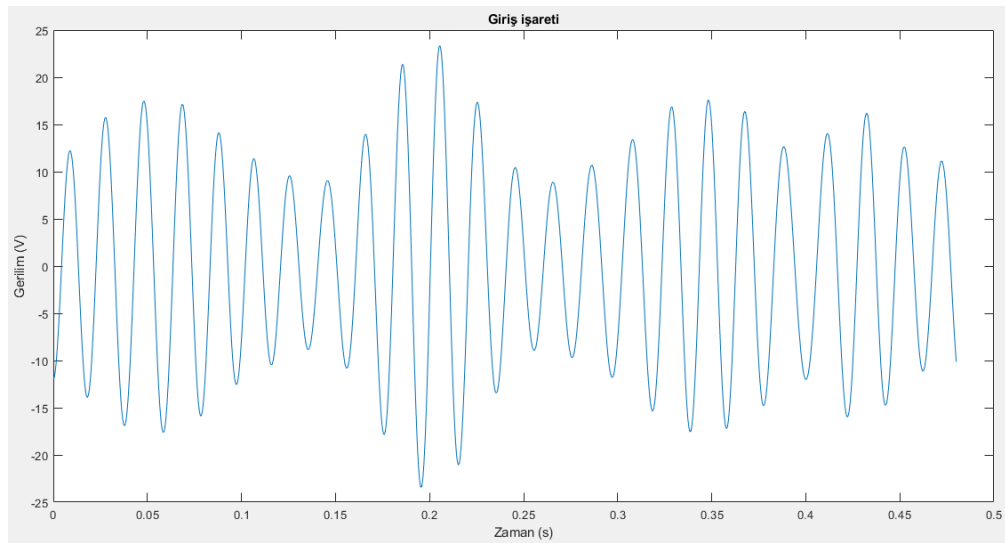
Şekil 4.1. Çizelge 4.1 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)



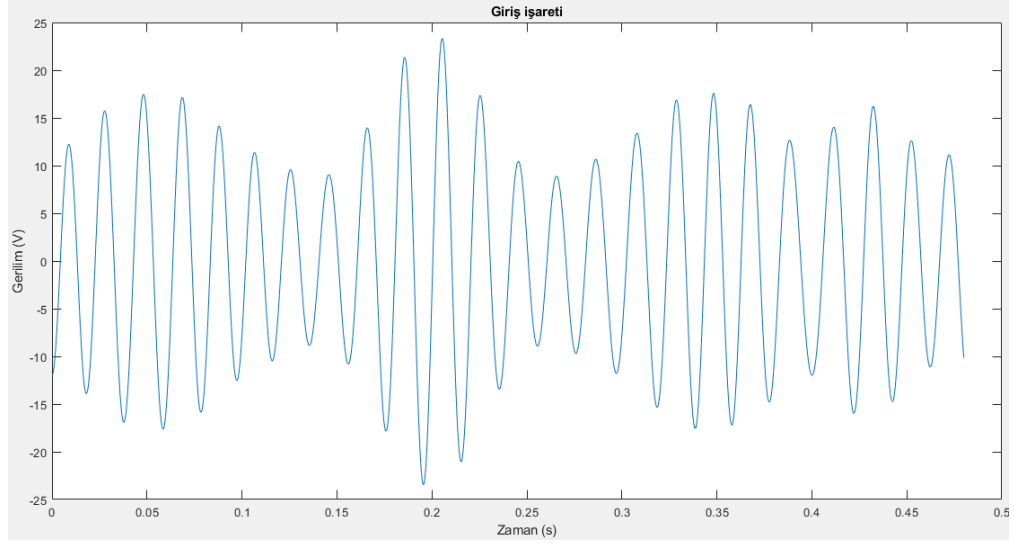
Şekil 4.2. Çizelge 4.1 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)

Çizelge 4.2. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$

| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 1,7082 | 26,5651 | 38,7500 |
| 0,9549 | 90,0000 | 41,2500 |
| 2,8471 | -26,5651 | 43,7500 |
| 1,9099 | -90,0000 | 46,2500 |
| 8,5412 | 26,5651 | 48,7500 |
| 12,0000 | 0,0000 | 50,0000 |
| 8,5412 | 26,5651 | 51,2500 |
| 1,9099 | -90,0000 | 53,7500 |
| 2,8471 | -26,5651 | 56,2500 |
| 0,9549 | 90,0000 | 58,7500 |
| 1,7082 | 26,5651 | 61,2500 |



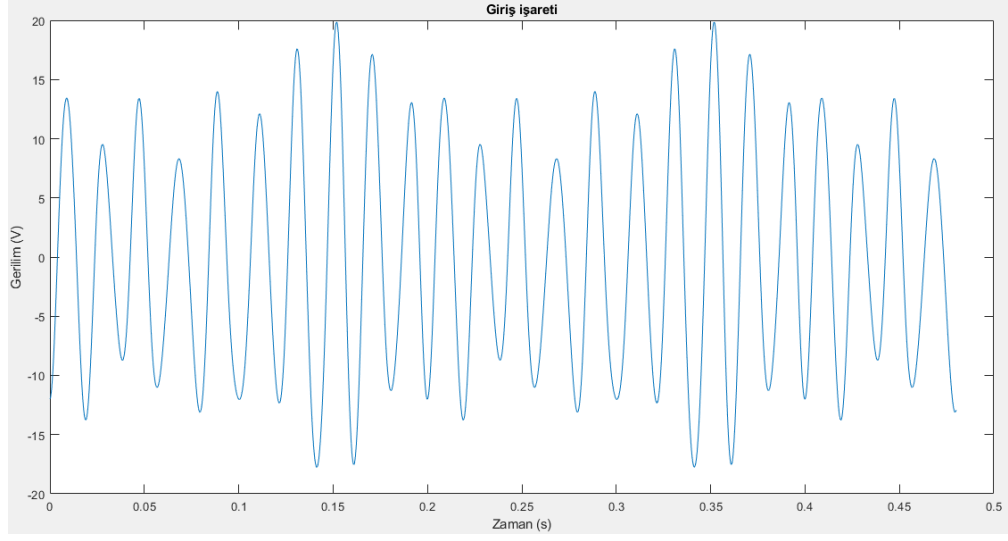
Şekil 4.3. Çizelge 4.2 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$)



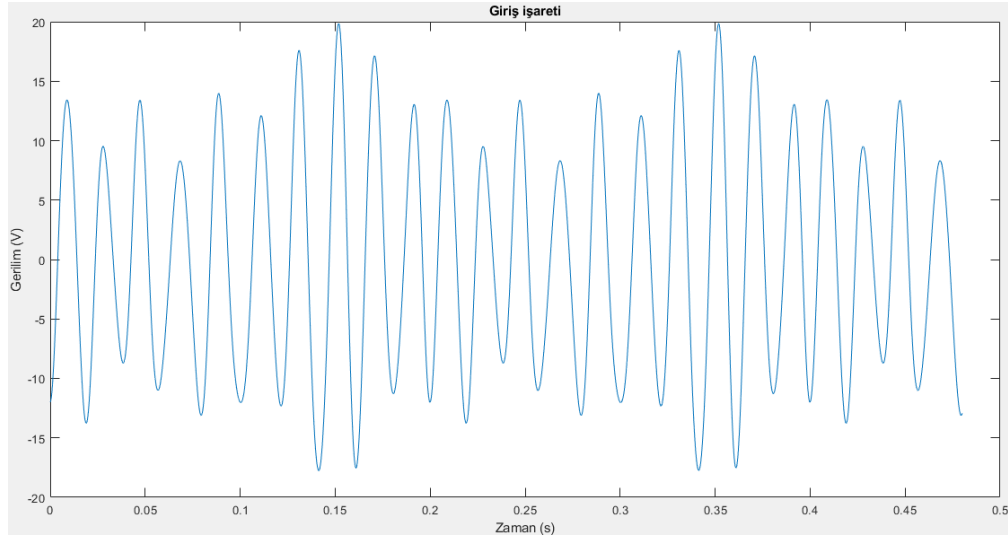
Şekil 4.4. Çizelge 4.2 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$)

Çizelge 4.3. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$

| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 0,8541 | 26,5651 | 5,0000 |
| 0,4775 | 90,0000 | 15,0000 |
| 1,4235 | -26,5651 | 25,0000 |
| 0,9549 | -90,0000 | 35,0000 |
| 4,2706 | 26,5651 | 45,0000 |
| 12,0000 | 0,0000 | 50,0000 |
| 4,2706 | 26,5651 | 55,0000 |
| 0,9549 | -90,0000 | 65,0000 |
| 1,4235 | -26,5651 | 75,0000 |
| 0,4775 | 90,0000 | 85,0000 |
| 0,8541 | 26,5651 | 95,0000 |



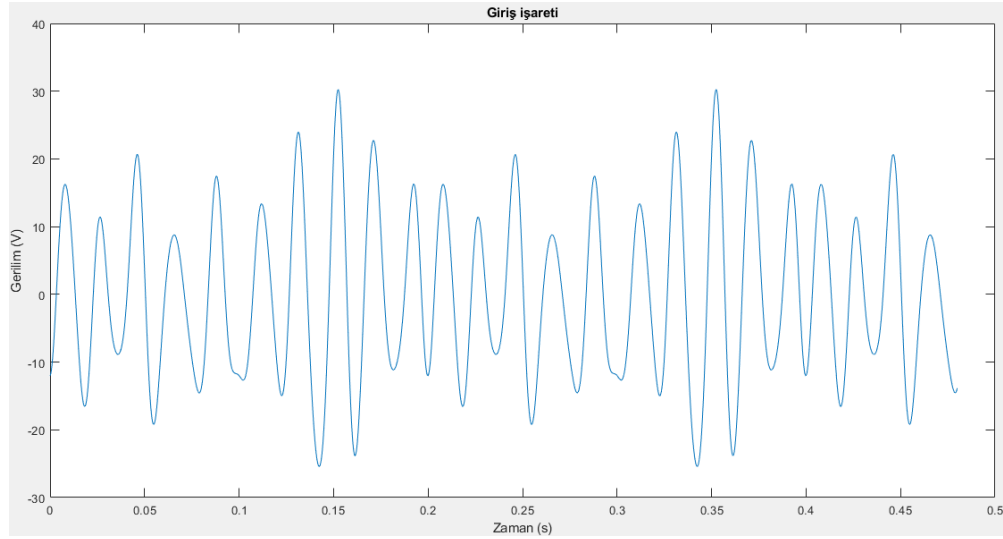
Şekil 4.5. Çizelge 4.3 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)



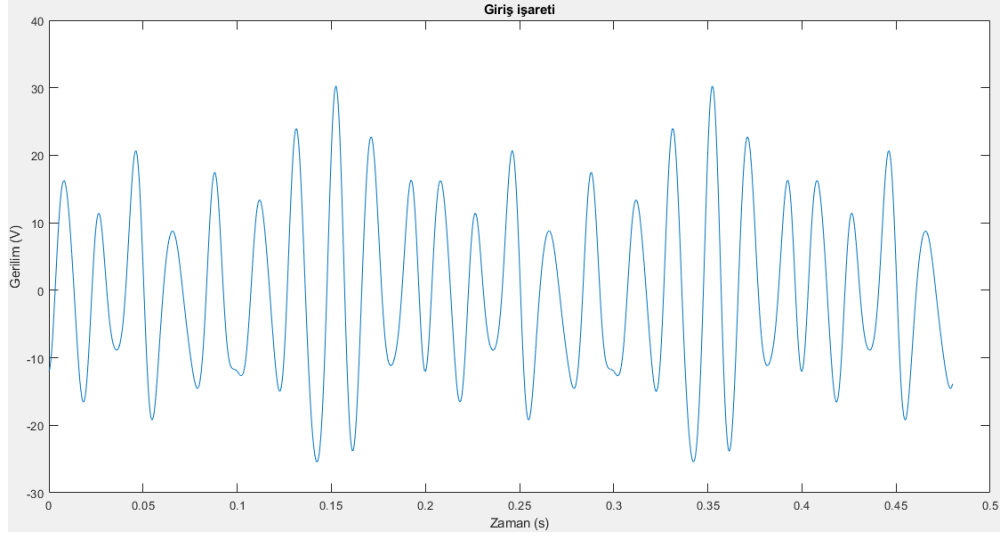
Şekil 4.6. Çizelge 4.3 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)

Çizelge 4.4. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$

| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 1,7082 | 26,5651 | 5,0000 |
| 0,9549 | 90,0000 | 15,0000 |
| 2,8471 | -26,5651 | 25,0000 |
| 1,9099 | -90,0000 | 35,0000 |
| 8,5412 | 26,5651 | 45,0000 |
| 12,0000 | 0,0000 | 50,0000 |
| 8,5412 | 26,5651 | 55,0000 |
| 1,9099 | -90,0000 | 65,0000 |
| 2,8471 | -26,5651 | 75,0000 |
| 0,9549 | 90,0000 | 85,0000 |
| 1,7082 | 26,5651 | 95,0000 |



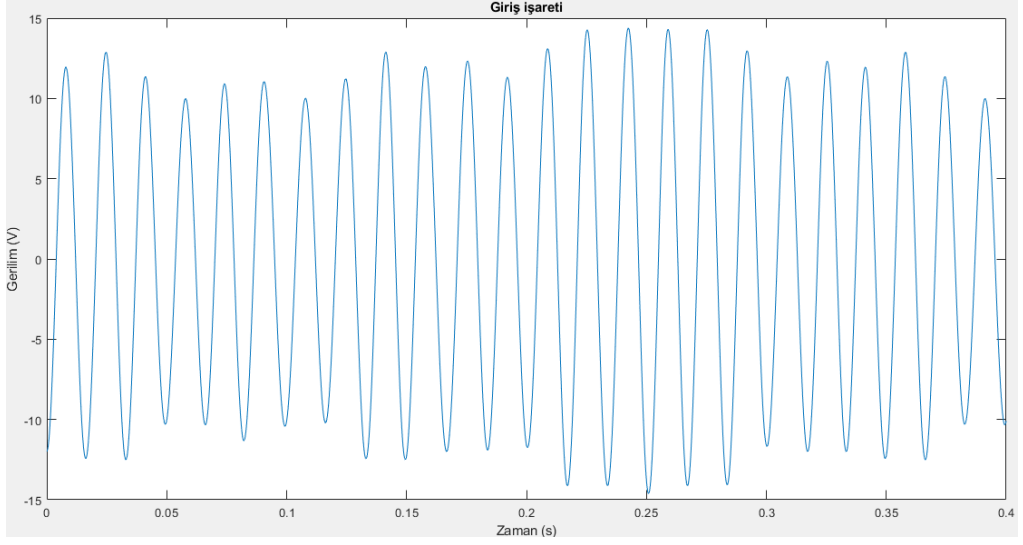
Şekil 4.7. Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$)



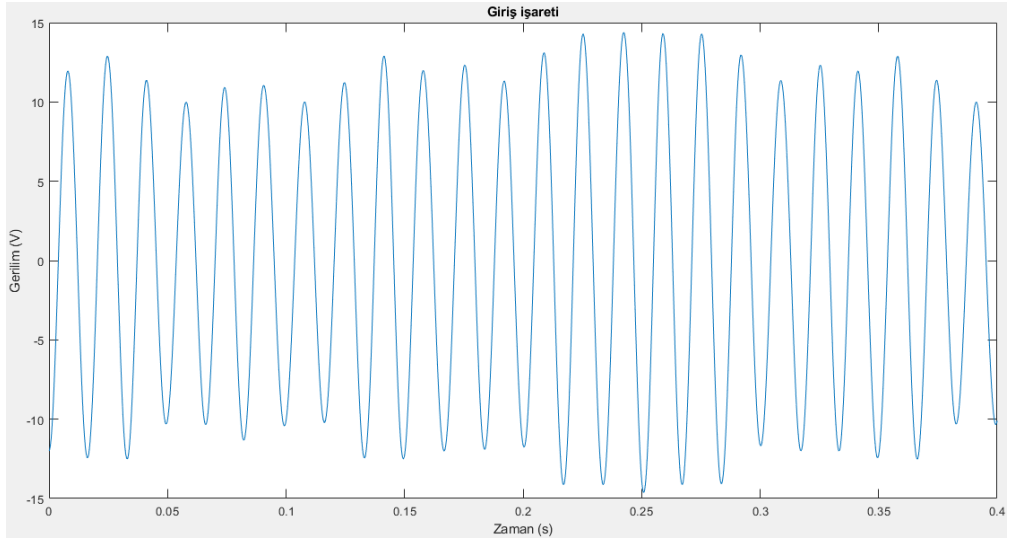
Şekil 4.8 Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$)

Çizelge 4.5. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$

| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 0,8541 | 26,5651 | 48,7500 |
| 0,4775 | 90,0000 | 51,2500 |
| 1,4235 | -26,5651 | 53,7500 |
| 0,9549 | -90,0000 | 56,2500 |
| 4,2706 | 26,5651 | 58,7500 |
| 12,0000 | 0,0000 | 60,0000 |
| 4,2706 | 26,5651 | 61,2500 |
| 0,9549 | -90,0000 | 63,7500 |
| 1,4235 | -26,5651 | 66,2500 |
| 0,4775 | 90,0000 | 68,7500 |
| 0,8541 | 26,5651 | 71,2500 |



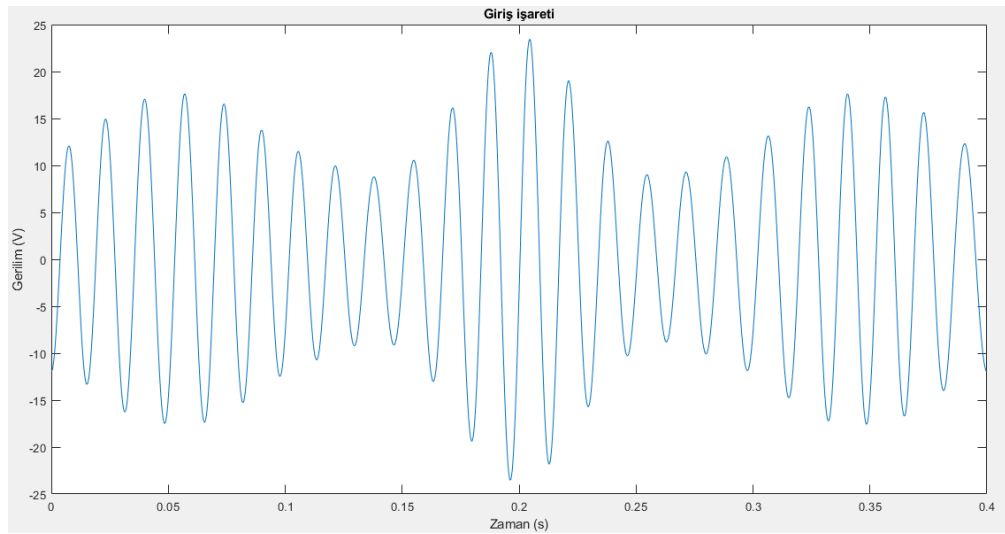
Şekil 4.9. Çizelge 4.5 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)



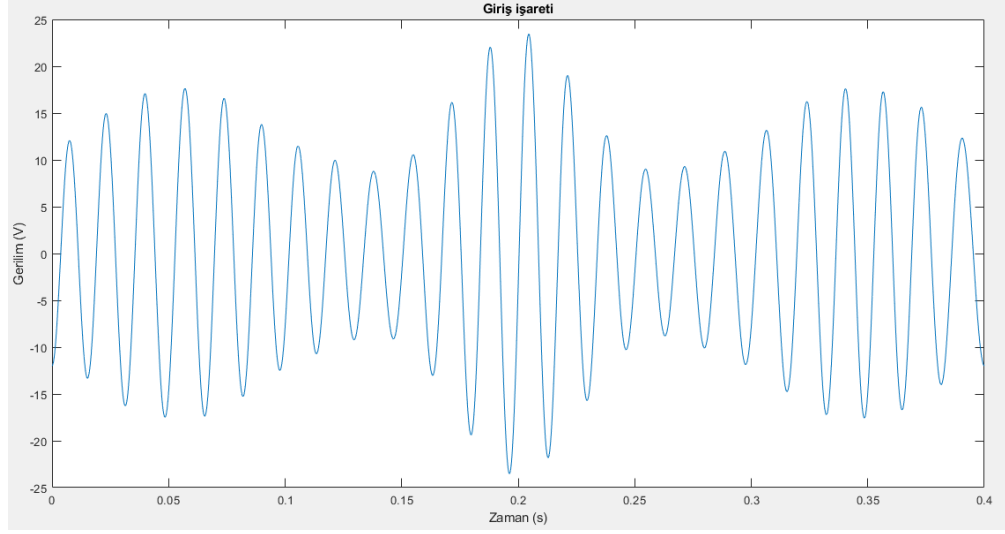
Şekil 4.10. Çizelge 4.5 için üretilen işaret ($f_{ornek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)

Çizelge 4.6. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$

| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 1,7082 | 26,5651 | 48,7500 |
| 0,9549 | 90,0000 | 51,2500 |
| 2,8471 | -26,5651 | 53,7500 |
| 1,9099 | -90,0000 | 56,2500 |
| 8,5412 | 26,5651 | 58,7500 |
| 12,0000 | 0,0000 | 60,0000 |
| 8,5412 | 26,5651 | 61,2500 |
| 1,9099 | -90,0000 | 63,7500 |
| 2,8471 | -26,5651 | 66,2500 |
| 0,9549 | 90,0000 | 68,7500 |
| 1,7082 | 26,5651 | 71,2500 |



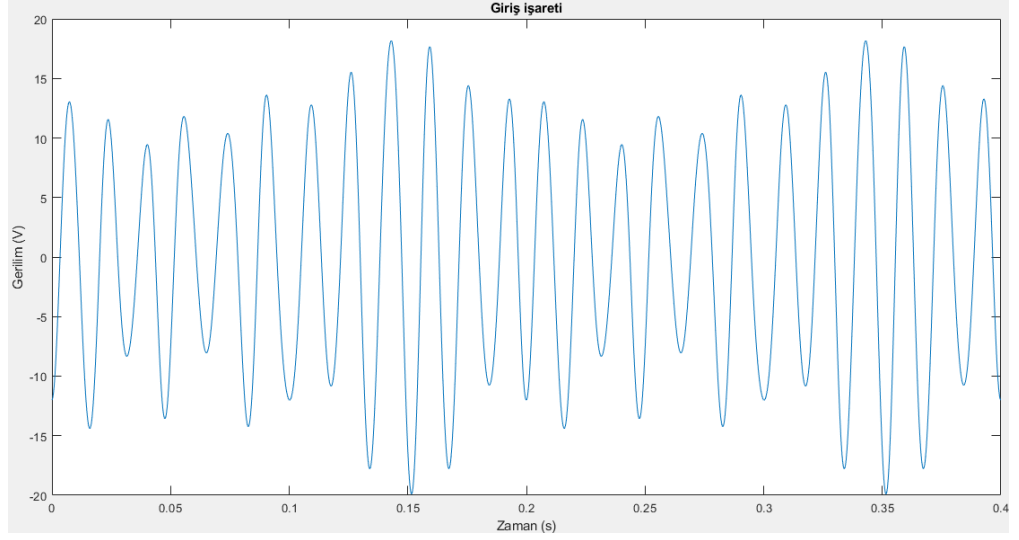
Şekil 4.11. Çizelge 4.6 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$)



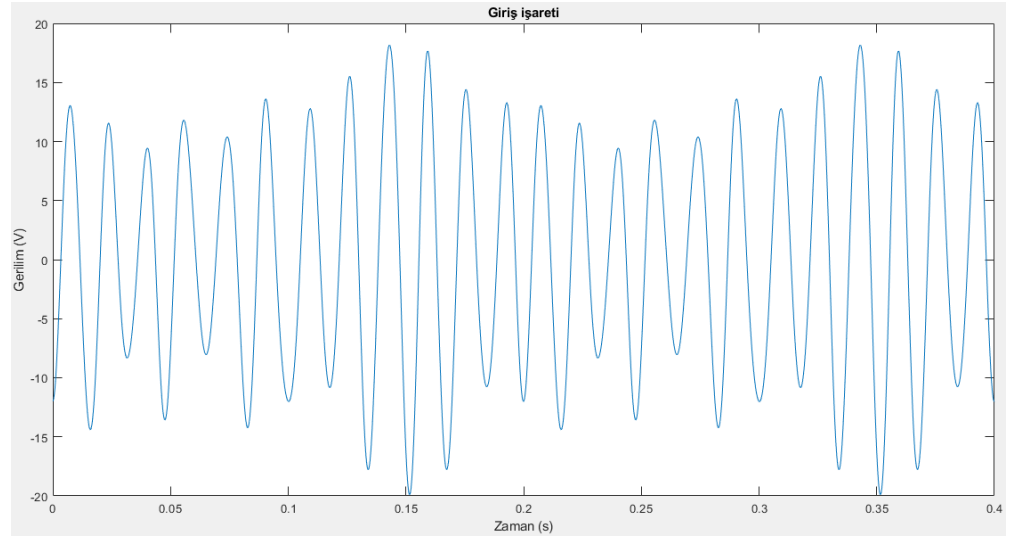
Şekil 4.12. Çizelge 4.6 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 5 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$)

Çizelge 4.7. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$

| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 0,8541 | 26,5651 | 15,0000 |
| 0,4775 | 90,0000 | 25,0000 |
| 1,4235 | -26,5651 | 35,0000 |
| 0,9549 | -90,0000 | 45,0000 |
| 4,2706 | 26,5651 | 55,0000 |
| 12,0000 | 0,0000 | 60,0000 |
| 4,2706 | 26,5651 | 65,0000 |
| 0,9549 | -90,0000 | 75,0000 |
| 1,4235 | -26,5651 | 85,0000 |
| 0,4775 | 90,0000 | 95,0000 |
| 0,8541 | 26,5651 | 105,0000 |



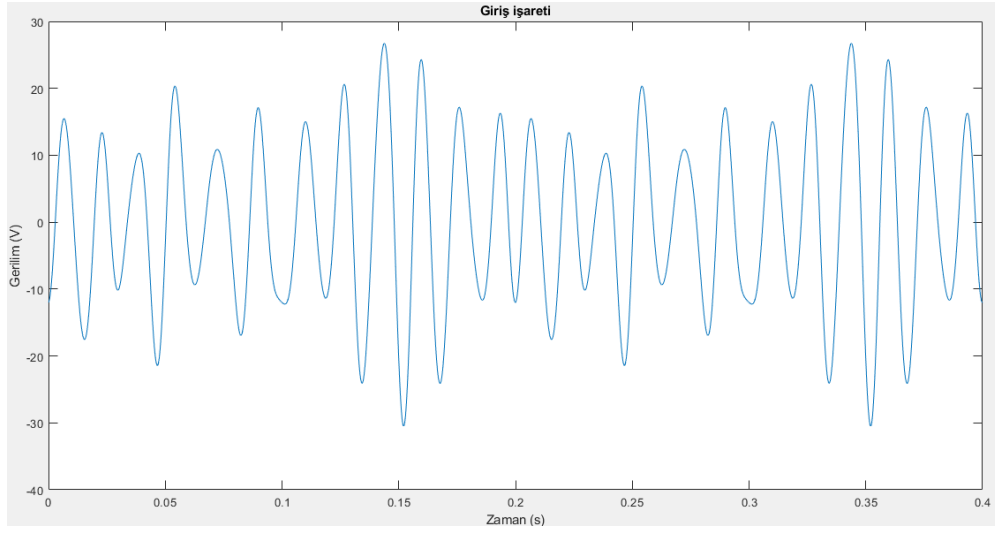
Şekil 4.13. Çizelge 4.7 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)



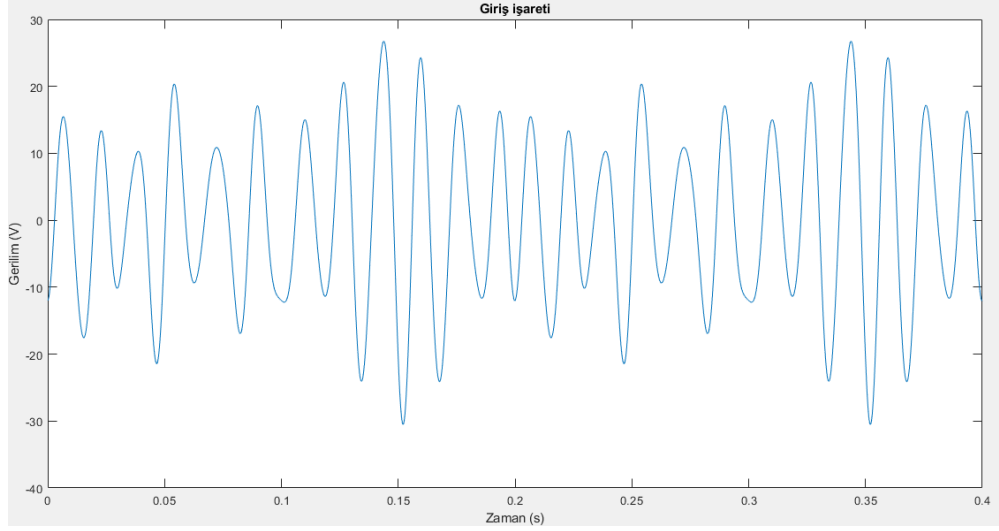
Şekil 4.14. Çizelge 4.7 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 100 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 12 \text{ V}$)

Çizelge 4.8. Üretilen işaret parametreleri; $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$ $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$

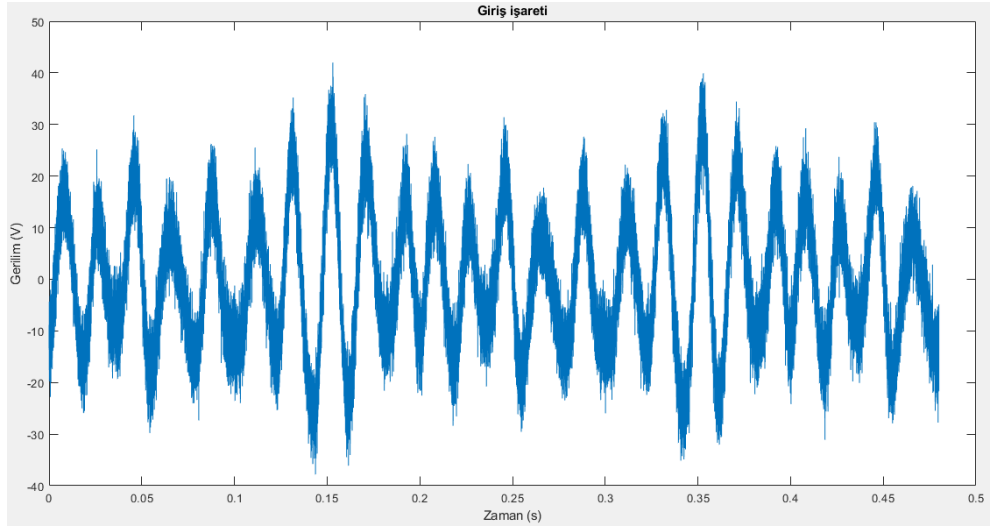
| Genlik (V) | Faz (Derece) | Frekans (Hz) |
|------------|--------------|--------------|
| 1,7082 | 26,5651 | 15,0000 |
| 0,9549 | 90,0000 | 25,0000 |
| 2,8471 | -26,5651 | 35,0000 |
| 1,9099 | -90,0000 | 45,0000 |
| 8,5412 | 26,5651 | 55,0000 |
| 12,0000 | 0,0000 | 60,0000 |
| 8,5412 | 26,5651 | 65,0000 |
| 1,9099 | -90,0000 | 75,0000 |
| 2,8471 | -26,5651 | 85,0000 |
| 0,9549 | 90,0000 | 95,0000 |
| 1,7082 | 26,5651 | 105,0000 |



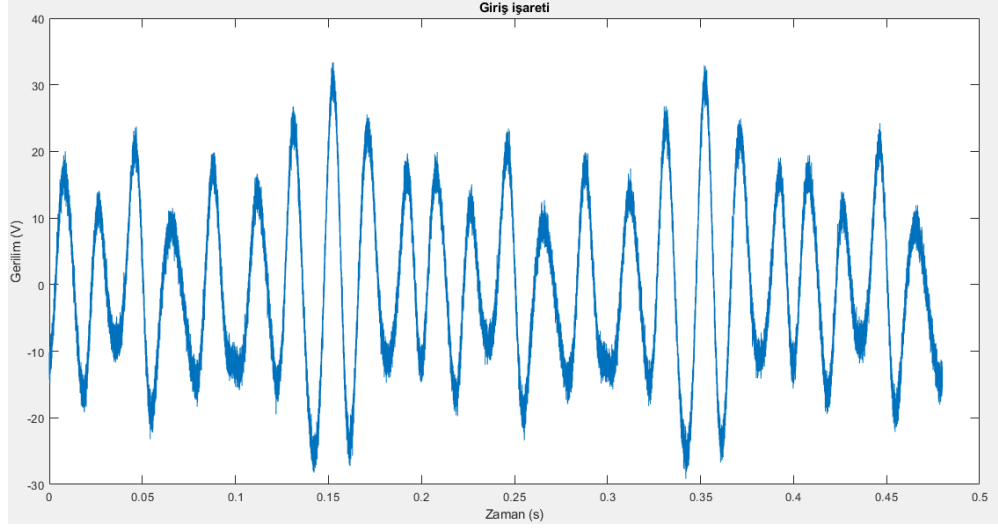
Şekil 4.15. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($f_{örnek} = 8 \text{ kHz}$, $f_{temel} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{adım} = 24 \text{ V}$)



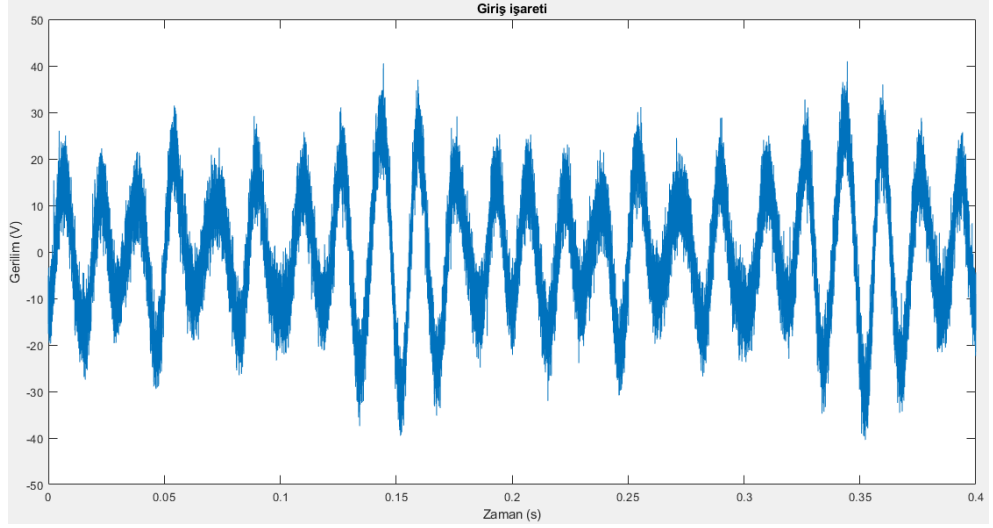
Şekil 4.16. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$,
 $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)



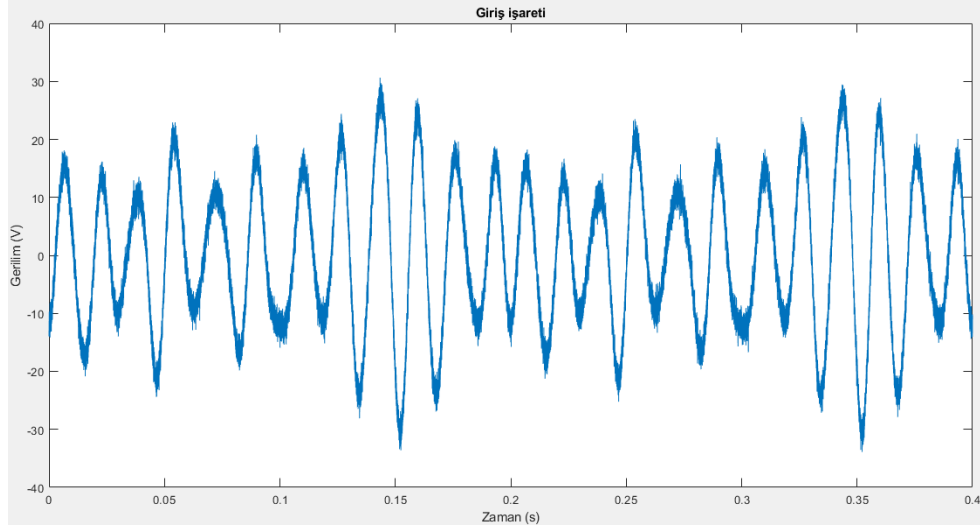
Şekil 4.17. Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($SNR = 10 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} =$
 50 Hz , $f_{\text{MPPT}} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)



Şekil 4.18. Çizelge 4.4 için üretilen işaret ($SNR = 20 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 50 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)



Şekil 4.19. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($SNR = 10 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)



Şekil 4.20. Çizelge 4.8 için üretilen işaret ($SNR = 20 \text{ dB}$, $f_{\text{örnek}} = 100 \text{ kHz}$, $f_{\text{temel}} = 60 \text{ Hz}$, $f_{MPPPT} = 20 \text{ Hz}$, $V_{\text{adım}} = 24 \text{ V}$)

4.3. Prony Yöntemi ve Önerilen AHD Tabanlı Prony Yöntemi ile Analizler

Bu bölümde, klasik Prony yöntemi ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Bu altbölüm altında kullanılan çizelgelerin başlıklarında kullanılan kısaltmalar sırasıyla; A işaret genliğini ifade etmekte ve Volt biriminde, f frekansı ifade etmekte ve Hz birimindedir. Faz parametresine ait sonuçların birimi ise derecedir. Önerilen yöntem, hem AHD ortalama katsayıları ve hem de AHD fark katsayıları kullanılarak işaret verileri üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar çizelgelerde belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen benzetimlerde önerilen yöntem, 50 Hz ve 60 Hz temel frekansına ve 8 kHz örnekleme frekansına sahip giriş işareti için 5. derece AHD katsayılarını kullanmaktadır. 100 kHz örnekleme frekansına ve 60 Hz temel frekansa sahip giriş işareti için 8. derece; 50 Hz temel frekansa sahip giriş işareti için 9. derece AHD katsayıları kullanılmaktadır. Bunun sebebi, güç işareti içerisindeki en büyük frekans bileşeninin en az iki katı kadar bir çözünürlükte işaretin analiz edilmesinin gerekliliğidir. Bu gereklilik Nyquist Kriteri ile ilişkilidir. Belirtilen AHD dereceleri, en düşük veri sayısı ile en iyi tahminin gerçekleştirilmesi amacıyla mümkün olan azami derecelerdir.

Önerilen yöntem içerisinde frekans ve sönüm parametrelerini hesaplayabilmek için kullanılan polinomun derecesi, başka bir ifadeyle Önerilen yöntemin Prony matrisinin

sütun sayısı, belli bir standardın sağlanabilmesi amacıyla şu şekilde hesaplanmıştır: Bir sonraki AHD katsayı sayısından küçük olmak üzere, en yakın asal sayının seçilmesi vasıtasıyla ilgili matris kurulmuştur. Bunun bir örnekle açıklanması gerekirse, 8 kHz örnekleme frekansına sahip bir işaretin en yüksek bileşeninin 105 Hz olduğu varsayalım. Bu durumda, Nyquist kriteri gereği, seçilebilecek maksimum AHD derecesi 5'tir ($8000/32 = 250$). Ayrıca, 24 periyot ele alındığına göre, 8 kHz örnekleme frekansı için 3841 adet işaret verisi kullanılmıştır. AHD derecesi 5 seçildiği için, 120 adet katsayı mevcuttur $3841/2^5 \cong 120$. Bir sonraki AHD derecesinin katsayı miktarı 60'tır. Bu sayıya en yakın ve bu sayıdan küçük asal sayı 59'dur. Bu nedenle, Önerilen yöntem için Prony matrisi, işaretin 8 kHz'lik örnekleme durumu için $(120 - 59 = 61) \times (59)$ boyutlarına sahip bir matris olarak seçilmiş olur. 100 kHz örnekleme frekansı için değerler, Nyquist kriterini sağlayan en yüksek AHD katsayı sayısının belirlenmesiyle bu yol izlenerek hesaplanır.

Diğer yandan, geleneksel Prony yönteminin yüksek sayıda veri kullanmaktadır. Kullanılan veri sayısı, seçilen polinom derecesine de bağlıdır. Fakat yüksek dereceli polinomun seçilmesi, iyi bir çözümün elde edileceği konusunda bir kesinlik sağlamamaktadır. Bu bilgilerden hareketle, AHD yöntemleri için kullanılan polinom katsayı sayısı n_{AHD} ve kullanılan AHD derecesi p olmak üzere, orijinal Prony yöntemi için kullanılan polinom katsayı sayısı, 8 kHz'lik işaretler için $n_{AHD} \times 2^p$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, 8 kHz işaret için $59 \times 2^5 = 1888$ adet polinom katsayısı seçilmiş olur. Bu sayıdan daha düşük sayılarda da iyi bir çözüm elde edilebilir fakat ne kadar katsayı seçilmesinin uygun olduğuna dair bir ölçüt yoktur. 100 kHz'lik işaretler için orijinal Prony yönteminde belirtilen kıstasın uygulanması oldukça verimsiz olur. Çünkü Prony matrisinin eleman sayısı doğal olarak artacaktır. Bu sebeple ve bir standardın sağlanabilmesi için kullanılacak polinom derecesi, orijinal Prony yöntemi için 1024 olarak belirlenmiştir.

Bu şartlar altında elde edilen sonuçlar, bölüm içerisindeki çizelgelerde ve şekillerde sunulmuştur. Şekiller içerisinde, bulunamayan harmonik bileşenlerin (frekans veya genlik) değerleri, hem bulunan değerlerin çiziminde ve hem de bağıl hata oranları çizimlerinde “-1” büyüklük değerine sahip olarak gösterilmiştir. Çizelgelerde bulunamayan bileşenler “~” işareti ile belirtilmiştir. Bağıl hata oranları “~0” işareti ile

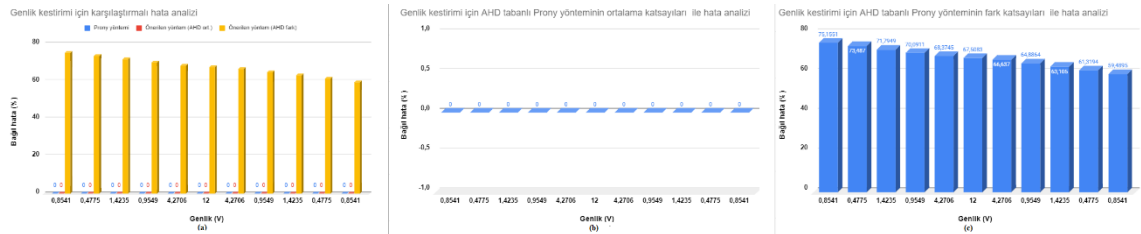
gösterilen bileşenler yaklaşık sıfır anlamına gelmektedir. Bu bileşenler, şekillerde sıfır değerini gösterecek şekilde yerleştirilmiştir. Son olarak, fark katsayıları ile elde edilen değerler, çizelgelerde tamamıyla verilirken, şekiller ele alındığında sadece Şekil 4.21’de değerleri gösterilmiş, ilerleyen şekillerde fark katsayılarına yer verilmemiştir. Bunun sebebi, genliklerde yüksek hata oranlarının elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, fark katsayılarının frekans kestiriminde, ortalama katsayılarındaki gibi başarılı sonuçlar verdiği, çizelgelerde görülmektedir.

Çizelge 4.9. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.1’deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|----------|---------|----------------------------------|----------|---------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,8541 | - 26,5651 | 38,75 | 0,8541 | -26,5651 | 38,7500 | 0,2122 | 63,4349 | 38,7500 |
| 0,4775 | - 90,0000 | 41,25 | 0,4775 | -90,0000 | 41,2500 | 0,1266 | 0,0000 | 41,2500 |
| 1,4235 | 26,5651 | 43,75 | 1,4235 | 26,5651 | 43,7500 | 0,4015 | -63,4349 | 43,7500 |
| 0,9549 | - 90,0000 | 46,25 | 0,9549 | -90,0000 | 46,2500 | 0,2856 | 0,0000 | 46,2500 |
| 4,2706 | - 26,5651 | 48,75 | 4,2706 | -26,5651 | 48,7500 | 1,3506 | 63,4349 | 48,7500 |
| 12,0000 | 0,0000 | 50 | 12,0000 | 0,0000 | 50,0000 | 3,8990 | 90,0000 | 50,0000 |
| 4,2706 | -26,565 | 51,25 | 4,2706 | -26,565 | 51,2500 | 1,4248 | 63,435 | 51,2500 |
| 0,9549 | 90,0000 | 53,75 | 0,9549 | -90,0000 | 53,7500 | 0,3353 | 0,0000 | 53,7500 |
| 1,4235 | 26,5651 | 56,25 | 1,4235 | 26,5651 | 56,2500 | 0,5252 | -63,4349 | 56,2500 |
| 0,4775 | - 90,0000 | 58,75 | 0,4775 | -90,0000 | 58,7500 | 0,1847 | 0,0000 | 58,7500 |
| 0,8541 | 26,5651 | 61,25 | 0,8541 | -26,5651 | 61,2500 | 0,3460 | 63,4349 | 61,2500 |

Çizelge 4.10. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.1’deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------|----|--------------------------------------|--------|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 75,1551 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 73,4870 | 100,0000 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 71,7949 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 70,0911 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 68,3745 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 67,5083 | >> | ~0 |
| ~0 | 0,0004 | ~0 | ~0 | 0,0004 | ~0 | 66,6370 | 138,7907 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 64,8864 | 100,0000 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 63,1050 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 61,3194 | 100,0000 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 59,4895 | 138,7904 | ~0 |



Şekil 4.21. Çizelge 4.10’un genlik değerleri için sırasıyla Prony, AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem ve AHD farklarıyla ile önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi (b) Önerilen yöntemin AHD ortalamaları ile hata analizi (c) Önerilen yöntemin AHD farkları ile hata analizi



Şekil 4.22. Çizelge 4.10'un frekans değerleri için sırasıyla Prony, AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem ve AHD farklarıyla ile önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi (b) Önerilen yöntemin AHD ortalamaları ile hata analizi (c) Önerilen yöntemin AHD farkları ile hata analizi

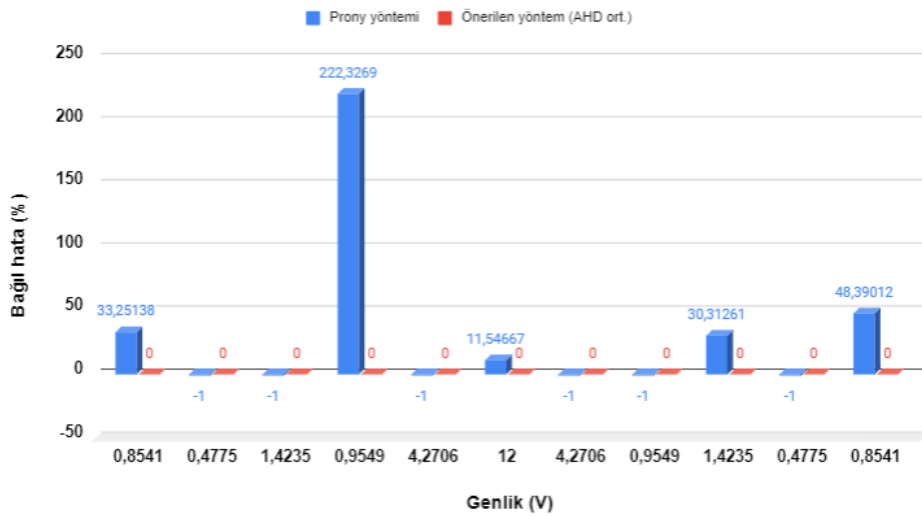
Çizelge 4.11. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.1'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,5701 | 43,2894 | 39,5534 | 0,8541 | -26,5651 | 38,75 | 0,2751 | 63,4349 | 38,75 |
| ~ | ~ | ~ | 0,4775 | -90 | 41,25 | 0,1645 | 0 | 41,25 |
| ~ | ~ | ~ | 1,4235 | 26,5651 | 43,75 | 0,5226 | - 63,4349 | 43,75 |
| 3,0779 | - 51,4497 | 46,5815 | 0,9549 | -90 | 46,25 | 0,3725 | 0 | 46,25 |
| ~ | ~ | ~ | 4,2706 | -26,565 | 48,75 | 1,7658 | 63,4349 | 48,75 |
| 10,6144 | - 23,5974 | 49,9813 | 12 | 0 | 50 | 5,1036 | 90 | 50 |
| ~ | ~ | ~ | 4,2706 | -26,565 | 51,25 | 1,8672 | 63,435 | 51,25 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 53,75 | 0,4406 | 0 | 53,75 |
| 0,992 | 76,5024 | 55,4085 | 1,4235 | 26,5651 | 56,25 | 0,6918 | - 63,4349 | 56,25 |
| ~ | ~ | ~ | 0,4775 | -90 | 58,75 | 0,244 | 0 | 58,75 |
| 0,4408 | -32,398 | 61,08 | 0,8541 | -26,5651 | 61,25 | 0,4584 | 63,4349 | 61,25 |

Çizelge 4.12. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.1’deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

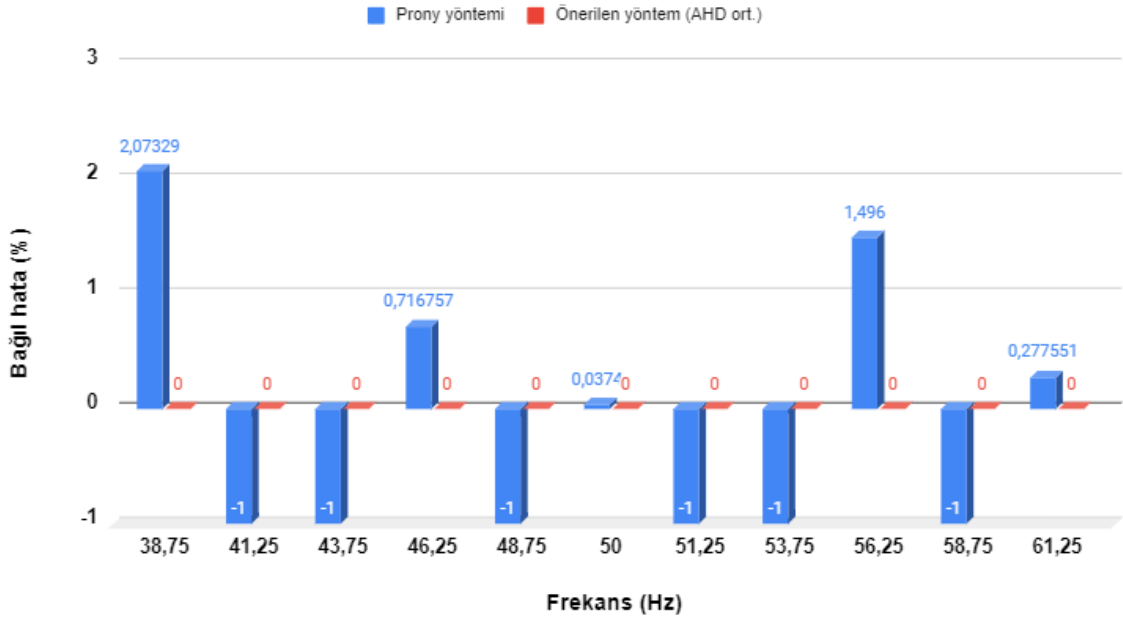
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama- Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|---|--------|----|-------------------------------------|----------|---|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| 33,25138 | 62,95591 | 2,07329 | ~0 | ~0 | ~0 | 67,79066 | 138,7904 | 0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 65,54974 | 100 | 0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 63,28767 | 138,79 | 0 |
| 222,3269 | -42,8337 | 0,716757 | ~0 | ~0 | ~0 | 60,99068 | 100 | 0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 58,65218 | 138,7904 | 0 |
| 11,54667 | -23,5974 | 0,0374 | ~0 | ~0 | ~0 | 57,47 | 90 | 0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | 0,0004 | ~0 | 56,27781 | 138,7907 | 0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 53,85904 | 100 | 0 |
| 30,31261 | -187,981 | 1,496 | ~0 | ~0 | ~0 | 51,40148 | 138,79 | 0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 48,90052 | 100 | 0 |
| 48,39012 | 21,957 | 0,277551 | ~0 | ~0 | ~0 | 46,32947 | 138,7904 | 0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.23. Çizelge 4.12’nin genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.24. Çizelge 4.12'nin frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.13. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.2'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)*

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 1,7082 | -26,5651 | 38,75 | 1,7082 | -26,5651 | 38,75 | 0,209 | 63,4349 | 38,75 |
| 0,9549 | 90 | 41,25 | 0,9549 | 90 | 41,25 | 0,1244 | 0 | 41,25 |
| 2,8471 | 26,5651 | 43,75 | 2,8471 | 26,5651 | 43,75 | 0,3938 | -63,4349 | 43,75 |
| 1,9099 | 90 | 46,25 | 1,9099 | -90 | 46,25 | 0,2795 | 0 | 46,25 |
| 8,5411 | -26,5651 | 48,75 | 8,5411 | -26,565 | 48,75 | 1,3184 | 63,435 | 48,75 |
| 12 | 0 | 50 | 12 | 0 | 50 | 1,9006 | 90 | 50 |
| 8,5412 | -26,5651 | 51,25 | 8,5412 | -26,5651 | 51,25 | 1,3872 | 63,435 | 51,25 |

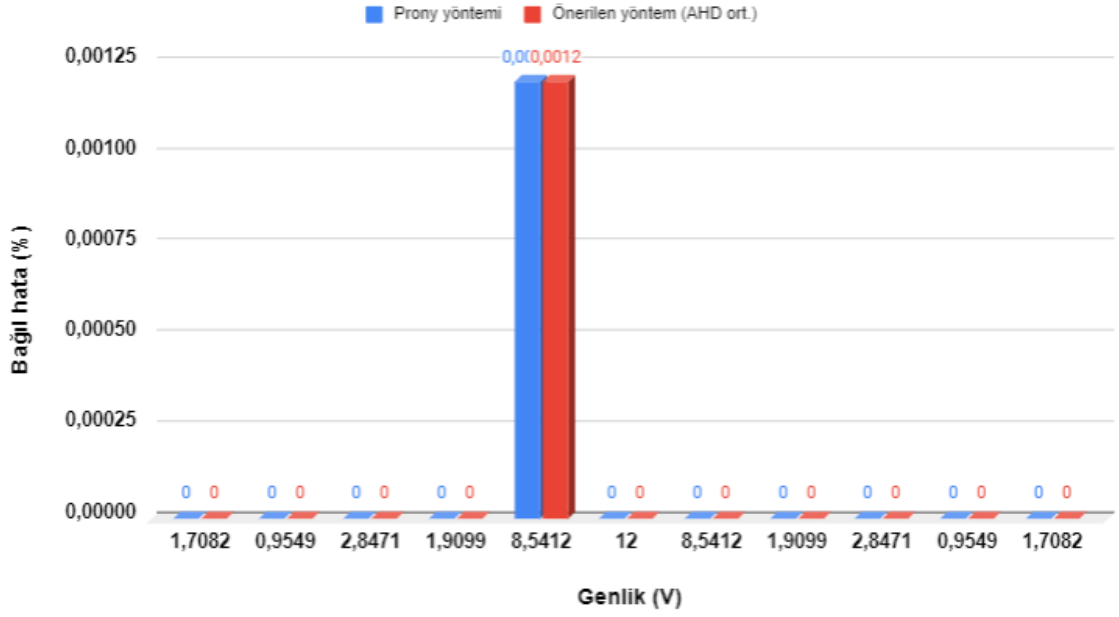
Çizelge 4.13. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.2'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)* (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 1,9099 | -90 | 53,75 | 1,9099 | 90 | 53,75 | 0,3256 | 0 | 53,75 |
| 2,8471 | 26,5651 | 56,25 | 2,8471 | 26,5651 | 56,25 | 0,5084 | -63,4349 | 56,25 |
| 0,9549 | 90 | 58,75 | 0,9549 | 90 | 58,75 | 0,1783 | 0 | 58,75 |
| 1,7082 | - 26,5651 | 61,25 | 1,7082 | -26,5651 | 61,25 | 0,3328 | 63,4349 | 61,25 |

Çizelge 4.14. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.2'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)*

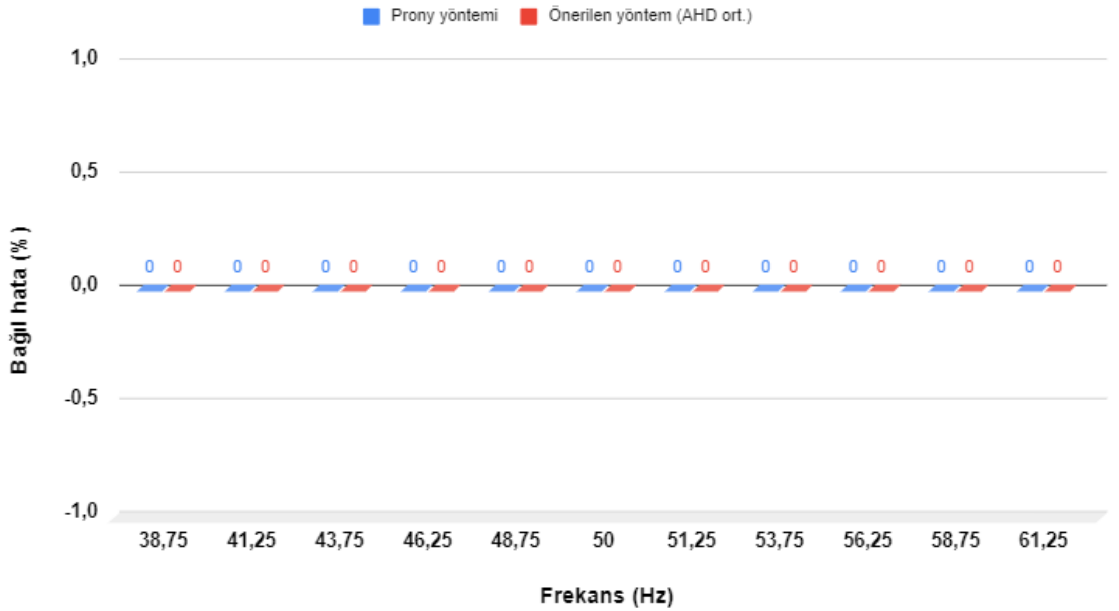
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|----|--------------------------------------|--------|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 87,7649 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 86,97246 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 86,16838 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 85,36573 | 100 | ~0 |
| 0,0012 | ~0 | ~0 | 0,0012 | 0,0004 | ~0 | 84,56423 | 138,7907 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 84,16167 | 90 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 83,75872 | 138,7907 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 82,95199 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 82,14323 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 81,32789 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 80,5175 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.25. Çizelge 4.14'ün genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.26. Çizelge 4.14'ün frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.15. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.2'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)*

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 1,6338 | 16,3007 | 39,1291 | 1,7082 | -26,5651 | 38,75 | 0,5503 | 63,4349 | 38,75 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 41,25 | 0,329 | 0 | 41,25 |
| 10,6621 | - 12,7151 | 42,9951 | 2,8471 | 26,5651 | 43,75 | 1,0453 | - 63,4349 | 43,75 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | -90 | 46,25 | 0,7451 | 0 | 46,25 |
| 0,0123 | 88,0186 | 49,2746 | 8,5412 | -26,565 | 48,75 | 3,5316 | 63,4349 | 48,75 |
| ~ | ~ | ~ | 12 | 0 | 50 | 5,1036 | 90 | 50 |
| 26,6792 | 23,3576 | 52,3202 | 8,5411 | -26,5651 | 51,25 | 3,7344 | 63,435 | 51,25 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 53,75 | 0,8812 | 0 | 53,75 |
| 0,6241 | - 76,0333 | 56,8906 | 2,8471 | 26,5651 | 56,25 | 1,3837 | - 63,4349 | 56,25 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 58,75 | 0,4881 | 0 | 58,75 |
| 2,7069 | - 41,4627 | 61,2031 | 1,7082 | -26,5651 | 61,25 | 0,9169 | 63,4349 | 61,25 |

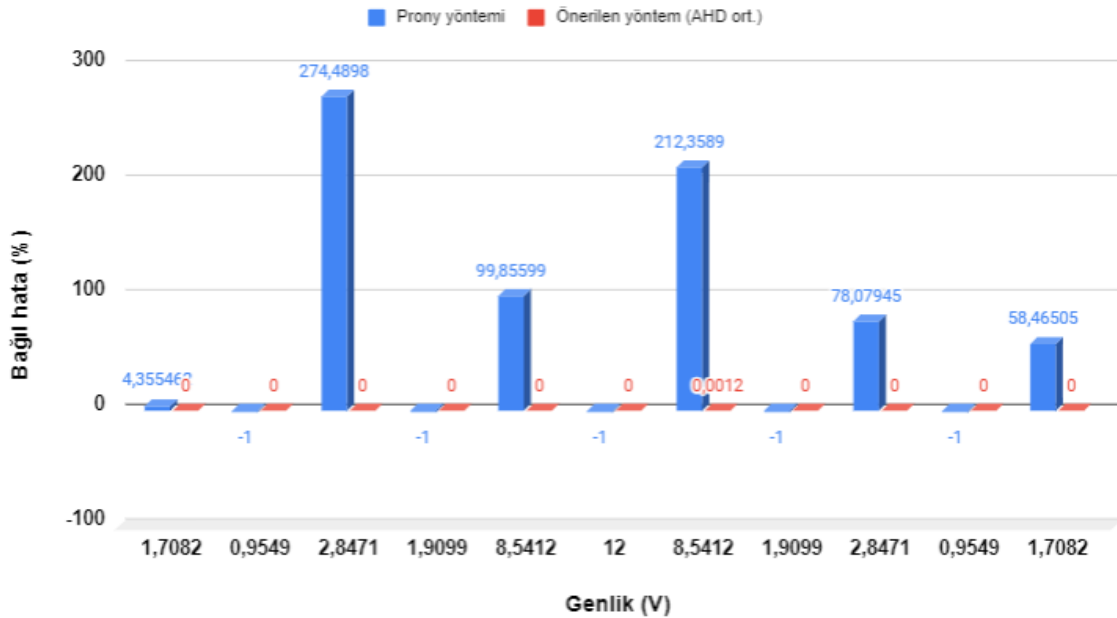
Çizelge 4.16. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.2'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)*

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| 4,355462 | 38,63867 | 0,978323 | ~0 | ~0 | ~0 | 67,7848 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 65,54613 | 100 | ~0 |
| 274,4898 | 52,1361 | 1,725486 | ~0 | ~0 | ~0 | 63,28545 | 138,79 | ~0 |

Çizelge 4.16. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.2'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)* (devam)

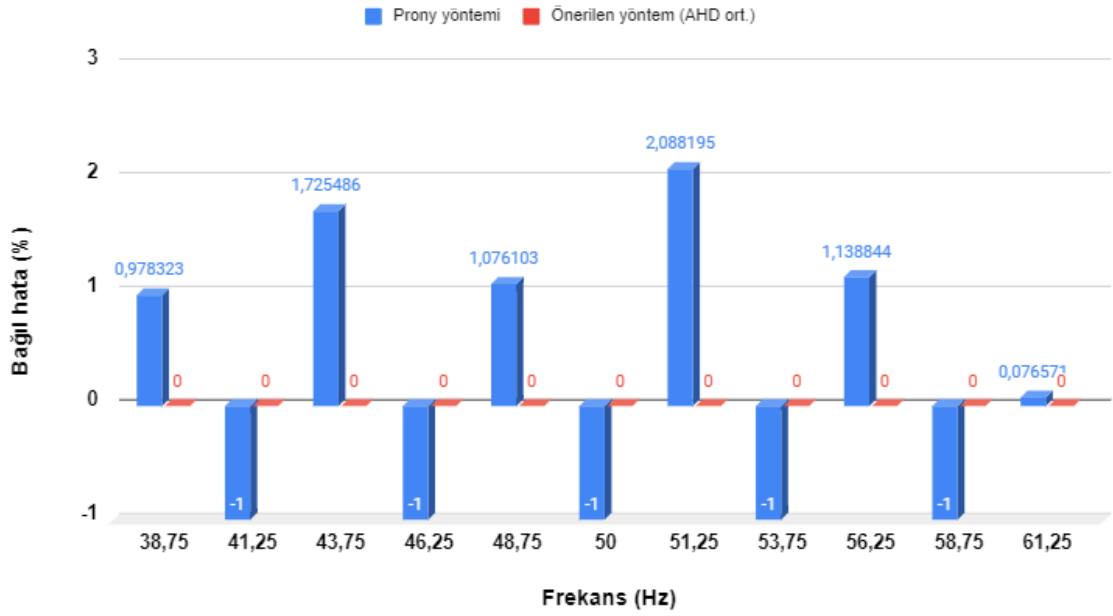
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|---|--------|----|-------------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 60,98749 | 100 | ~0 |
| 99,85599 | 231,3317 | 1,076103 | ~0 | 0,0004 | ~0 | 58,65218 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 57,47 | 90 | ~0 |
| 212,3589 | 12,07411 | 2,088195 | 0,0012 | ~0 | ~0 | 56,27781 | 138,7907 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 53,86146 | 100 | ~0 |
| 78,07945 | 186,215 | 1,138844 | ~0 | ~0 | ~0 | 51,39967 | 138,79 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 48,8847 | 100 | ~0 |
| 58,46505 | 56,07959 | 0,076571 | ~0 | ~0 | ~0 | 46,32362 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.27. Çizelge 4.16'nın genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.28. Çizelge 4.16'nın frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.17. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.3'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,8541 | -26,5651 | 5 | 0,8541 | -26,5651 | 5 | 0,0268 | 63,4349 | 5 |
| 0,4775 | 90 | 15 | 0,4775 | -90 | 15 | 0,0451 | 0 | 15 |
| 1,4235 | 26,5651 | 25 | 1,4235 | 26,5651 | 25 | 0,2255 | -63,4349 | 25 |
| 0,9549 | 90 | 35 | 0,9549 | 90 | 35 | 0,2135 | 0 | 35 |
| 4,2706 | -26,5651 | 45 | 4,2706 | -26,5651 | 45 | 1,2407 | 63,4349 | 45 |
| 12 | 0 | 50 | 12 | 0 | 50 | 3,899 | 90 | 50 |
| 4,2706 | -26,5651 | 55 | 4,2706 | -26,5651 | 55 | 1,5375 | 63,4349 | 55 |

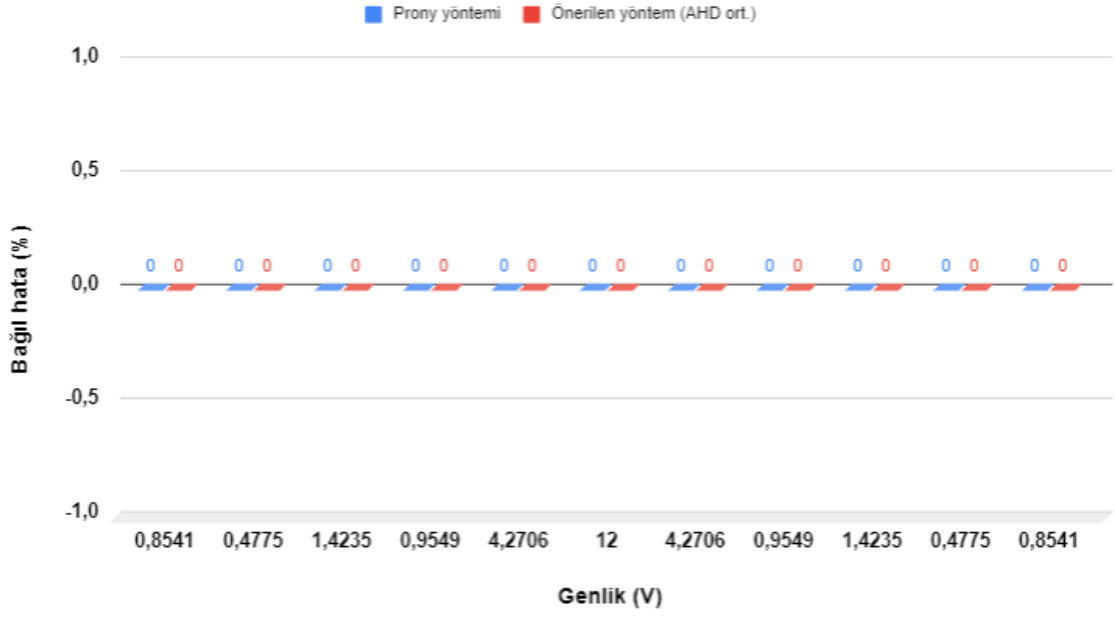
Çizelge 4.17. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.3'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,9549 | -90 | 65 | 0,9549 | 90 | 65 | 0,4132 | 0 | 65 |
| 1,4235 | 26,5651 | 75 | 1,4235 | 26,5651 | 75 | 0,7253 | -63,4349 | 75 |
| 0,4775 | -90 | 85 | 0,4775 | 90 | 85 | 0,2824 | 0 | 85 |
| 0,8541 | - 26,5651 | 95 | 0,8541 | -26,5651 | 95 | 0,5805 | 63,4349 | 95 |

Çizelge 4.18. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.3'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

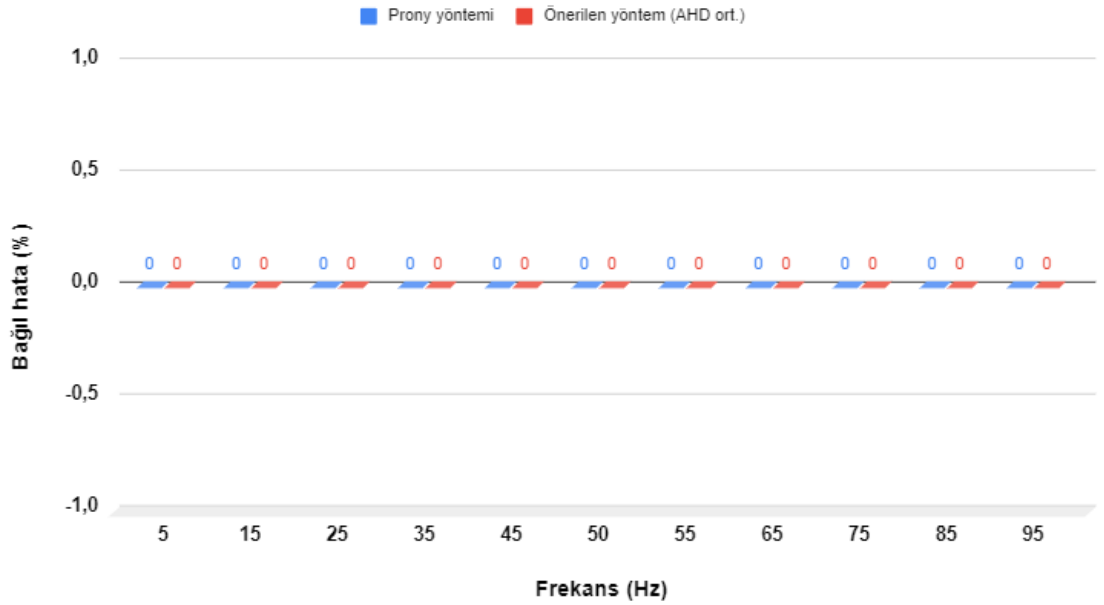
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|----|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 96,86219 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 90,55497 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 84,15876 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 77,64164 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 70,94788 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 67,50833 | 90 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 63,99803 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 56,72845 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 49,04812 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 40,85864 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 32,03372 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.29. Çizelge 4.18'in genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.30. Çizelge 4.18'in frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.19. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.3'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 0,8541 | -26,5651 | 5 | 0,0344 | 63,4349 | 5 |
| ~ | ~ | ~ | 0,4775 | 90 | 15 | 0,0579 | 0 | 15 |
| 2,7661 | 50,9459 | 25,4146 | 1,4235 | 26,5651 | 25 | 0,2901 | - 63,4349 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 35 | 0,2761 | 0 | 35 |
| 1,9895 | 23,0797 | 48,2061 | 4,2706 | -26,5651 | 45 | 1,6168 | 63,4349 | 45 |
| 3,1677 | 64,7597 | 52,7736 | 12 | 0 | 50 | 5,1036 | 90 | 50 |
| ~ | ~ | ~ | 4,2706 | -26,5651 | 55 | 2,0227 | 63,4349 | 55 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 65 | 0,5503 | 0 | 65 |
| 0,2615 | - 59,9248 | 73,3666 | 1,4235 | 26,5651 | 75 | 0,9806 | - 63,4349 | 75 |
| 0,2781 | - 29,3402 | 83,2699 | 0,4775 | 90 | 85 | 0,389 | 0 | 85 |
| 0,6585 | -8,3496 | 94,9864 | 0,8541 | -26,5651 | 95 | 0,8184 | 63,4349 | 95 |

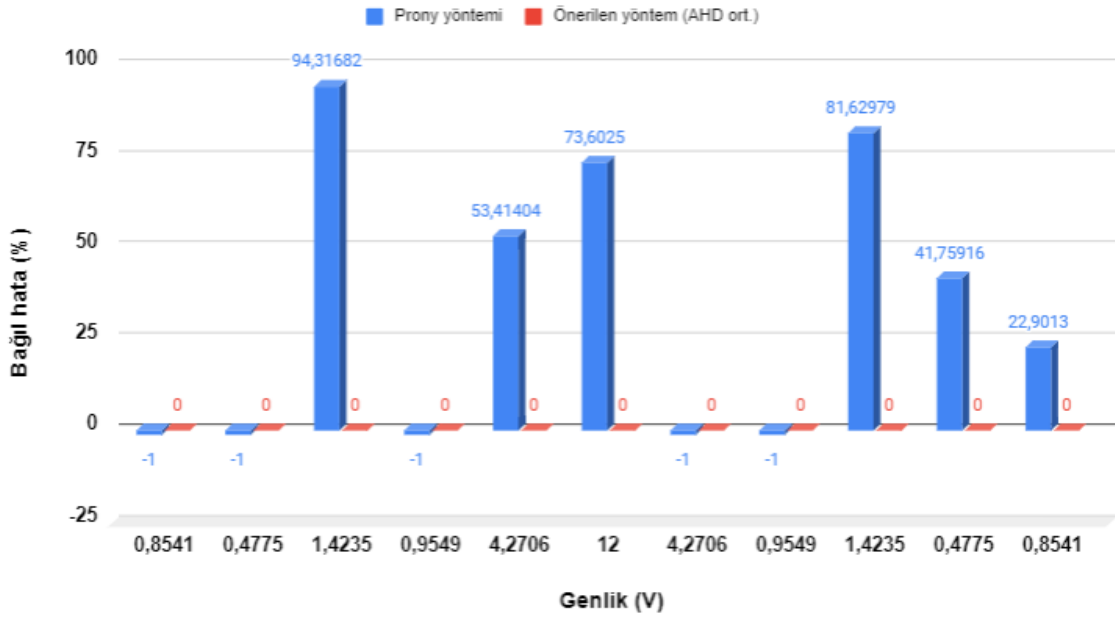
Çizelge 4.20. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.3'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 95,97237 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 87,87435 | 100 | ~0 |
| 94,31682 | - 91,7776 | 1,6584 | ~0 | ~0 | ~0 | 79,62065 | 138,79 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 71,08598 | 100 | ~0 |

Çizelge 4.20 Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.3'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

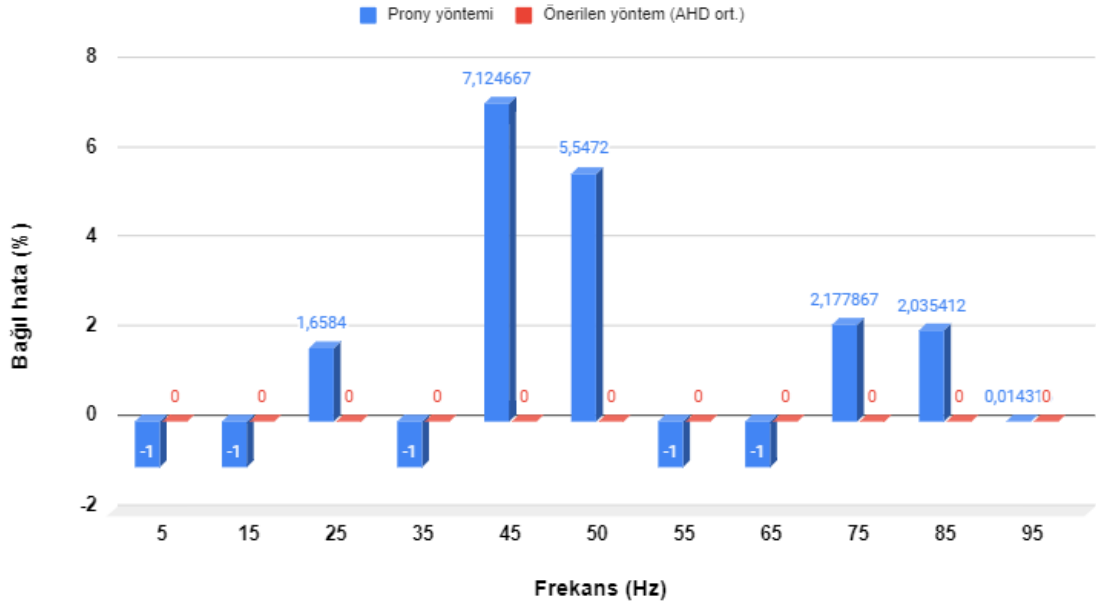
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | | |
|---------------|-----|----------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f | |
| 53,41404 | | 13,12022 | 7,124667 | ~0 | ~0 | ~0 | 62,14115 | 138,7904 | ~0 |
| 73,6025 | | 64,7597 | 5,5472 | ~0 | ~0 | ~0 | 57,47 | 90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 52,63663 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 42,37093 | 100 | ~0 |
| 81,62979 | | -125,577 | 2,177867 | ~0 | ~0 | ~0 | 31,11345 | 138,79 | ~0 |
| 41,75916 | | 67,39978 | 2,035412 | ~0 | ~0 | ~0 | 18,53403 | 100 | ~0 |
| 22,9013 | | 68,56929 | 0,014316 | ~0 | ~0 | ~0 | 4,179838 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.31. Çizelge 4.20'nin genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.32. Çizelge 4.20'nin frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.21. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)**

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 1,7082 | -26,5651 | 5 | 1,7082 | -26,5651 | 5 | 0,0537 | 63,4349 | 5 |
| 0,9549 | -90 | 15 | 0,9549 | -90 | 15 | 0,0903 | 0 | 15 |
| 2,8471 | 26,5651 | 25 | 2,8471 | 26,5651 | 25 | 0,4509 | -63,4349 | 25 |
| 1,9099 | -90 | 35 | 1,9099 | -90 | 35 | 0,4269 | 0 | 35 |
| 8,5412 | -26,5651 | 45 | 8,5412 | -26,5651 | 45 | 2,4814 | 63,4349 | 45 |
| 12 | 0 | 50 | 12 | 0 | 50 | 3,899 | 90 | 50 |
| 8,5412 | -26,5651 | 55 | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 3,075 | 63,4349 | 55 |

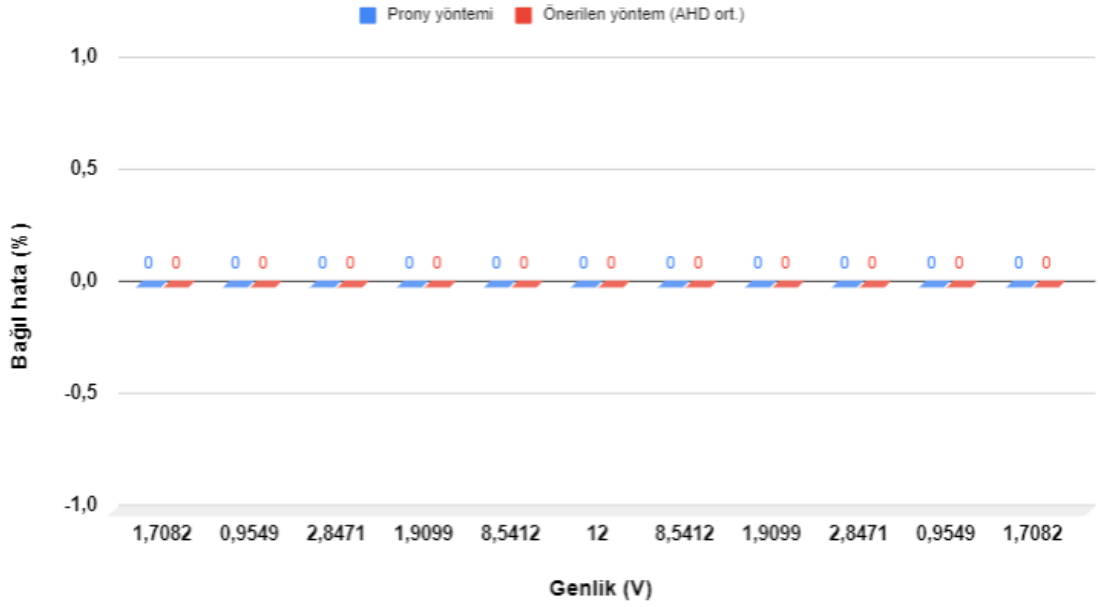
Çizelge 4.21. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)** (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 1,9099 | -90 | 65 | 1,9099 | 90 | 65 | 0,8265 | 0 | 65 |
| 2,8471 | 26,5651 | 75 | 2,8471 | 26,5651 | 75 | 1,4506 | -63,4349 | 75 |
| 0,9549 | -90 | 85 | 0,9549 | 90 | 85 | 0,5647 | 0 | 85 |
| 1,7082 | - 26,5651 | 95 | 1,7082 | -26,5651 | 95 | 1,1609 | 63,4349 | 95 |
| --- | --- | --- | 0,0223 | 4,5353 | 20,8139 | --- | --- | --- |
| --- | --- | --- | 0,0243 | 22,5704 | 104,147 | --- | --- | --- |

Çizelge 4.22. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

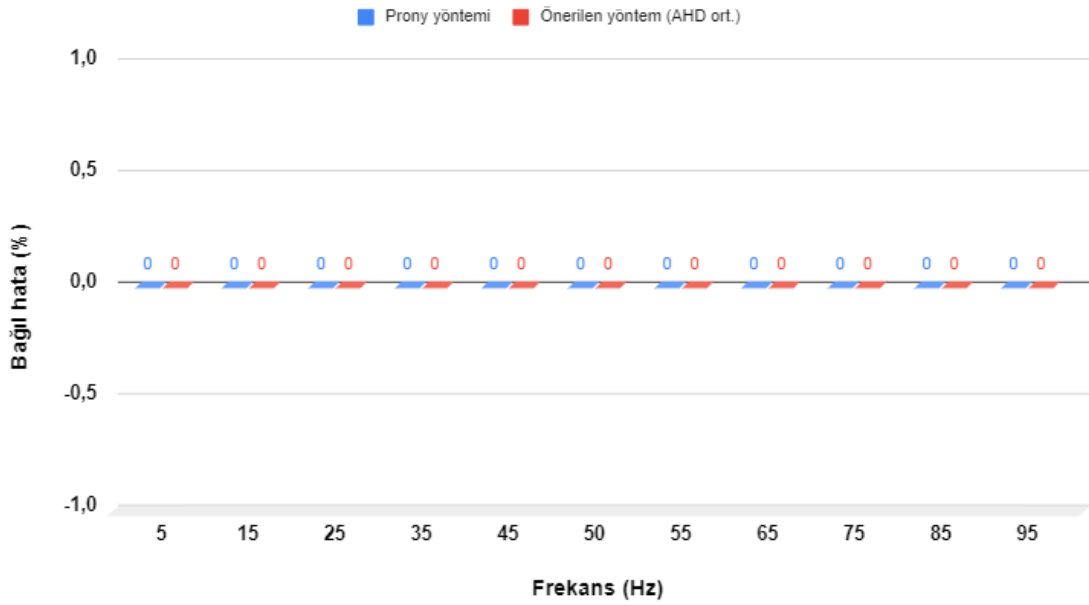
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|----|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 96,85634 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 90,54351 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 84,16283 | 138,79 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 77,64804 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 70,94788 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 67,50833 | ~0 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 63,99803 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 56,72548 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 49,04991 | 138,79 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 40,86292 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 32,03957 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.33. Çizelge 4.22'nin genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.34. Çizelge 4.22'nin frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.23. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 5 | 0,0687 | 63,4349 | 5 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 15 | 0,1158 | 0 | 15 |
| 4,5232 | 39,3765 | 25,1042 | 2,8471 | 26,5651 | 25 | 0,5803 | - 63,4349 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 35 | 0,5523 | 0 | 35 |
| 3,0092 | - 71,3796 | 46,6535 | 8,5412 | -26,5651 | 45 | 3,2336 | 63,4349 | 45 |
| ~ | ~ | ~ | 12 | 0 | 50 | 5,1036 | 90 | 50 |
| 8,497 | 81,86 | 54,0716 | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 4,0454 | 63,4349 | 55 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | -90 | 65 | 1,1005 | 0 | 65 |
| 0,9991 | 89,7262 | 73,5831 | 2,8471 | 26,5651 | 75 | 1,9611 | - 63,4349 | 75 |
| 0,6174 | - 25,9117 | 83,4801 | 0,9549 | -90 | 85 | 0,7779 | 0 | 85 |
| 1,3707 | - 17,0322 | 94,988 | 1,7082 | -26,5651 | 95 | 1,6368 | 63,4349 | 95 |

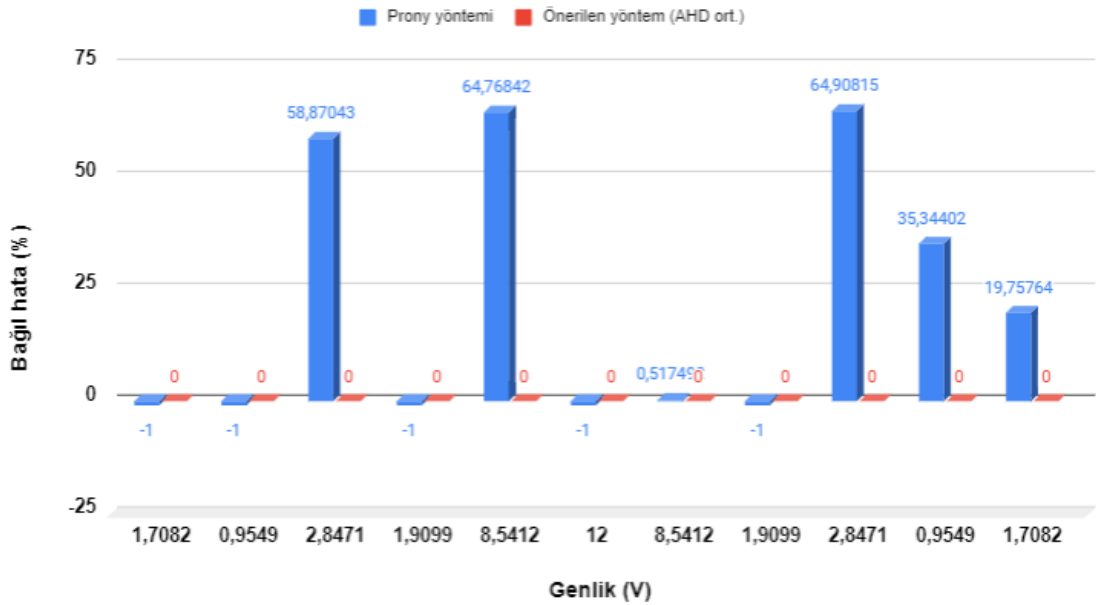
Çizelge 4.24. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|---------|--------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 95,97822 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 87,87308 | 100 | ~0 |
| 58,87043 | 48,2264 | 0,4168 | ~0 | ~0 | ~0 | 79,61786 | 138,79 | ~0 |

Çizelge 4.24. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

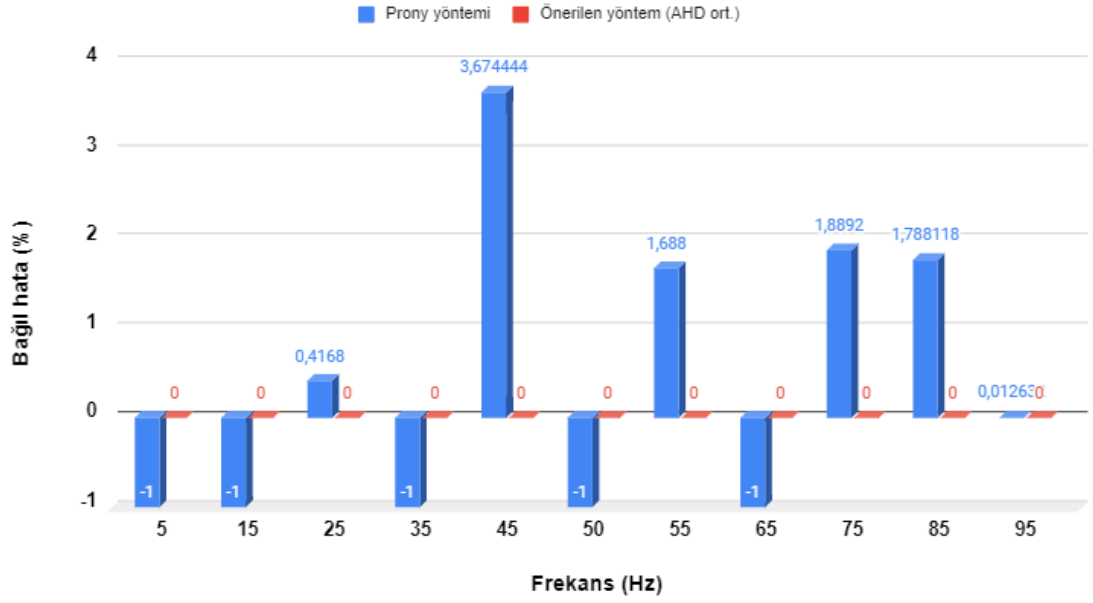
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama- Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|---|-----|----|-------------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 71,08226 | 100 | ~0 |
| 64,76842 | 168,6969 | 3,674444 | ~0 | ~0 | ~0 | 62,14115 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 57,47 | ~0 | ~0 |
| 0,517492 | 208,1487 | 1,688 | ~0 | ~0 | ~0 | 52,63663 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 42,37918 | 100 | ~0 |
| 64,90815 | 237,76 | 1,8892 | ~0 | ~0 | ~0 | 31,11938 | 138,79 | ~0 |
| 35,34402 | 71,20922 | 1,788118 | ~0 | ~0 | ~0 | 18,53597 | 100 | ~0 |
| 19,75764 | 35,88505 | 0,012632 | ~0 | ~0 | ~0 | 4,179838 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.35. Çizelge 4.24'ün genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.36. Çizelge 4.24'ün frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.25. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.5'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|---------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,8541 | -26,5651 | 48,75 | 0,8541 | -26,5651 | 48,75 | 0,2701 | 63,4349 | 48,75 |
| 0,4775 | -90 | 51,25 | 0,4775 | 90 | 51,25 | 0,1593 | 0 | 51,25 |
| 1,4235 | 26,5651 | 53,75 | 1,4235 | 26,565 | 53,75 | 0,4999 | -63,435 | 53,75 |
| 0,9549 | 89,9997 | 56,25 | 0,9549 | -89,9999 | 56,25 | 0,3523 | 0 | 56,25 |
| 4,2705 | -26,5648 | 58,75 | 4,2706 | -26,5649 | 58,75 | 1,6522 | 63,4345 | 58,75 |
| 11,9999 | 0,0008 | 60 | 12 | -0,0002 | 60 | 4,7511 | 89,9999 | 60 |
| 4,2706 | -26,5665 | 61,25 | 4,2706 | -26,5647 | 61,25 | 1,7298 | 63,435 | 61,25 |

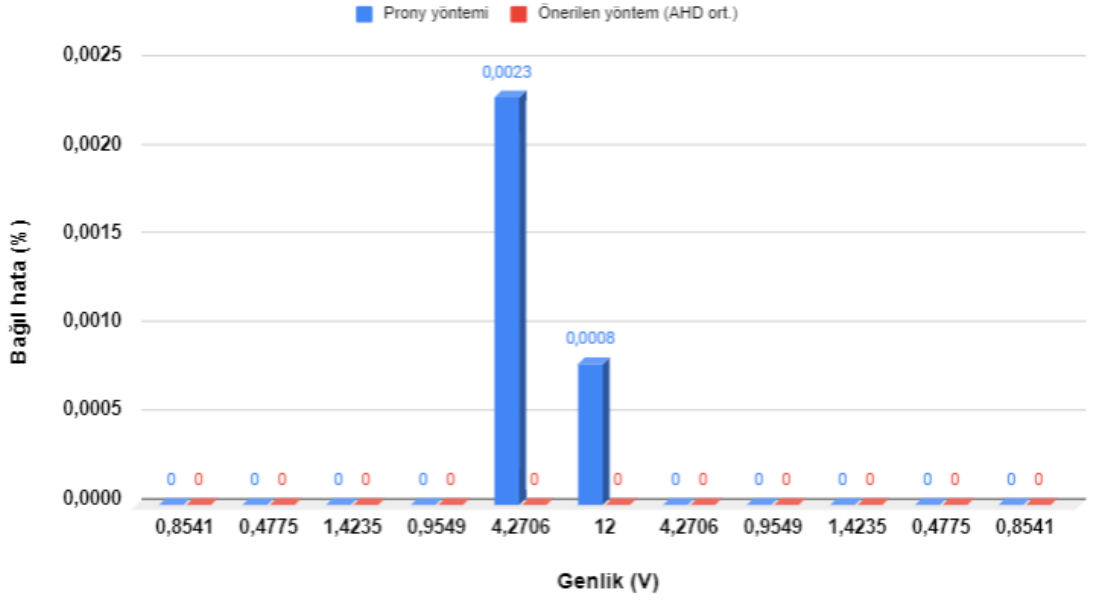
Çizelge 4.25. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.5'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|---------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,9549 | 89,9999 | 63,75 | 0,9549 | 90 | 63,75 | 0,4044 | 0,0001 | 63,75 |
| 1,4235 | 26,565 | 66,25 | 1,4235 | 26,5651 | 66,25 | 0,6293 | -63,435 | 66,25 |
| 0,4775 | 90 | 68,75 | 0,4775 | -90 | 68,75 | 0,2201 | 0 | 68,75 |
| 0,8541 | - 26,5651 | 71,25 | 0,8541 | -26,5651 | 71,25 | 0,4101 | 63,4349 | 71,25 |

Çizelge 4.26. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.5'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

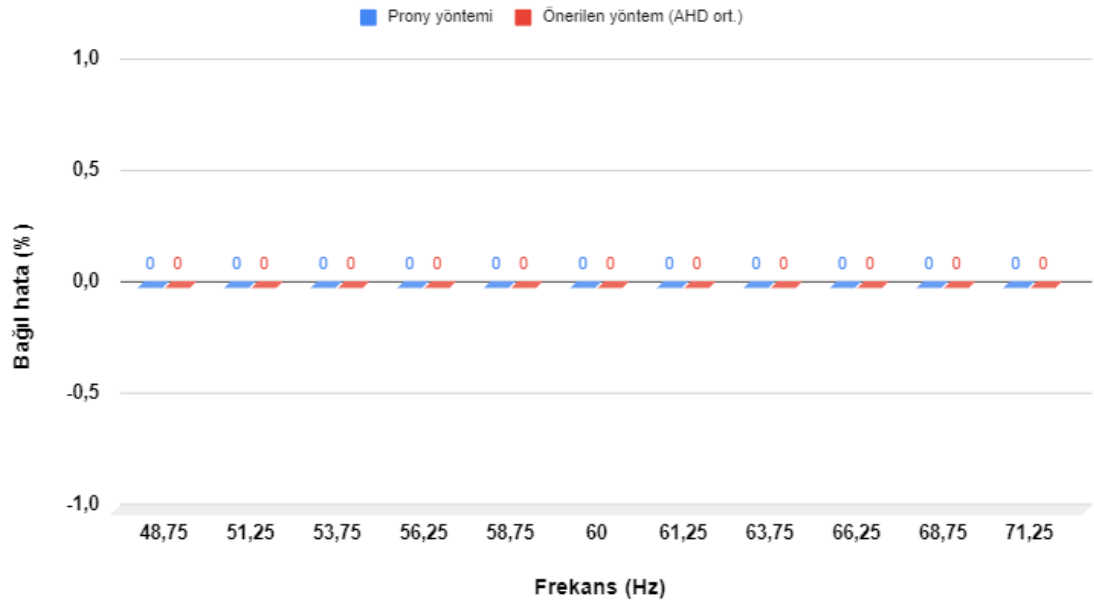
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|---------|----|--------------------------------------|--------|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 68,3761 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 66,6387 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 0,0004 | ~0 | 64,8823 | 138,791 | ~0 |
| ~0 | 0,0003 | ~0 | ~0 | 0,0001 | ~0 | 63,1061 | 100 | ~0 |
| 0,0023 | 0,0011 | ~0 | ~0 | 0,0008 | ~0 | 61,3122 | 138,7889 | ~0 |
| 0,0008 | 0,0008 | ~0 | ~0 | 0,0002 | ~0 | 60,4075 | 90 | ~0 |
| ~0 | 0,00523 | ~0 | ~0 | 0,0015 | ~0 | 59,4952 | 138,7907 | ~0 |
| ~0 | 0,0001 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 57,6500 | 100 | ~0 |
| ~0 | 0,0004 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 55,7920 | 138,791 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 53,90577 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 51,9846 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.37. Çizelge 4.26'nın genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.38. Çizelge 4.26'nın frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.27. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.5'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)***

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|---------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|---------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,9055 | 30,4697 | 48,7919 | 0,8541 | -26,5651 | 48,75 | 0,1696 | 63,4349 | 48,75 |
| ~ | ~ | ~ | 0,4775 | 90 | 51,25 | 0,0998 | 0 | 51,25 |
| 2,6228 | 64,0667 | 53,8258 | 1,4235 | 26,565 | 53,75 | 0,3126 | -63,435 | 53,75 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -89,9998 | 56,25 | 0,2198 | 0,0001 | 56,25 |
| 8,7506 | 71,0715 | 58,9257 | 4,2707 | -26,5647 | 58,75 | 1,0281 | 63,4338 | 58,75 |
| ~ | ~ | ~ | 12,0001 | -0,0005 | 60 | 2,9528 | 89,9995 | 60 |
| 5,0537 | 81,8652 | 61,6454 | 4,2705 | -26,5641 | 61,25 | 1,0737 | 63,4357 | 61,25 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -89,9999 | 63,75 | 0,2503 | 0,0002 | 63,75 |
| 3,2389 | 85,7706 | 66,583 | 1,4235 | 26,5651 | 66,25 | 0,3885 | -63,435 | 66,25 |
| ~ | ~ | ~ | 0,4775 | 90 | 68,75 | 0,1355 | 0 | 68,75 |
| 1,0825 | 40,8939 | 71,2391 | 0,8541 | -26,5651 | 71,25 | 0,2516 | 63,4349 | 71,25 |

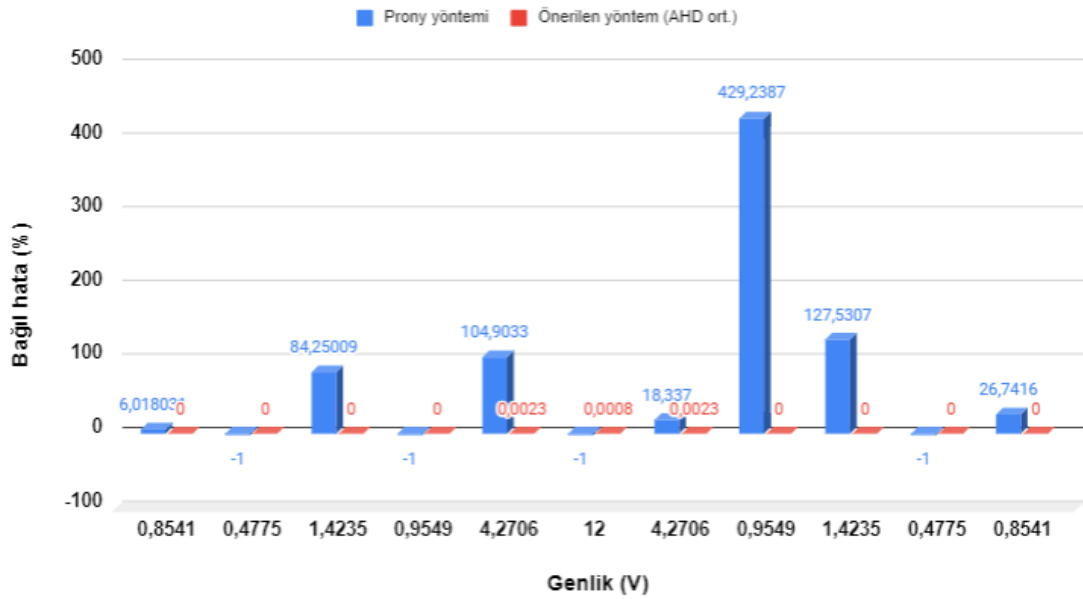
Çizelge 4.28. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.5'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|--------------------------------------|--------|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| 6,018031 | 14,69823 | 0,085949 | ~0 | ~0 | ~0 | 80,14284 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 79,09948 | 100 | ~0 |
| 84,25009 | 141,169 | 0,141023 | ~0 | 0,0004 | ~0 | 78,04004 | 138,791 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | 0,0002 | ~0 | 76,98188 | 99,9999 | ~0 |
| 104,9033 | 167,5371 | 0,299064 | 0,0023 | 0,0015 | ~0 | 75,9261 | 138,7862 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | 0,0008 | 0,0005 | ~0 | 75,39333 | 90 | ~0 |

Çizelge 4.28. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.5'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

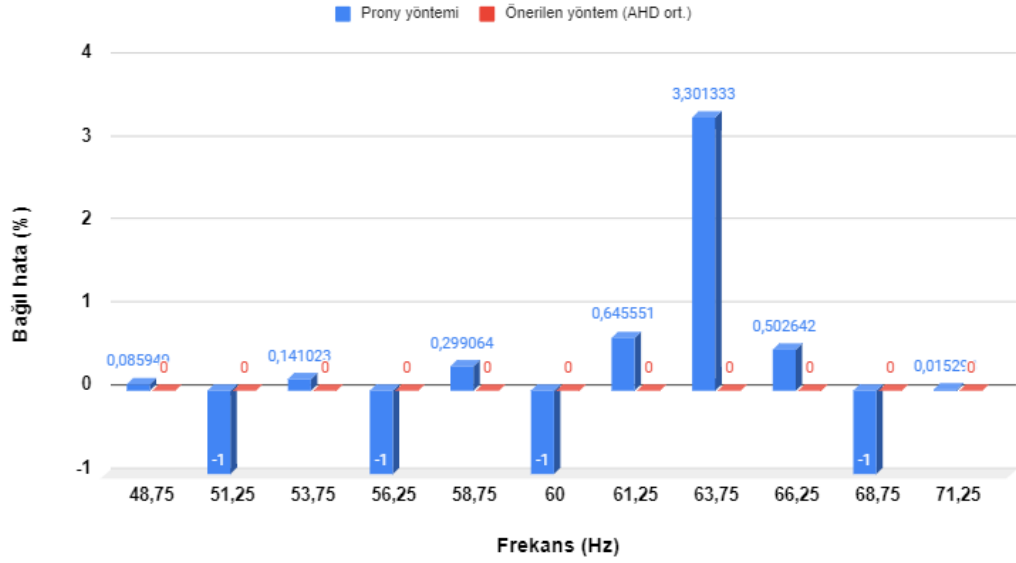
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|---|--------|----|-------------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| 18,337 | 208,1682 | 0,645551 | 0,0023 | 0,0038 | ~0 | 74,85833 | 138,7934 | ~0 |
| 429,2387 | 9,03867 | 3,301333 | ~0 | 0,0001 | ~0 | 73,78783 | 99,9998 | ~0 |
| 127,5307 | 222,869 | 0,502642 | ~0 | ~0 | ~0 | 72,70811 | 138,791 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 71,62304 | 100 | ~0 |
| 26,7416 | 53,93844 | 0,015298 | ~0 | ~0 | ~0 | 70,54209 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.39. Çizelge 4.28'in genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.40. Çizelge 4.28'in frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

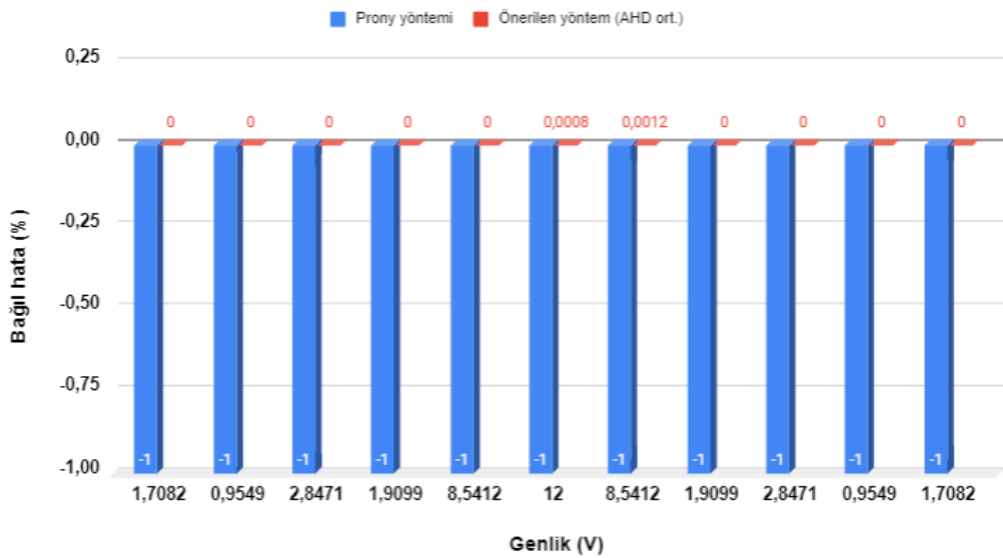
Çizelge 4.29. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.6'daki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)****

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| - | - | - | 1,7082 | -26,5651 | 48,75 | 0,5402 | 63,4349 | 48,75 |
| - | - | - | 0,9549 | 90 | 51,25 | 0,3186 | 0 | 51,25 |
| - | - | - | 2,8471 | 26,565 | 53,75 | 0,9998 | -63,4349 | 53,75 |
| - | - | - | 1,9099 | -89,9999 | 56,25 | 0,7046 | -0,0006 | 56,25 |
| - | - | - | 8,5412 | -26,5649 | 58,75 | 3,3042 | 63,4332 | 58,75 |
| - | - | - | 12,0001 | -0,0003 | 60 | 4,7509 | -89,9986 | 60 |
| - | - | - | 8,5411 | -26,5647 | 61,25 | 3,4597 | 63,4334 | 61,25 |
| - | - | - | 1,9099 | -90 | 63,75 | 0,8087 | 0,0002 | 63,75 |
| - | - | - | 2,8471 | 26,5651 | 66,25 | 1,2587 | -63,435 | 66,25 |
| - | - | - | 0,9549 | -90 | 68,75 | 0,4402 | 0 | 68,75 |
| - | - | - | 1,7082 | -26,5651 | 71,25 | 0,8203 | 63,4349 | 71,25 |

Çizelge 4.30. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.6'daki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

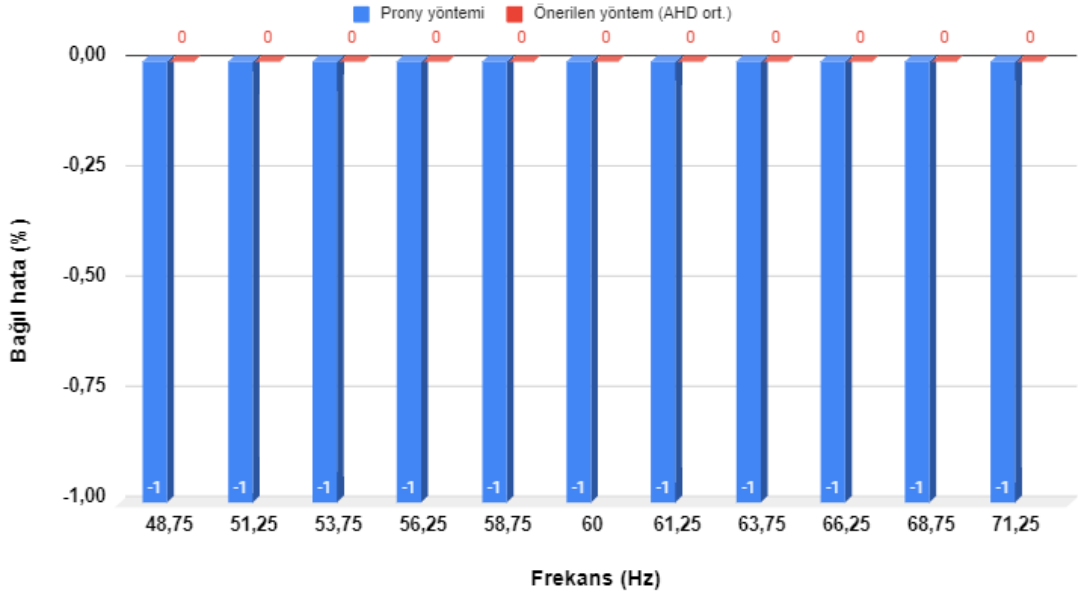
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|---|--------------------------------------|--------|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| - | - | - | ~0 | ~0 | ~0 | 68,37607 | 138,7904 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | ~0 | ~0 | 66,63525 | 100 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | 0,0004 | ~0 | 64,88357 | 138,7904 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | 0,0001 | ~0 | 63,10802 | 99,99933 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | 0,0008 | ~0 | 61,31457 | 138,784 | ~0 |
| - | - | - | 0,0008 | 0,0003 | ~0 | 60,40917 | 90 | ~0 |
| - | - | - | 0,0012 | 0,0015 | ~0 | 59,49398 | 138,7847 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | ~0 | ~0 | 57,65747 | 100,0002 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | ~0 | ~0 | 55,7901 | 138,7907 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | ~0 | ~0 | 53,90093 | 100 | ~0 |
| - | - | - | ~0 | ~0 | ~0 | 51,97869 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.41. Çizelge 4.30'un genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.42. Çizelge 4.30'un frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.31. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.6'daki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)*****

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|---------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 48,75 | 0,168 | 63,4349 | 48,75 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 51,25 | 0,0987 | 0 | 51,25 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 53,75 | 0,3089 | -63,435 | 53,75 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 56,25 | 0,2169 | 0 | 56,25 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5411 | -26,5651 | 58,75 | 1,0136 | 63,4345 | 58,75 |
| ~ | ~ | ~ | 12 | 0 | 60 | 1,4547 | 89,9996 | 60 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 61,25 | 1,0572 | 63,4353 | 61,25 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | -90 | 63,75 | 0,2461 | 0,0001 | 63,75 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,565 | 66,25 | 0,3815 | -63,435 | 66,25 |

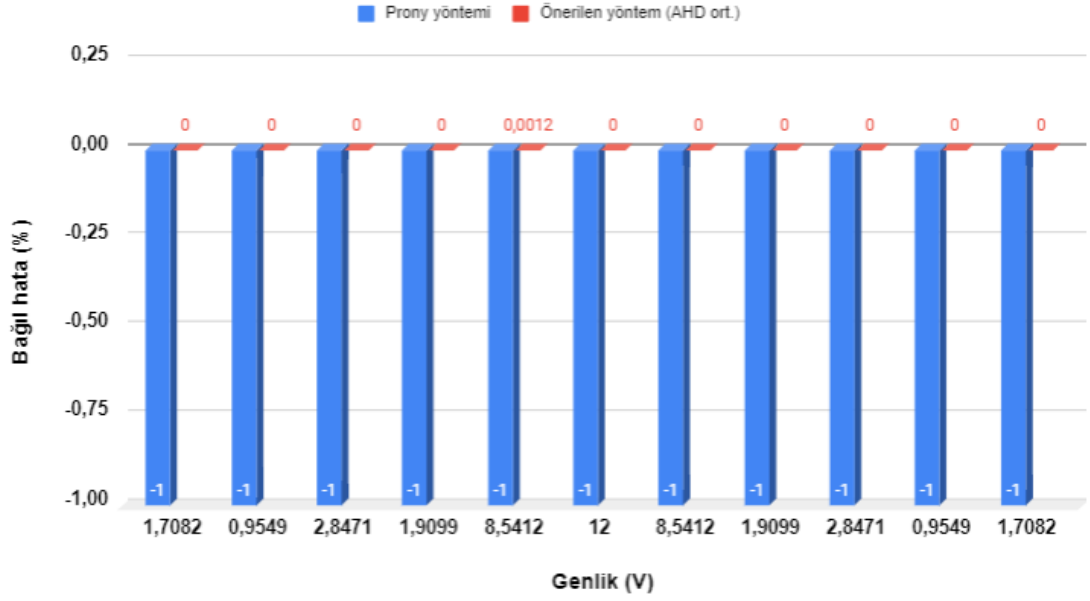
Çizelge 4.31. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.6'daki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)*****
(devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|---------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 68,75 | 0,1328 | 0 | 68,75 |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 71,25 | 0,2464 | 63,4349 | 71,25 |

Çizelge 4.32. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.6'daki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

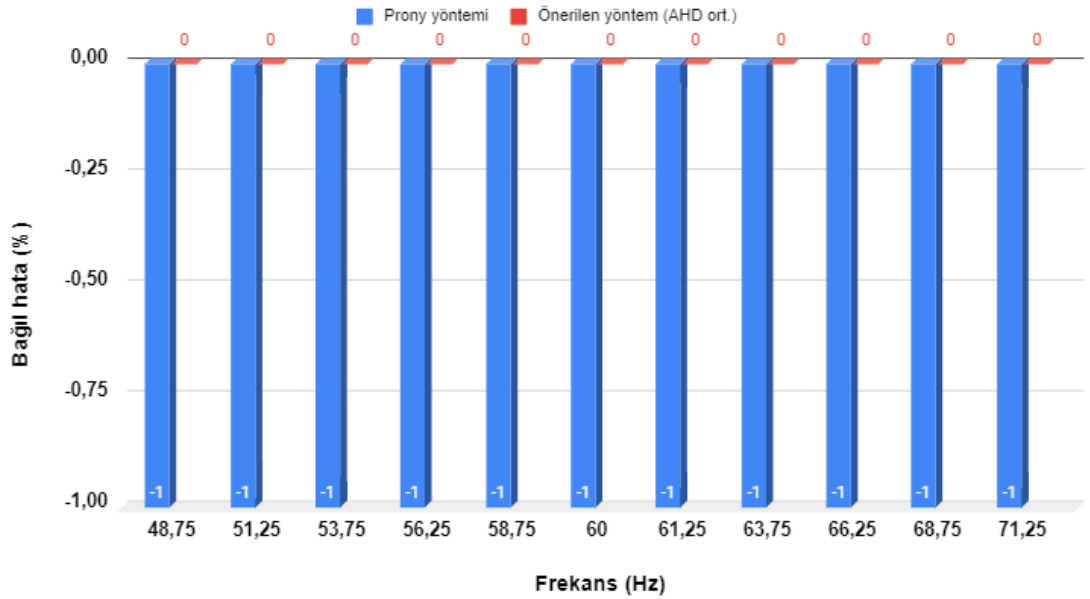
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|---|--------------------------------------|--------|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 90,16509 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 89,66384 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 89,15036 | 138,7907 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 88,64338 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | 0,0012 | ~0 | ~0 | 88,13282 | 138,7889 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 87,8775 | 90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 87,62235 | 138,7919 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 87,11451 | 99,99989 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | 0,0004 | ~0 | 86,6004 | 138,7907 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 86,09278 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 85,57546 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.43. Çizelge 4.32'nin genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.44. Çizelge 4.32'nin frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.33. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.7’deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 0,8541 | - 26,5651 | 15 | 0,8541 | -27,1471 | 15 | 0,0807 | 63,4349 | 15 |
| 0,4775 | 90 | 25 | 0,4775 | -26,5651 | 25 | 0,0756 | 0 | 25 |
| 1,4235 | 26,5651 | 35 | 1,4235 | -90 | 35 | 0,3182 | -63,4349 | 35 |
| 0,9549 | 90 | 45 | 0,9549 | 26,5651 | 45 | 0,2774 | 0 | 45 |
| 4,2706 | - 26,5651 | 55 | 4,2706 | -90 | 55 | 1,5375 | 63,4349 | 55 |
| 12 | 0 | 60 | 12 | -26,5651 | 60 | 4,7511 | -90 | 60 |
| 4,2706 | - 26,5651 | 65 | 4,2706 | 0 | 65 | 1,848 | 63,4349 | 65 |
| 0,9549 | 90 | 75 | 0,9549 | -26,5651 | 75 | 0,4866 | 0 | 75 |
| 1,4235 | 26,5651 | 85 | 1,4235 | -90 | 85 | 0,8419 | -63,4349 | 85 |
| 0,4775 | -90 | 95 | 0,4775 | 26,5651 | 95 | 0,3245 | 0 | 95 |
| 0,8541 | - 26,5651 | 105 | 0,8541 | 90 | 105 | 0,6625 | 63,4349 | 105 |

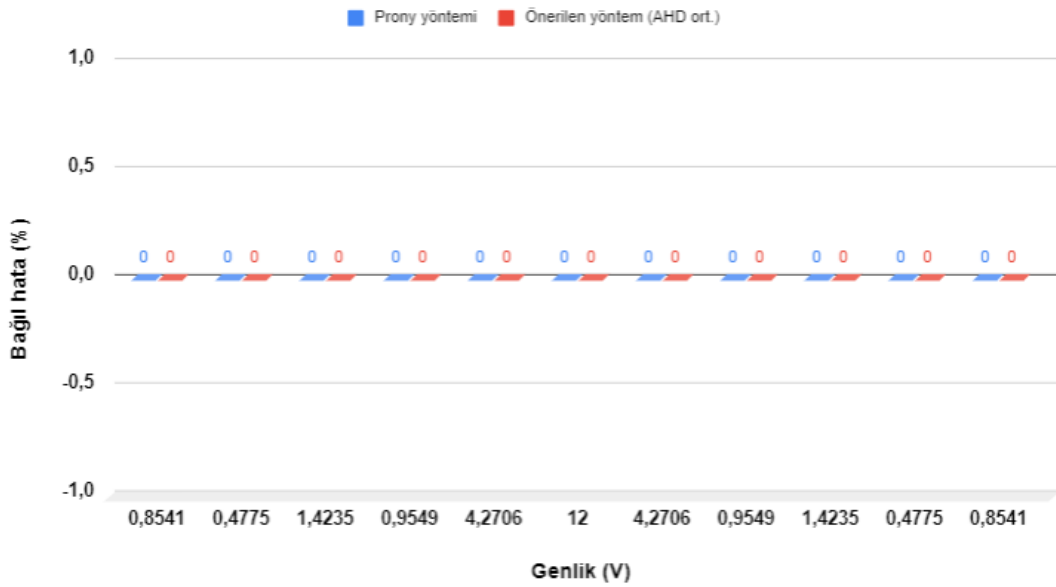
Çizelge 4.34. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.7 ‘deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|----|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 90,55146 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 84,16754 | 100 | ~0 |

Çizelge 4.34. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.7 ‘deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

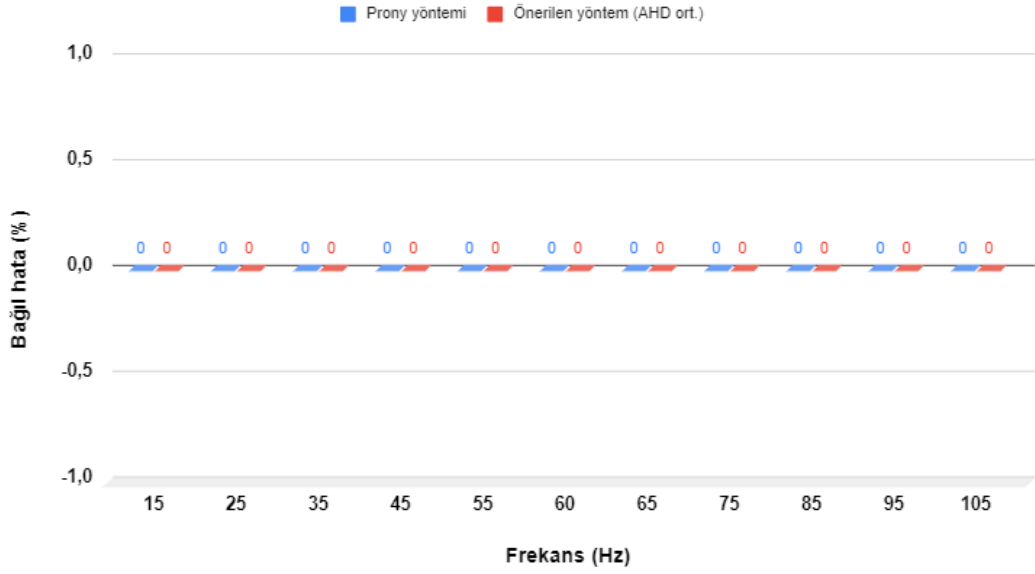
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|----|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 77,64665 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 70,94984 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 63,99803 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 60,4075 | 90 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 56,72739 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 49,04178 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 40,85704 | 138,7904 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 32,04188 | 100 | ~0 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 22,43297 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.45. Çizelge 4.34’ün genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.46. Çizelge 4.34'ün frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

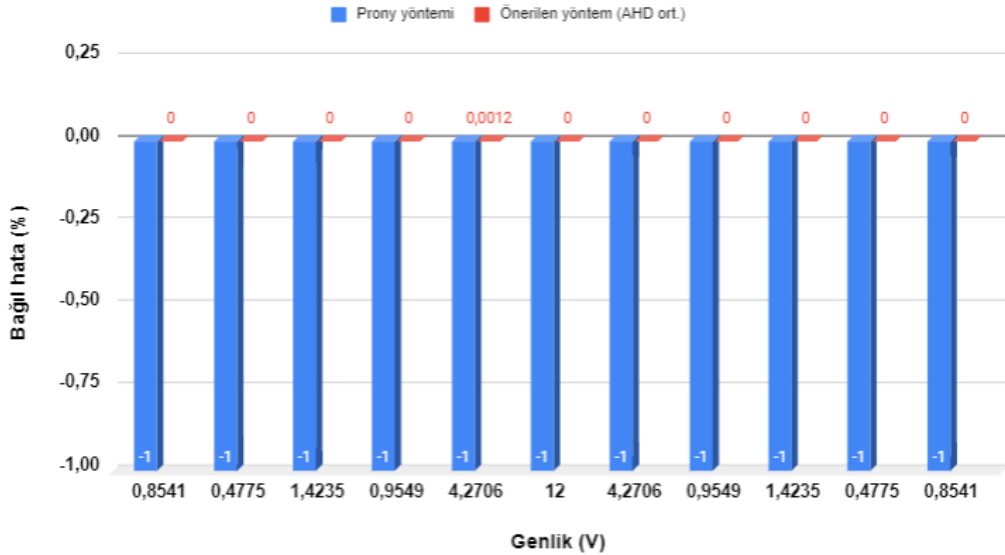
Çizelge 4.35. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.7'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)*****

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 0,8541 | -26,5651 | 15 | 0,0516 | 63,4349 | 15 |
| ~ | ~ | ~ | 0,4775 | 90 | 25 | 0,0482 | 0 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 1,4235 | 26,5651 | 35 | 0,2017 | -63,4349 | 35 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 45 | 0,1747 | 0 | 45 |
| ~ | ~ | ~ | 4,2706 | -26,5651 | 55 | 0,9602 | 63,4349 | 55 |
| ~ | ~ | ~ | 12 | 0 | 60 | 2,9528 | 90 | 60 |
| ~ | ~ | ~ | 4,2706 | -26,5651 | 65 | 1,1424 | 63,4349 | 65 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 75 | 0,2971 | 0 | 75 |
| ~ | ~ | ~ | 1,4235 | 26,5651 | 85 | 0,5064 | -63,4349 | 85 |
| ~ | ~ | ~ | 0,4775 | 90 | 95 | 0,1918 | 0 | 95 |
| ~ | ~ | ~ | 0,8541 | -26,5651 | 105 | 0,3837 | 63,4349 | 105 |

Çizelge 4.36. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.7 ‘deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

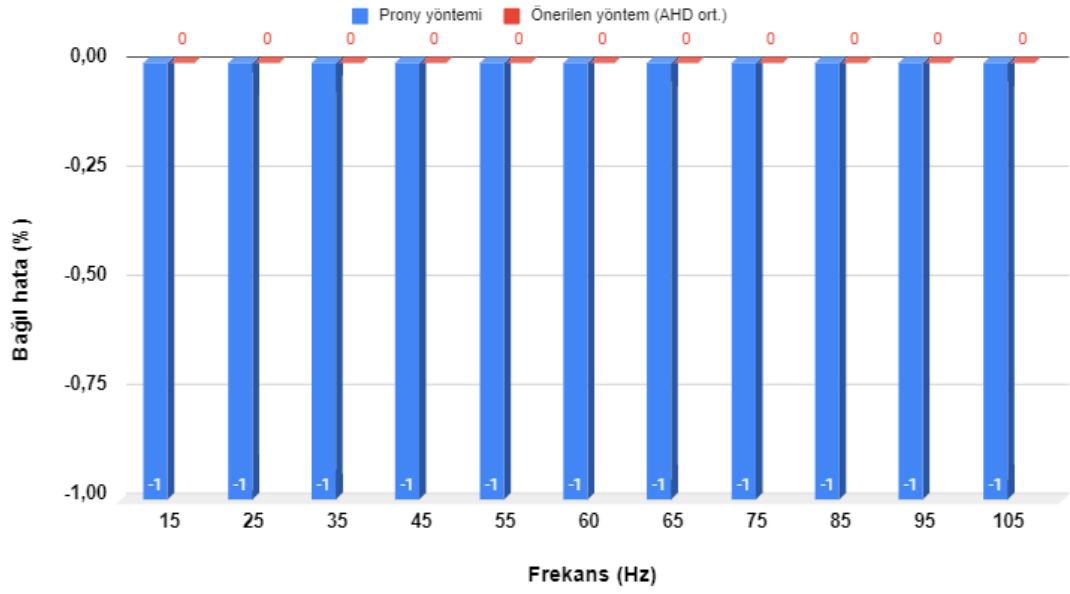
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|---|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 93,95855 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 89,90576 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 85,8307 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 81,70489 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 77,51604 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 75,39333 | 90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 73,24966 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 68,88679 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 64,42571 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 59,83246 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 55,07552 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.47. Çizelge 4.36’nın genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.48. Çizelge 4.36'nın frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.37. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 1,7082 | -26,5651 | 15 | 1,7082 | -26,5651 | 15 | 0,1615 | 63,4349 | 15 |
| 0,9549 | -90 | 25 | 0,9549 | 90 | 25 | 0,1512 | 0 | 25 |
| 2,8471 | 26,5651 | 35 | 2,8471 | 26,5651 | 35 | 0,6364 | -63,4349 | 35 |
| 1,9099 | 90 | 45 | 1,9099 | -90 | 45 | 0,5549 | 0 | 45 |
| 8,5412 | -26,5651 | 55 | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 3,075 | 63,4349 | 55 |
| 12 | 0 | 60 | 12 | 0 | 60 | 4,7511 | -90 | 60 |
| 8,5412 | 26,5651 | 65 | 8,5412 | -26,5651 | 65 | 3,6961 | 63,4349 | 65 |

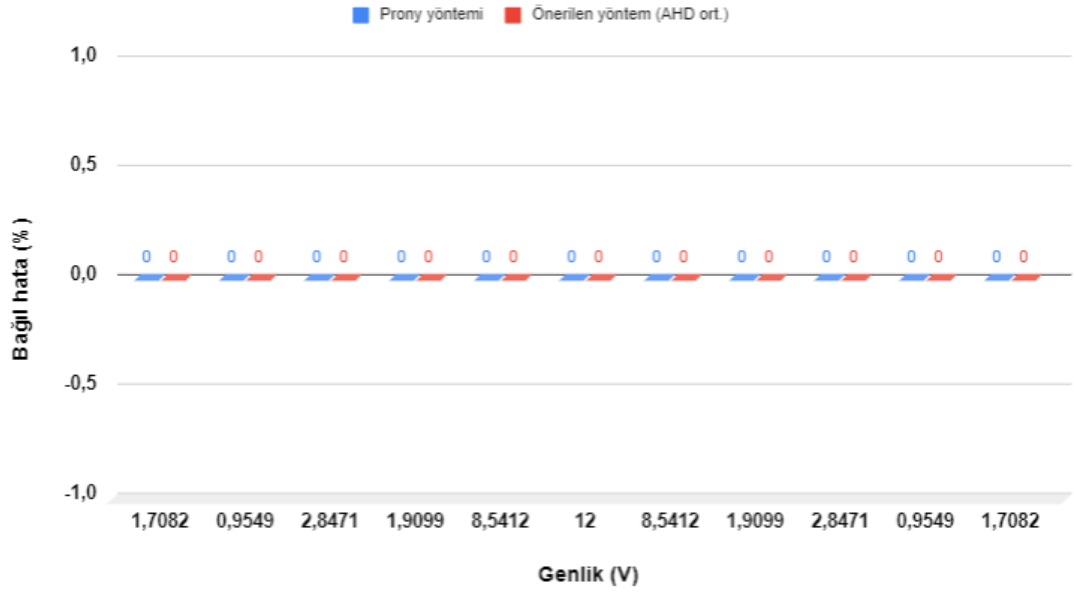
Çizelge 4.37. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 1,9099 | -90 | 75 | 1,9099 | -90 | 75 | 0,9731 | 0 | 75 |
| 2,8471 | 26,5651 | 85 | 2,8471 | 26,5651 | 85 | 1,6837 | -63,4349 | 85 |
| 0,9549 | -90 | 95 | 0,9549 | -90 | 95 | 0,649 | 0 | 95 |
| 1,7082 | - 26,5651 | 105 | 1,7082 | -26,5651 | 105 | 1,325 | 63,4349 | 105 |

Çizelge 4.38. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 8 kHz ile örneklenmesi durumunda)

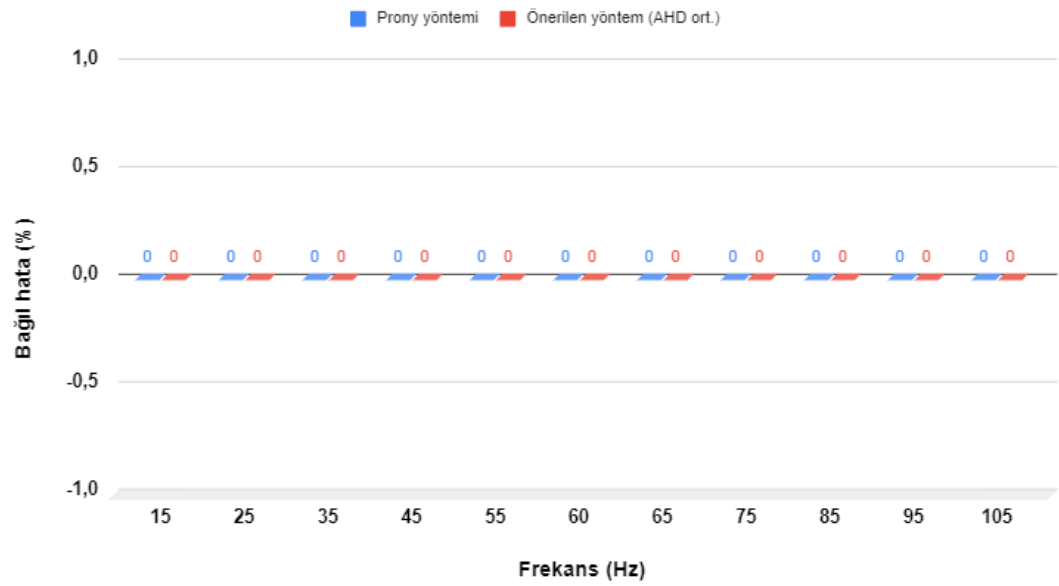
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|----|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----------|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 90,5456 | 138,7904 | 90,5456 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 84,16588 | 100 | 84,16588 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 77,64743 | 138,7904 | 77,64743 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 70,94612 | 100 | 70,94612 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 63,99803 | 138,7904 | 63,99803 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 60,4075 | 90 | 60,4075 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 56,72622 | 138,7904 | 56,72622 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 49,04969 | 100 | 49,04969 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 40,86263 | 138,7904 | 40,86263 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 32,03477 | 100 | 32,03477 |
| ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | ~0 | 22,43297 | 138,7904 | 22,43297 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.49. Çizelge 4.38'in genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.50. Çizelge 4.38'in frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.39. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|----------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 15 | 0,1032 | 63,4349 | 15 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 25 | 0,0963 | 0 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 35 | 0,4034 | -63,4349 | 35 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 45 | 0,3494 | 0 | 45 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 1,9204 | 63,4349 | 55 |
| ~ | ~ | ~ | 12 | 0 | 60 | 2,9528 | -90 | 60 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 65 | 2,2848 | 63,4349 | 65 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 75 | 0,5941 | 0 | 75 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 85 | 1,0129 | -63,4349 | 85 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 95 | 0,3836 | 0 | 95 |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 105 | 0,7674 | 63,4349 | 105 |

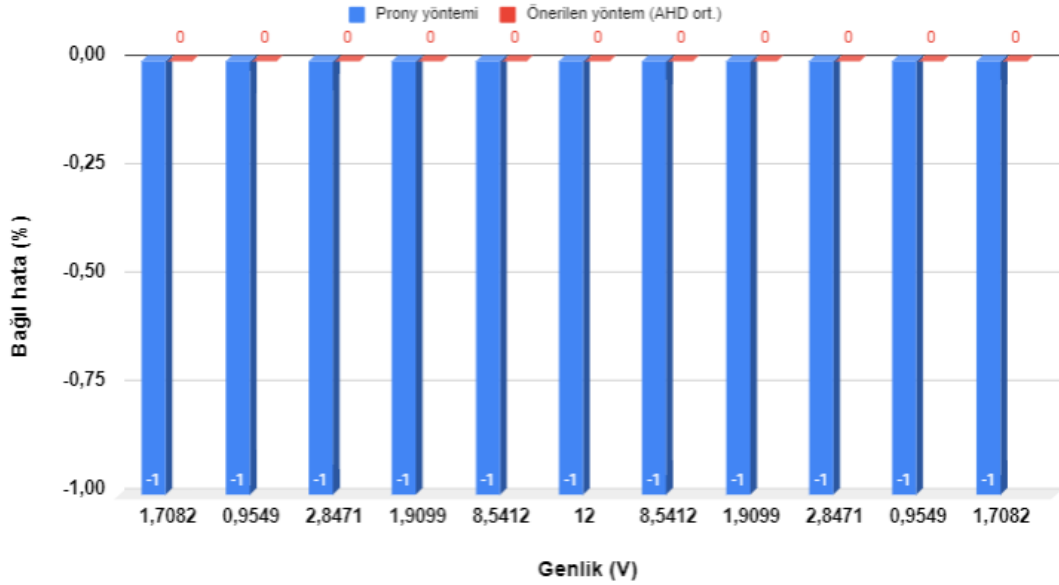
Çizelge 4.40. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|---|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 93,95855 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 89,91517 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 85,8312 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 81,70585 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 77,51604 | 138,7904 | ~0 |

Çizelge 4.40. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi durumunda) (devam)

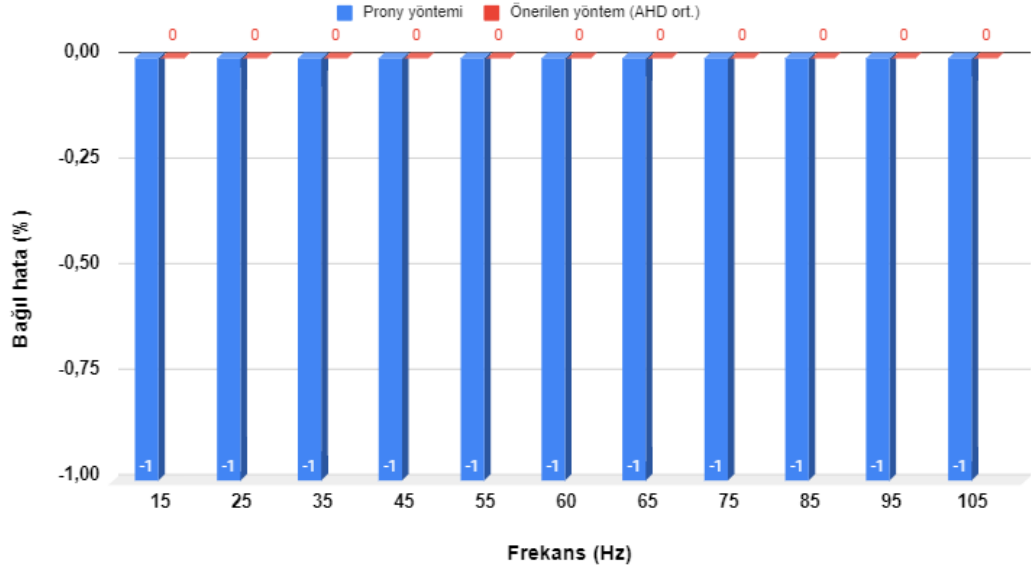
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|---|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 75,39333 | 90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 73,24966 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 68,89366 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 64,42345 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 59,82825 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 55,07552 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.51. Çizelge 4.40'ın genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.52. Çizelge 4.40'ın frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.41. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB olması durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 5 | 0,0687 | 63,4349 | 5 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 15 | 0,1158 | 0 | 15 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 25 | 0,5803 | - 63,4349 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 35 | 0,5523 | 0 | 35 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 45 | 3,2336 | 63,4349 | 45 |
| 28,2427 | - 61,843 | 49,0018 | 12 | 0 | 50 | 5,1036 | 90 | 50 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 4,0454 | 63,4349 | 55 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | -90 | 65 | 1,1005 | 0 | 65 |

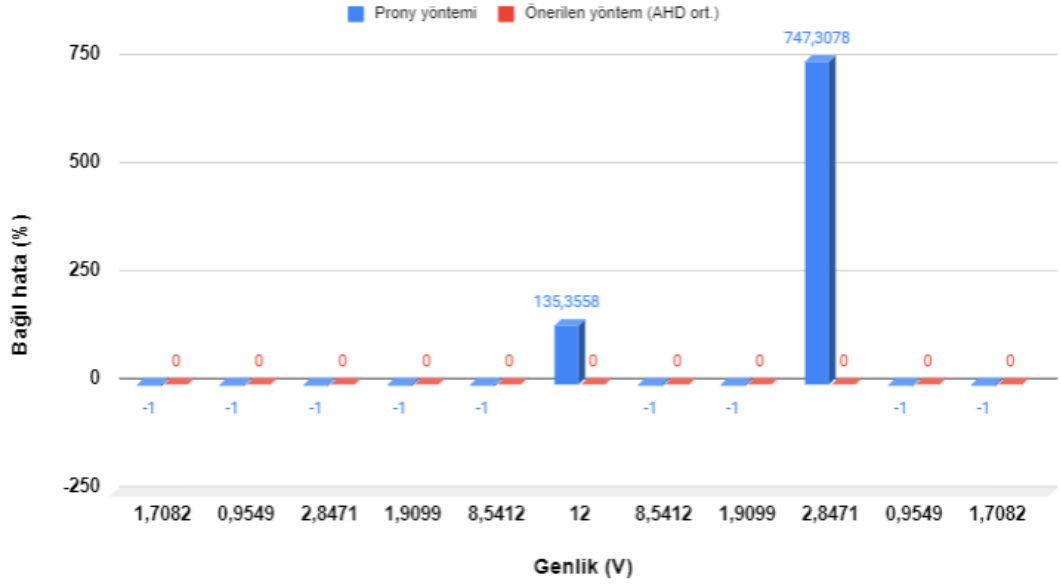
Çizelge 4.41. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB olması durumunda) (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 24,1237 | - 5,2932 | 77,2814 | 2,8471 | 26,5651 | 75 | 1,9611 | - 63,4349 | 75 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 85 | 0,7779 | 0 | 85 |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 95 | 1,6368 | 63,4349 | 95 |

Çizelge 4.42. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağlı hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB durumunda)

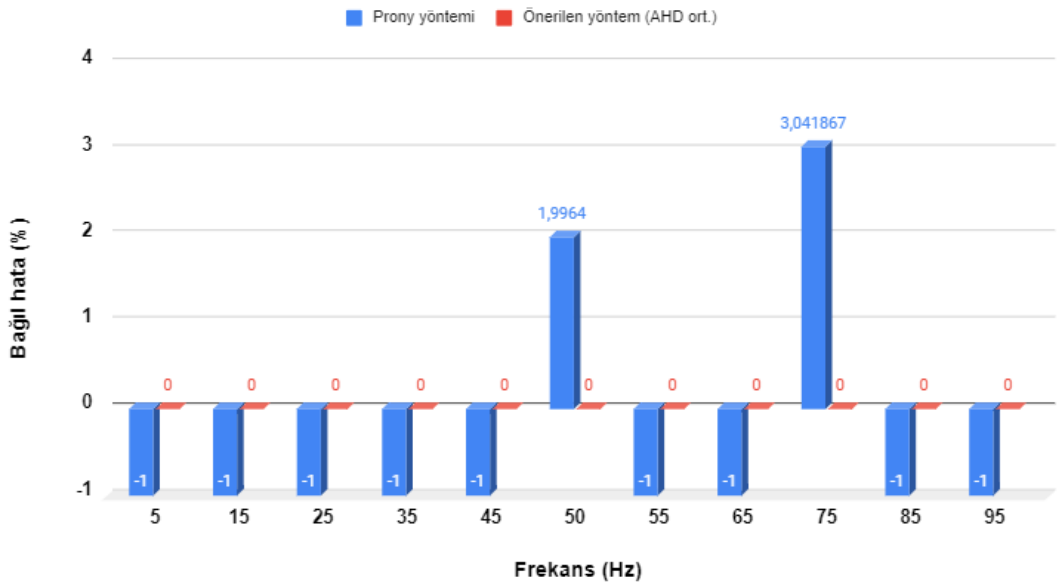
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|----------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 95,97822 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 87,87308 | 100 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 79,61786 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 71,08226 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 62,14115 | 138,7904 | ~0 |
| 135,3558 | 5,2932 | 1,9964 | ~0 | ~0 | ~0 | 57,47 | 90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 52,63663 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 42,37918 | 100 | ~0 |
| 747,3078 | - 80,0746 | 3,041867 | ~0 | ~0 | ~0 | 31,11938 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 18,53597 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 4,179838 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.53 Çizelge 4.42'nin genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.54. Çizelge 4.42'nin frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.43. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve SNR=20 dB olması durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 5 | 0,0687 | 63,4349 | 5 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | 90 | 15 | 0,1158 | 0 | 15 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 25 | 0,5803 | - 63,4349 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 35 | 0,5523 | 0 | 35 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 45 | 3,2336 | 63,4349 | 45 |
| 22,3316 | - 18,2963 | 50,0432 | 12 | 0 | 50 | 5,1036 | 90 | 50 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 4,0454 | 63,4349 | 55 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | -90 | 65 | 1,1005 | 0 | 65 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 75 | 1,9611 | - 63,4349 | 75 |
| 4,0727 | 79,8861 | 85,0502 | 0,9549 | 90 | 85 | 0,7779 | 0 | 85 |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 95 | 1,6368 | 63,4349 | 95 |

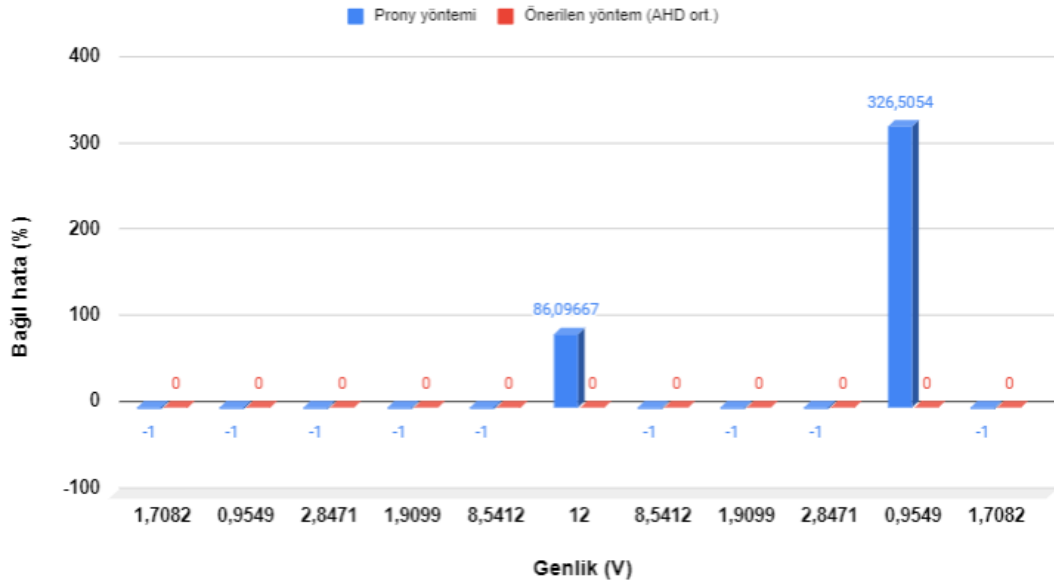
Çizelge 4.44. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve SNR = 20 dB durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|---|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 95,97822 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 87,87308 | 100 | ~0 |

Çizelge 4.44. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.4'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve SNR = 20 dB durumunda) (devam)

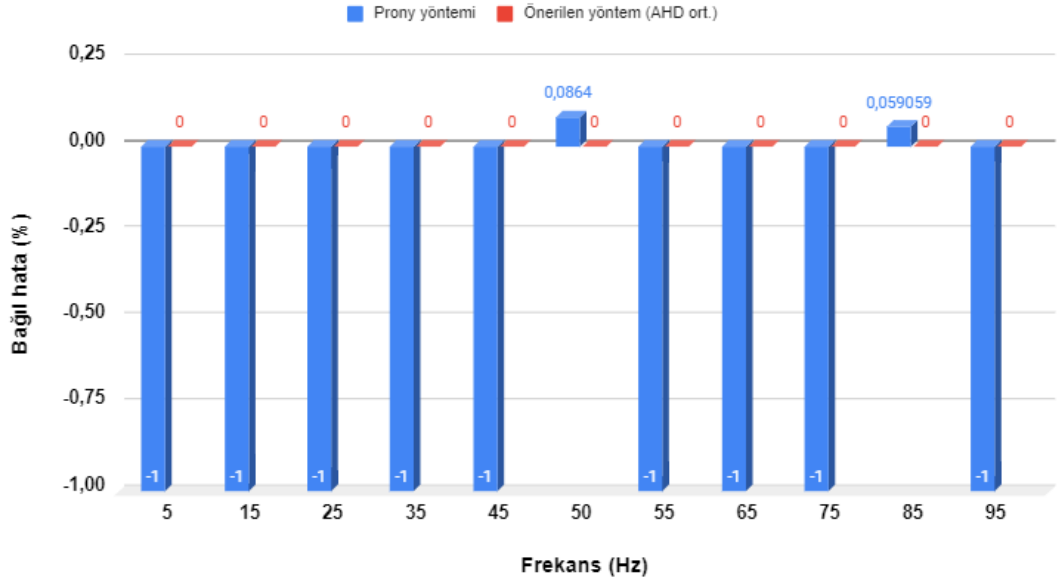
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama- Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|---|-----|----|-------------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 79,61786 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 71,08226 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 62,14115 | 138,7904 | ~0 |
| 86,09667 | 18,2963 | 0,0864 | ~0 | ~0 | ~0 | 57,47 | 90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 52,63663 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 42,37918 | 100 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 31,11938 | 138,7904 | ~0 |
| 326,5054 | 11,23767 | 0,059059 | ~0 | ~0 | ~0 | 18,53597 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 4,179838 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.55. Çizelge 4.44'ün genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.56. Çizelge 4.44'ün frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.45. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB olması durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-----|--------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 15 | 0,1032 | 63,4349 | 15 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 25 | 0,0963 | 0 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 35 | 0,4034 | - 63,4349 | 35 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 45 | 0,3494 | 0 | 45 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 1,9204 | 63,4349 | 55 |

Çizelge 4.45. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB olması durumunda) (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|--------------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| 27,9196 | - 59,4034 | 59,0428 | 12 | 0 | 60 | 2,9528 | -90 | 60 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 65 | 2,2848 | 63,4349 | 65 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 75 | 0,5941 | 0 | 75 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 85 | 1,0129 | - 63,4349 | 85 |
| 17,6941 | 18,5227 | 90,6517 | 0,9549 | -90 | 95 | 0,3836 | 0 | 95 |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 105 | 0,7674 | 63,4349 | 105 |

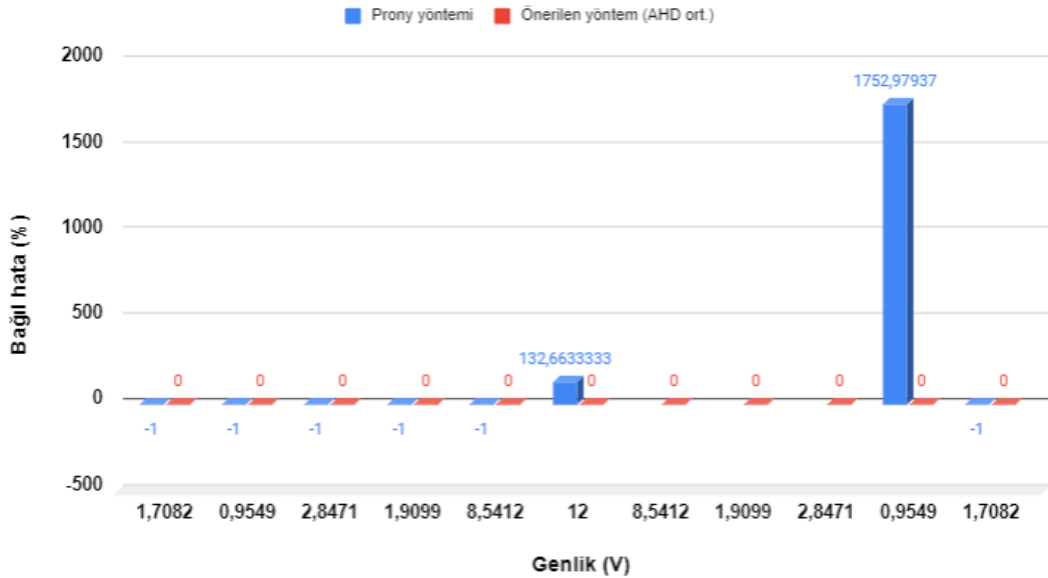
Çizelge 4.46. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|---------|-------------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 93,95855 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 89,91517 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 85,8312 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 81,70585 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 77,51604 | 138,7904 | ~0 |
| 132,6633333 | 59,4034 | 1,595333333 | ~0 | ~0 | ~0 | 75,39333 | 90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 73,24966 | 138,7904 | ~0 |

Çizelge 4.46. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 10$ dB durumunda) (devam)

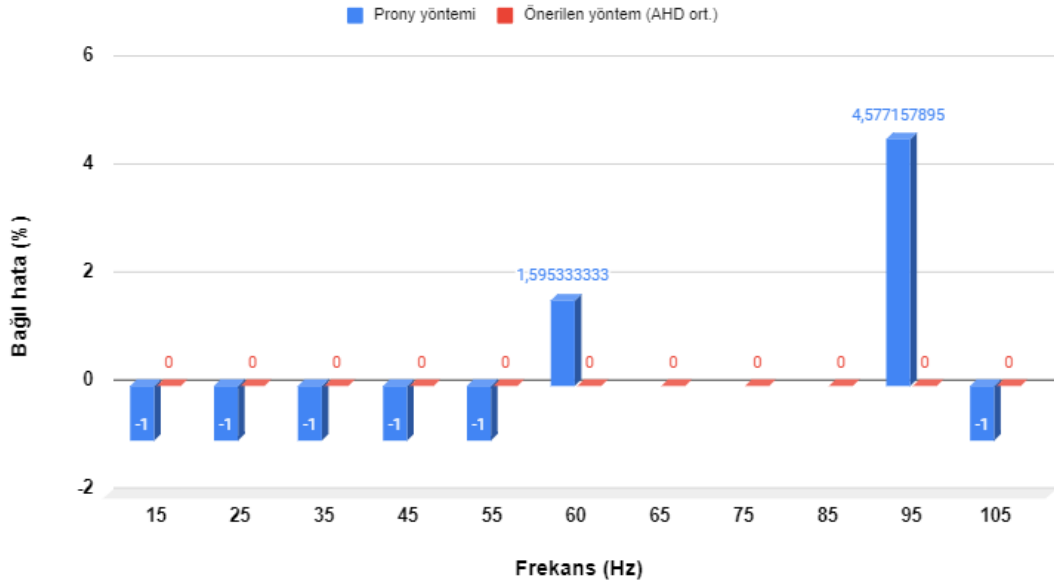
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|-------------|-------------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 68,89366 | 100 | ~0 |
| ~ | -- | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 64,42345 | 138,7904 | ~0 |
| 1752,97937 | 79,41922222 | 4,577157895 | ~0 | ~0 | ~0 | 59,82825 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 55,07552 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.57. Çizelge 4.46'nın genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.58. Çizelge 4.46'nın frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.47. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örneklenmesi ve $SNR = 20$ dB olması durumunda)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|---------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 15 | 0,1032 | 63,4349 | 15 |
| ~ | ~ | ~ | 0,9549 | -90 | 25 | 0,0963 | 0 | 25 |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 35 | 0,4034 | - 63,4349 | 35 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 45 | 0,3494 | 0 | 45 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 55 | 1,9204 | 63,4349 | 55 |
| 23,4541 | -45,481 | 59,3819 | 12 | 0 | 60 | 2,9528 | -90 | 60 |
| ~ | ~ | ~ | 8,5412 | -26,5651 | 65 | 2,2848 | 63,4349 | 65 |
| ~ | ~ | ~ | 1,9099 | 90 | 75 | 0,5941 | 0 | 75 |

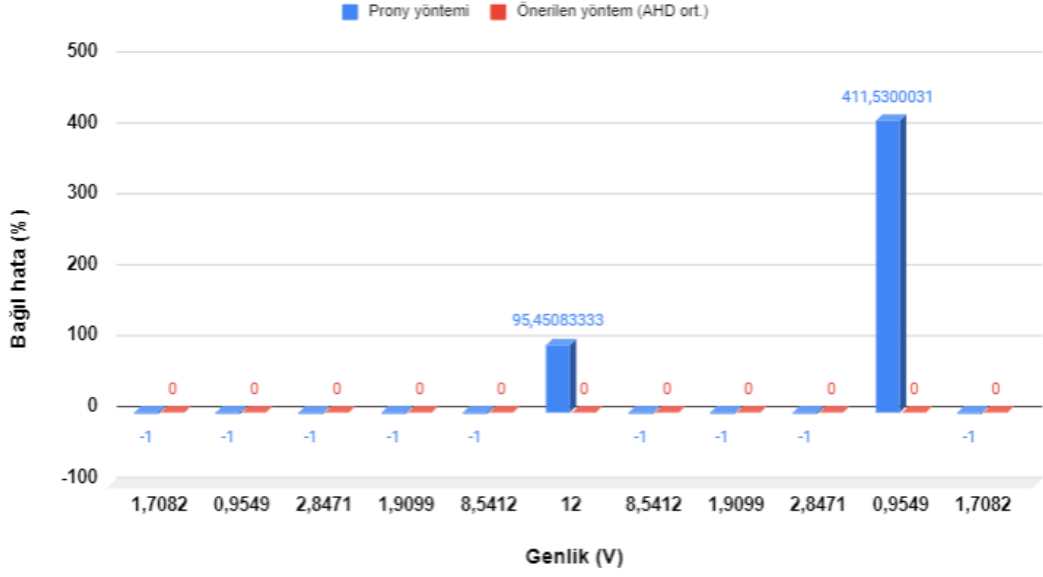
Çizelge 4.47. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen değerler (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örnekleme ve $SNR = 20$ dB olması durumunda) (devam)

| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|---------|---------|--------------------------------------|----------|--------|----------------------------------|--------------|--------|
| A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) | A (V) | Faz | f (Hz) |
| ~ | ~ | ~ | 2,8471 | 26,5651 | 85 | 1,0129 | - 63,4349 | 85 |
| 4,8846 | 28,3036 | 93,1878 | 0,9549 | -90 | 95 | 0,3836 | 0 | 95 |
| ~ | ~ | ~ | 1,7082 | -26,5651 | 105 | 0,7674 | 63,4349 | 105 |

Çizelge 4.48. Prony yöntemi ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları (%) (Çizelge 4.8'deki değerlerin 100 kHz ile örnekleme ve $SNR = 20$ dB durumunda)

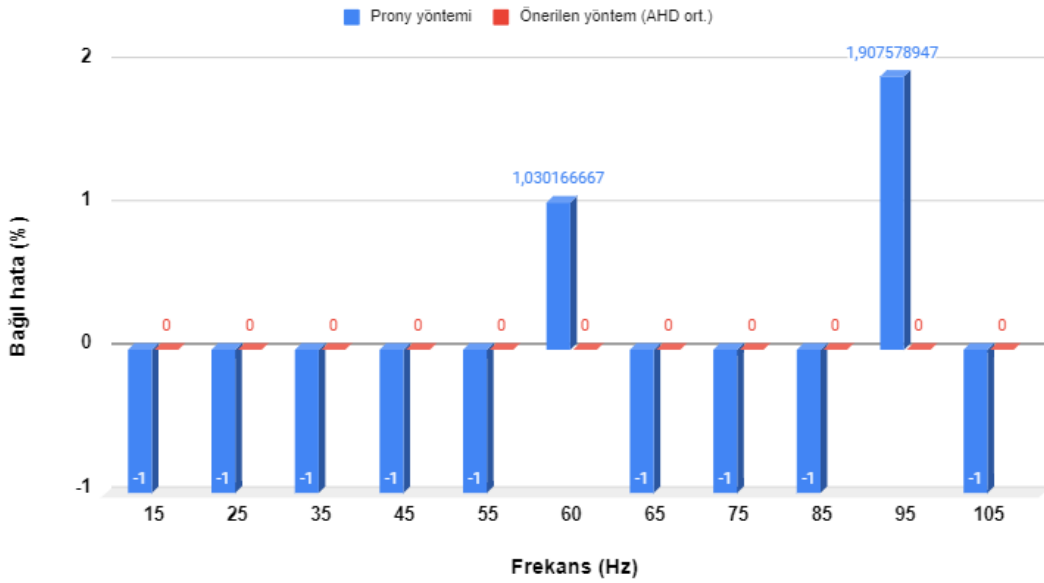
| Prony Yöntemi | | | Önerilen Yöntem (AHD ortalama-Prony) | | | Önerilen Yöntem (AHD fark-Prony) | | |
|---------------|----------|----------|--------------------------------------|-----|----|----------------------------------|----------|----|
| A | Faz | f | A | Faz | f | A | Faz | f |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 93,95855 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 89,91517 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 85,8312 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 81,70585 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 77,51604 | 138,7904 | ~0 |
| 95,45083 | -45,481 | 1,030167 | ~0 | ~0 | ~0 | 75,39333 | -90 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 73,24966 | 138,7904 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 68,89366 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 64,42345 | 138,7904 | ~0 |
| 411,53 | 68,55156 | 1,907579 | ~0 | ~0 | ~0 | 59,82825 | 100 | ~0 |
| ~ | ~ | ~ | ~0 | ~0 | ~0 | 55,07552 | 138,7904 | ~0 |

Genlik kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.59 Çizelge 4.48'in genlik değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Frekans kestirimi için karşılaştırmalı hata analizi



Şekil 4.60. Çizelge 4.48'in frekans değerleri için sırasıyla Prony ve AHD ortalamalarıyla önerilen yöntem için karşılaştırmalı hata analizi

Çizelge 4.49. Prony ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemlerinin hesaplama süreleri

| Çizelge No | Prony (s) | Ortalamalar (s) | Farklar (s) |
|---|------------------|------------------------|--------------------|
| Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 | 21.9275 | 0.1362 | 0.1376 |
| Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12 | 78.4102 | 2.4829 | 1.4137 |
| Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 | 20.7881 | 1.2425 | 0.4211 |
| Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16 | 77.8654 | 1.7768 | 1.4662 |
| Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18 | 20.6514 | 0.1131 | 0.1254 |
| Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.20 | 78.1659 | 1.5563 | 1.3994 |
| Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.22 | 26.1848 | 0.1006 | 0.1248 |
| Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.24 | 78.5008 | 1.6043 | 1.4482 |
| Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26 | 10.7682 | 0.1884 | 0.0763 |
| Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.28 | 76.8218 | 0.9051 | 2.3375 |
| Çizelge 4.29 ve Çizelge 4.30 | 11.4025 | 0.0735 | 0.0747 |
| Çizelge 4.31 ve Çizelge 4.32 | 73.2592 | 7.4732 | 7.0941 |
| Çizelge 4.33 ve Çizelge 4.34 | 8.6214 | 0.6447 | 0.1836 |

Çizelge 4.49. Prony ve önerilen AHD tabanlı Prony yöntemlerinin hesaplama süreleri (devam)

| Çizelge No | Prony (s) | Ortalamalar (s) | Farklar (s) |
|---|------------------|------------------------|--------------------|
| Çizelge 4.35 ve Çizelge 4.36 | 67.4178 | 2.5899 | 2.4828 |
| Çizelge 4.37 ve Çizelge 4.38 | 7.7301 | 0.3437 | 0.2923 |
| Çizelge 4.39 ve Çizelge 4.40 | 66.4664 | 2.5638 | 2.3955 |
| Çizelge 4.41 ve Çizelge 4.42 | 78.0225 | 1.7347 | 1.3702 |
| Çizelge 4.43 ve Çizelge 4.44 | 79.2766 | 1.3612 | 1.4045 |
| Çizelge 4.45 ve Çizelge 4.46 | 64.2921 | 2.3432 | 2.3483 |
| Çizelge 4.47 ve Çizelge 4.48 | 63.9797 | 2.3597 | 2.3149 |

Notlar:

* işareti koyulmuş Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'de, fark katsayıları hesaplanırken, 5. derece fark katsayıları ile sıfır matrisi elde edilmiş (sonuca ulaşılamamış), 4. derece AHD fark katsayıları ile sonuca ulaşılmıştır.

** Çizelge 4.21'de, kırmızı ile gösterilen bölümde 5. derece AHD ortalama katsayıları gerçekte var olmayan ihmal edilemeyecek kadar büyüklükte bir genliğe sahip iki adet frekans bileşeni saptamıştır. Fakat 4. derece AHD katsayıları ile tekrar benzetim gerçekleştirildiğinde, ilgili frekanslardaki bileşenler kaybolmuştur ve işaretin neredeyse tüm bileşenleri sıfır hata ile tespit edilmiştir.

*** Çizelge 4.27’de, fark katsayıları ile önerilen yöntem gerçekleştirirken, dokuzuncu dereceden AHD’ler ile sıfır matrisi elde edilmiştir bu nedenle sadece fark katsayıları için sekizinci dereceden hesaplamalar çizelgede sunulmuştur. Ortalamalar için 100kHz örnekleme frekansına sahip diğer çizelgelerde olduğu gibi 9. dereceden AHD katsayıları kullanılmıştır.

**** Çizelge 4.29’da, bölümün girişinde belirtilen kıstaslara göre orijinal Prony yöntemi sonuç bulamamıştır, sıfır matrisi döndürmüştür. Orijinal Prony yöntemi, sıfır matrisini 11.402547 (s) sonra döndürmüştür. İşlem süresi 11.402547 (s)’dir.

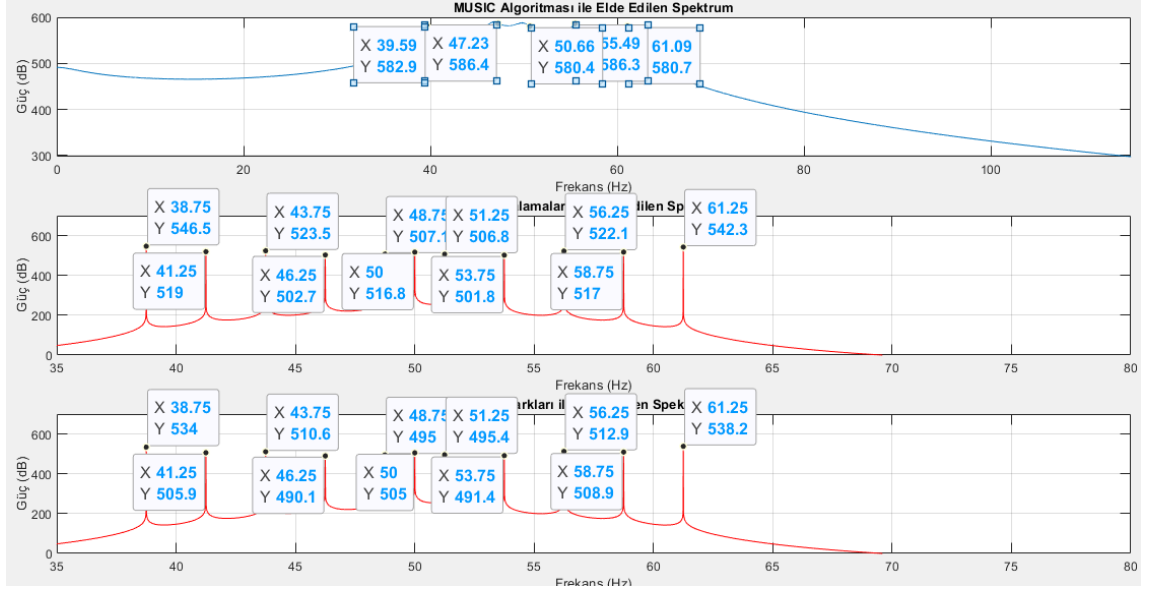
***** Çizelge 4.31’de fark ve ortalama değerleri için yedinci dereceden AHD kullanılmıştır.

*****Çizelge 4.35 ve Çizelge 4.39’da, Nyquist kriteri gereği sekizinci derece AHD ortalama ve fark katsayıları kullanılmıştır.

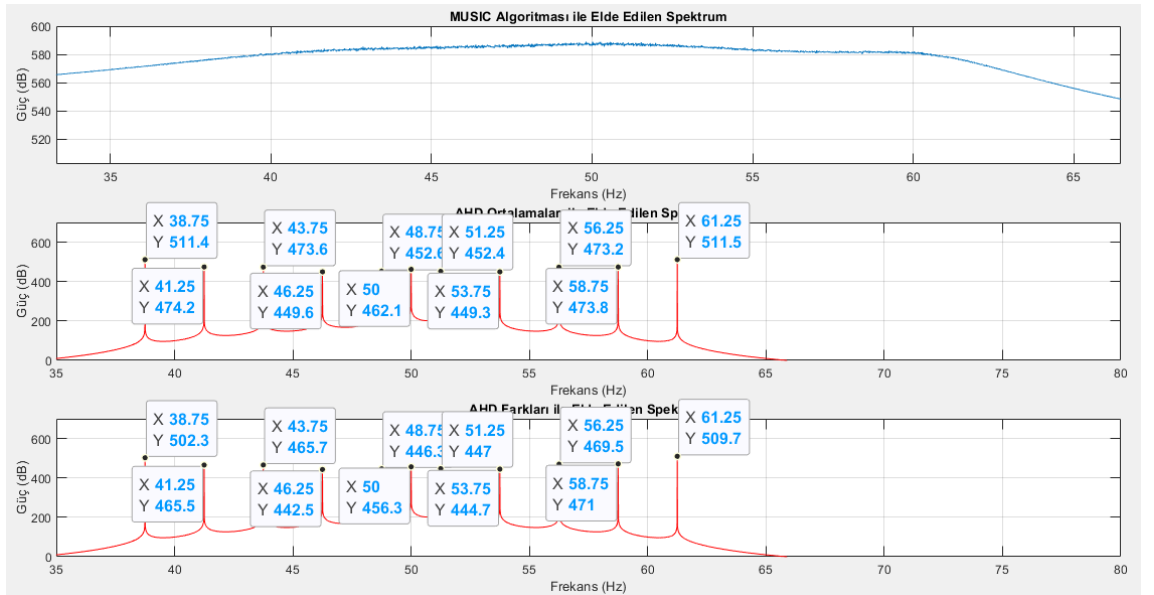
4.4. MUSIC Yöntemi ve Önerilen AHD Tabanlı MUSIC Yöntemi

Bu bölümde, MUSIC yöntemi ve AHD tabanlı MUSIC yöntemi ile ilgili karşılaştırmalara yer verilmiştir. Çizelge 4.1 – 4.8 aralığındaki işaret verileri sırasıyla 8 kHz ve 100 kHz örnekleme frekansıyla bilgisayar ortamında üretilerek benzetimler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekiller ile sunulmuştur. Sunulan şekillerde sırasıyla orijinal MUSIC yöntemi, önerilen AHD ortalamaları ile MUSIC uygulaması ve önerilen AHD farkları ile MUSIC uygulamasına dair sonuçlara yer verilmiştir. Şekiller üzerinde tespit edilen frekanslar belirtilmiştir. Ayrıca, işaret verileri üzerine farklı SNR değerlerinde beyaz gürültü bindirilmiş ve elde edilen frekansların bağıl hata oranları, bölüm sonundaki çizelgede belirtilmiştir Algoritmaların sonuç bulma hızları da çizelgelerde gösterilmiştir.

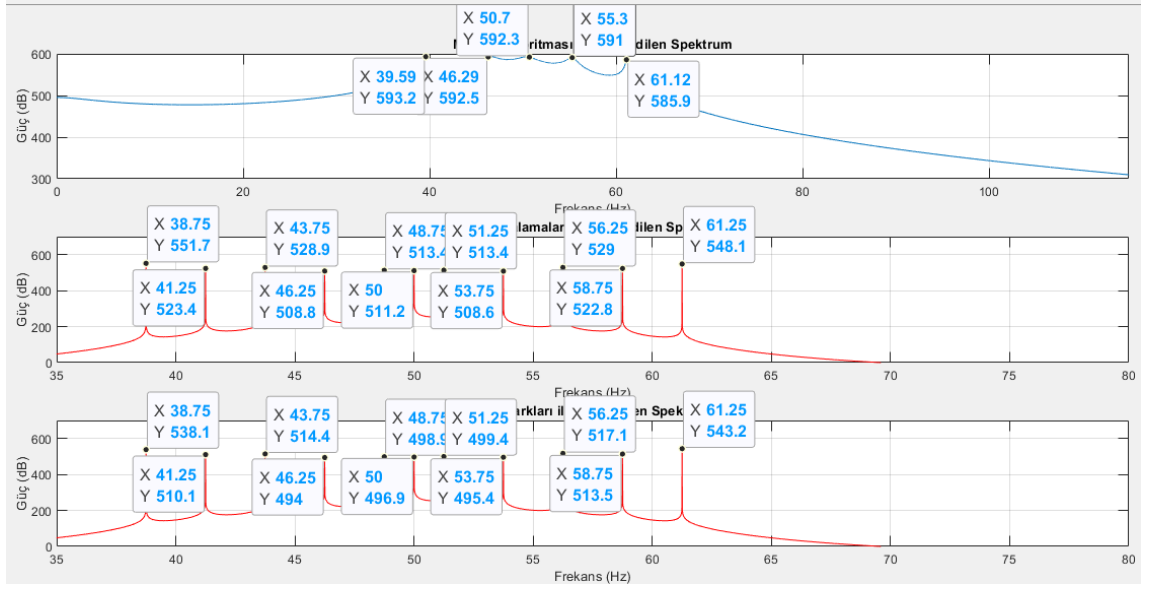
Benzetimler gerçekleştirilirken Denklem (2.107)’deki $\mathbf{f}_m(\omega)$ vektörü, MUSIC algoritması ve önerilen yöntemler için $1e - 2$ adım aralığıyla oluşturulmuştur. 50 Hz ve 60 Hz işaretler için 8 kHz örnekleme frekansı ele alındığında, beşinci dereceden AHD katsayıları kullanılmıştır. 100 kHz’lik örnekleme frekansına sahip işaretlerin analizi sırasında, 60 Hz ana frekansa sahip işaretler için 8, 50 Hz ana frekansa sahip işaretler için 9’uncu dereceden AHD katsayıları uygulanmıştır. Belirtilen AHD dereceleri, Nyquist kriterini koruyan azami AHD dereceleridir.



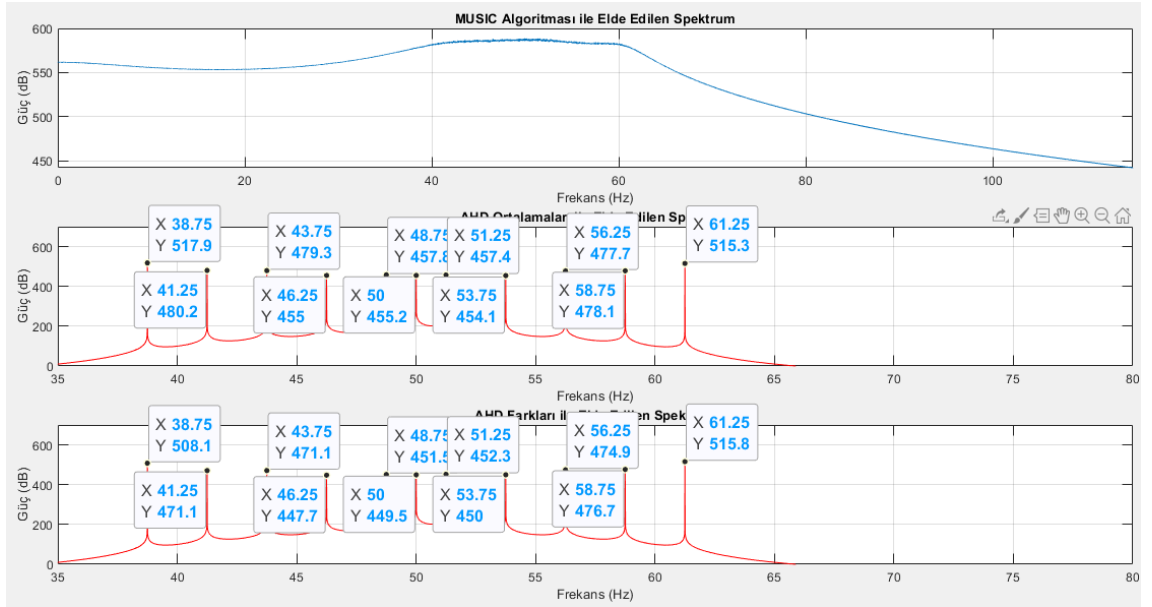
Şekil 4.61. Örneklem frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.1 için elde edilen sonuçlar.



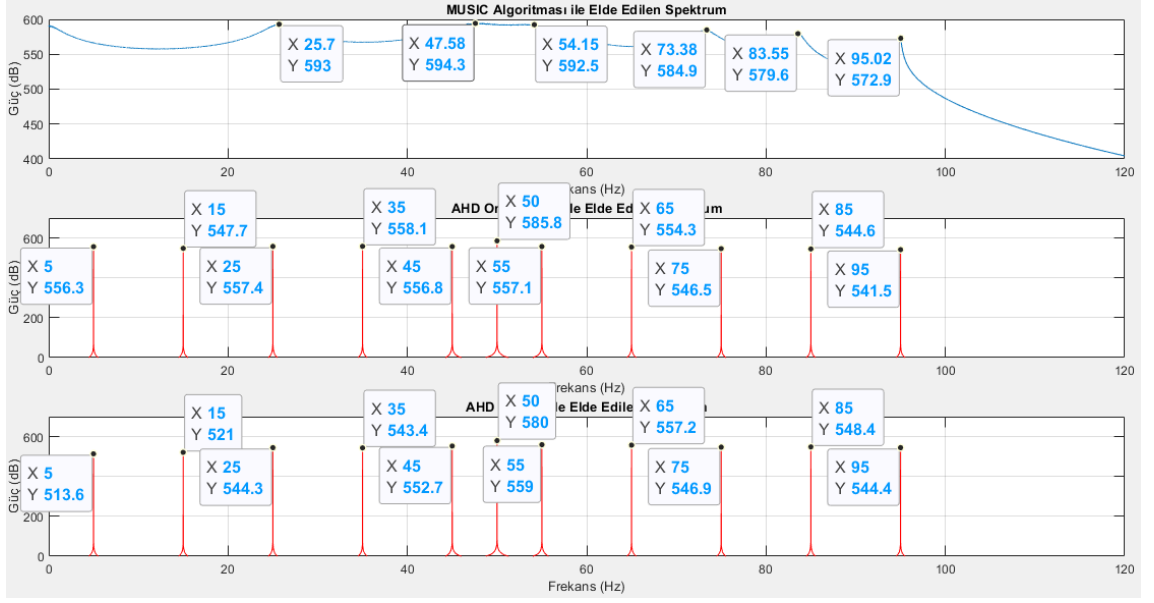
Şekil 4.62. Örneklem frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.1 için elde edilen sonuçlar.



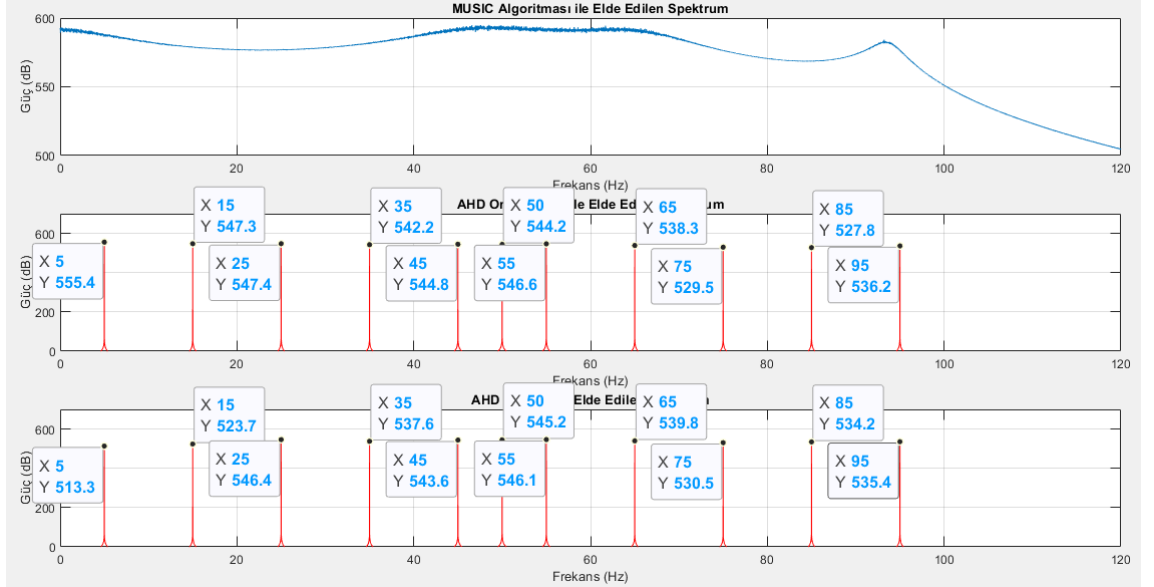
Şekil 4.63. Örneklem frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.2 için elde edilen sonuçlar.



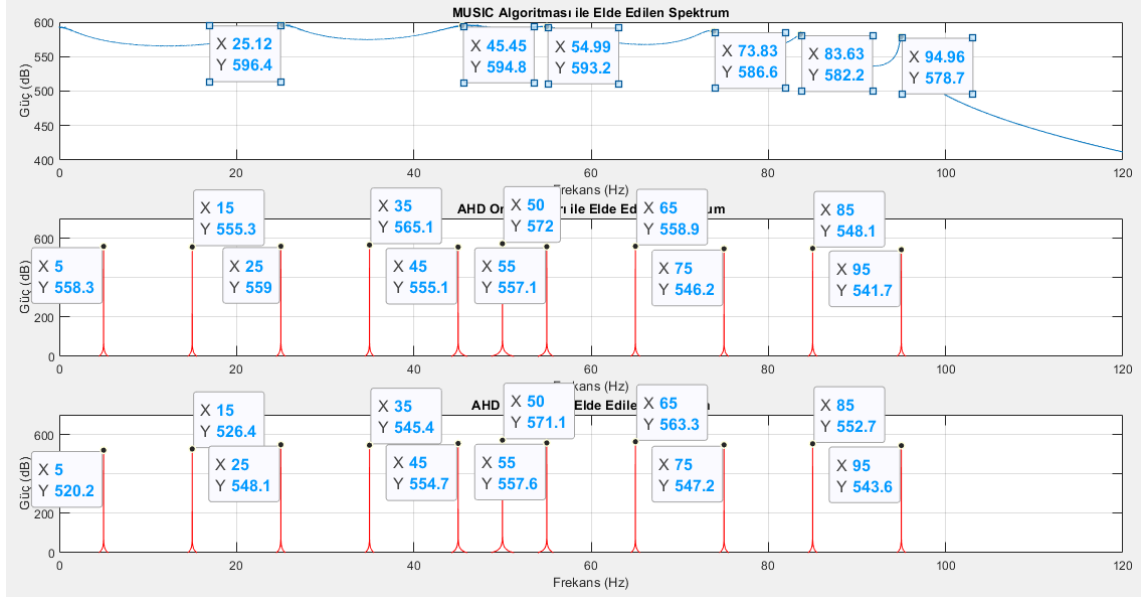
Şekil 4.64. Örneklem frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.2 için elde edilen sonuçlar.



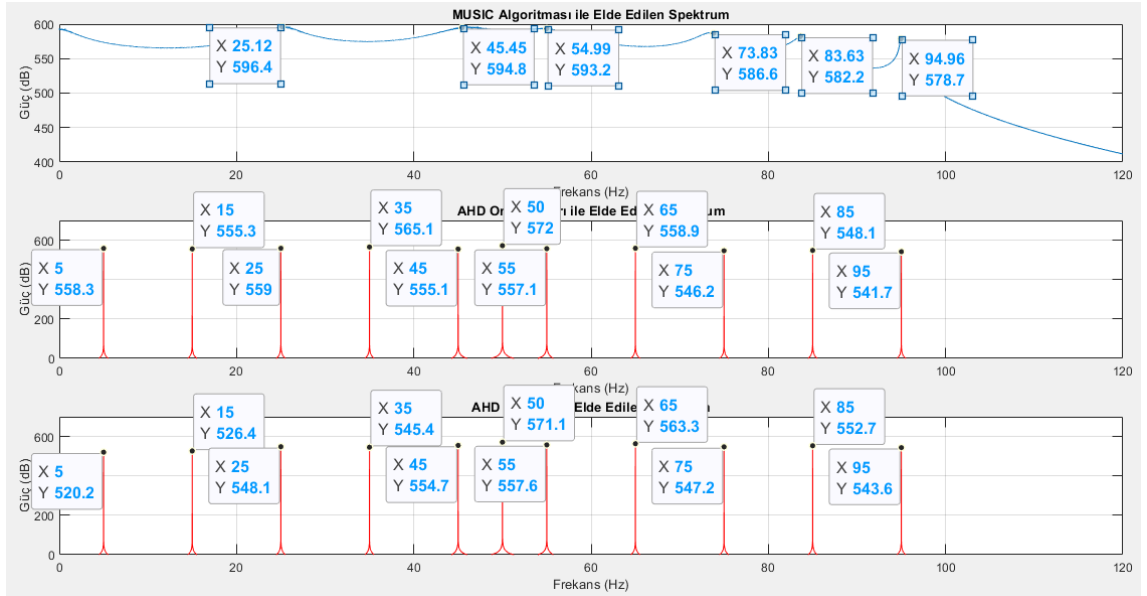
Şekil 4.65. Örneklem frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.3 için elde edilen sonuçlar.



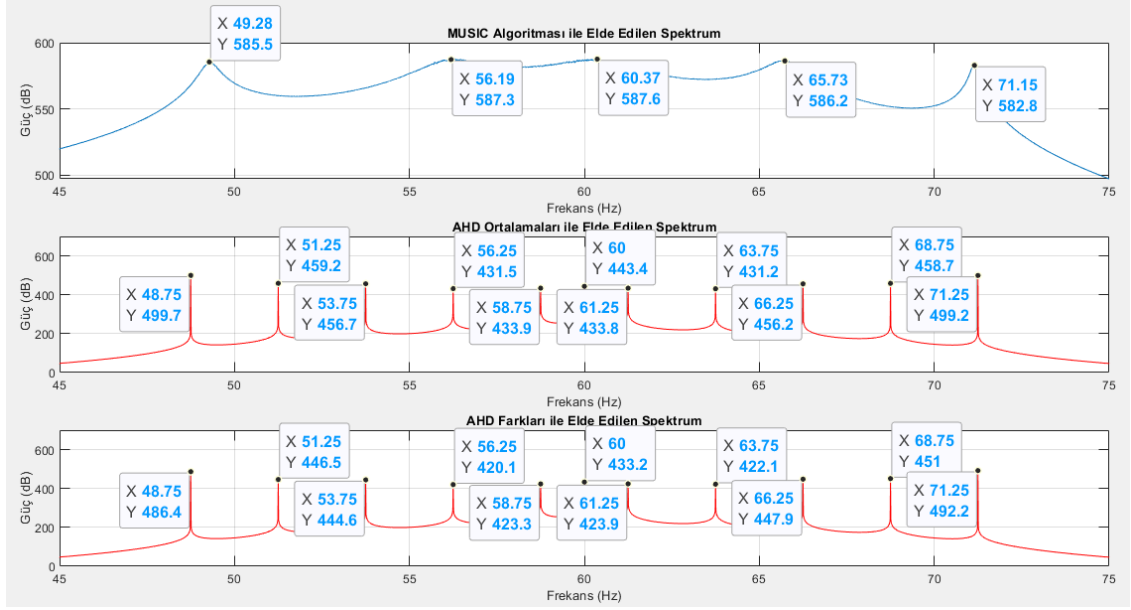
Şekil 4.66. Örneklem frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.3 için elde edilen sonuçlar.



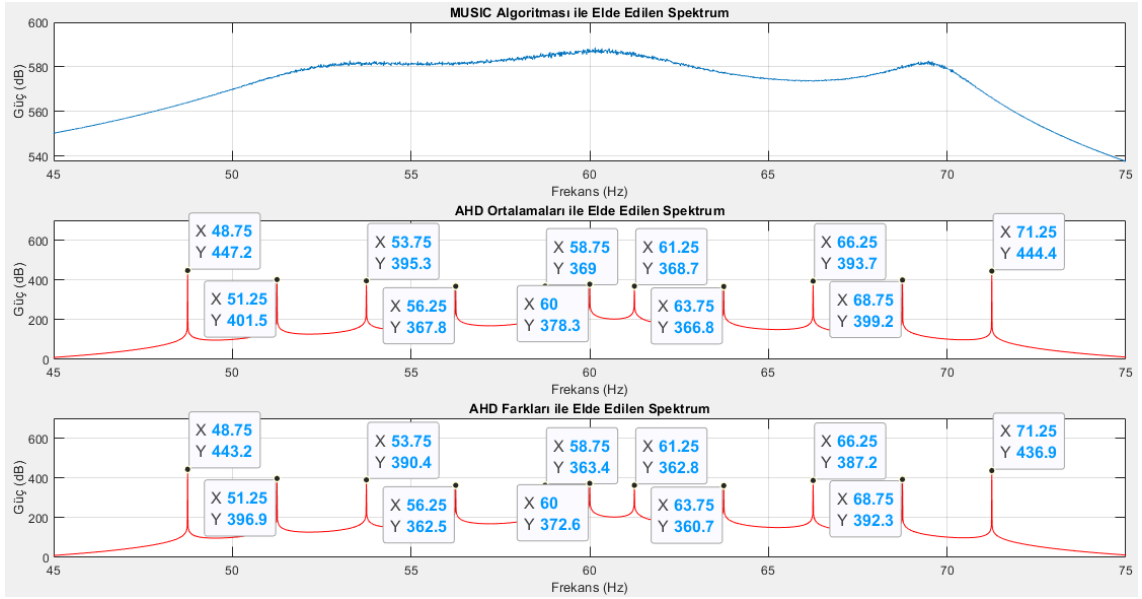
Şekil 4.67 Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar.



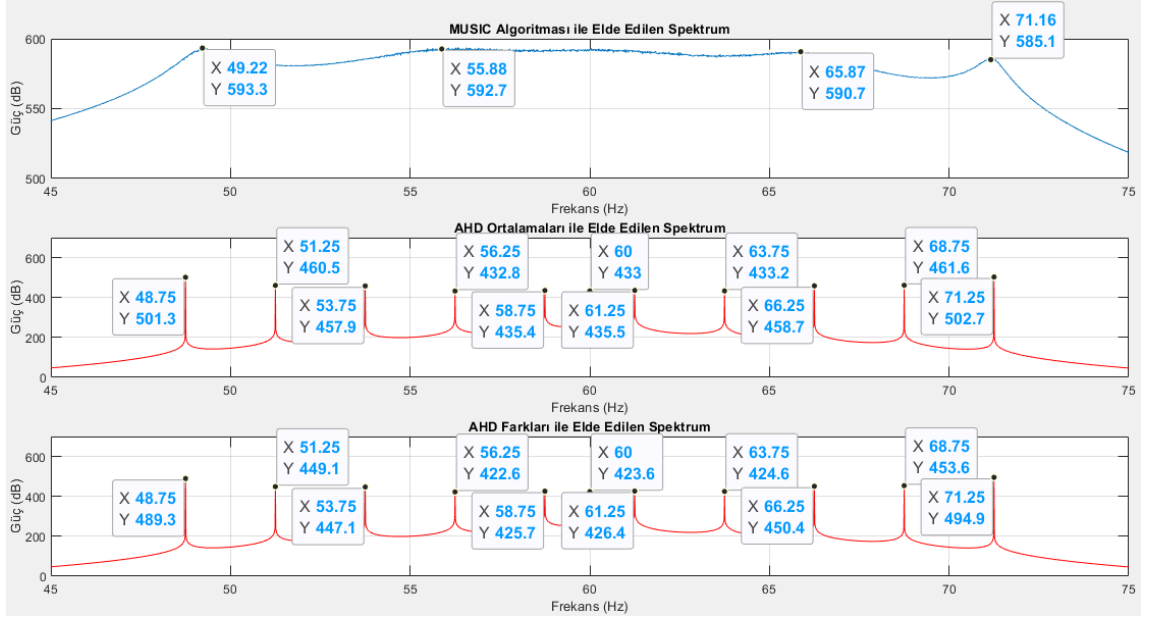
Şekil 4.68. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar.



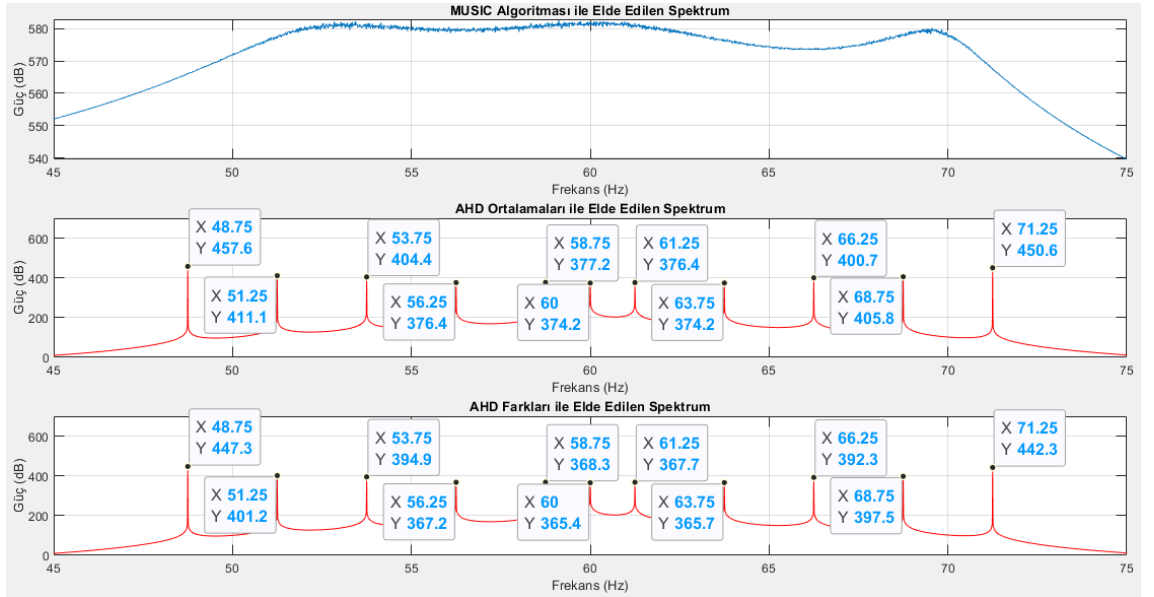
Şekil 4.69. Örneklem frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.5 için elde edilen sonuçlar.



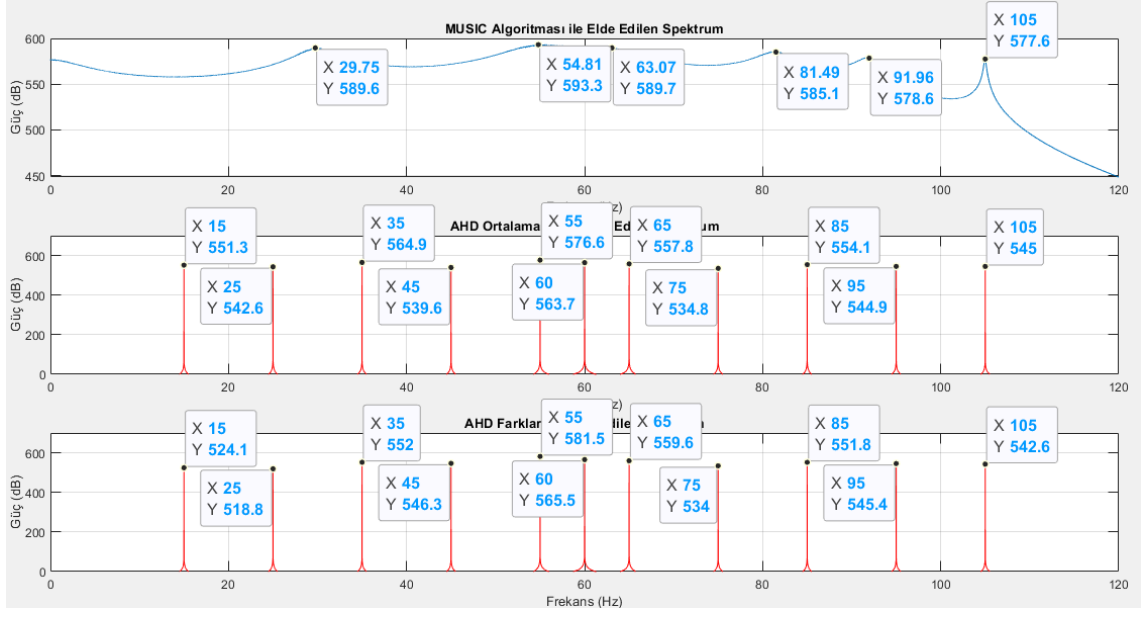
Şekil 4.70. Örneklem frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.5 için elde edilen sonuçlar.



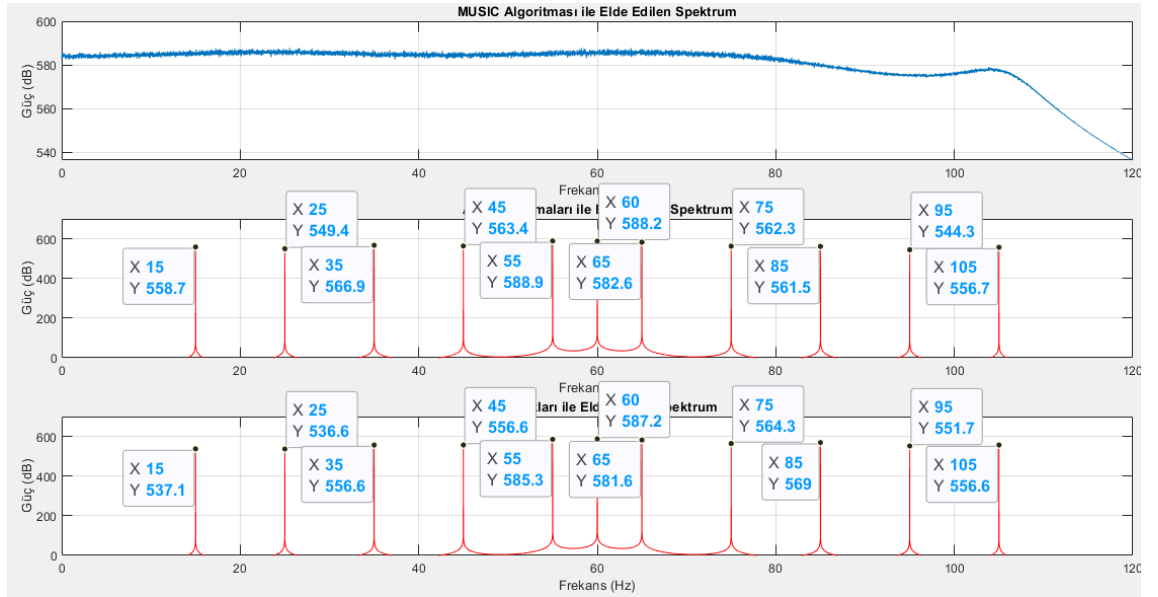
Şekil 4.71. Örneklem frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.6 için elde edilen sonuçlar.



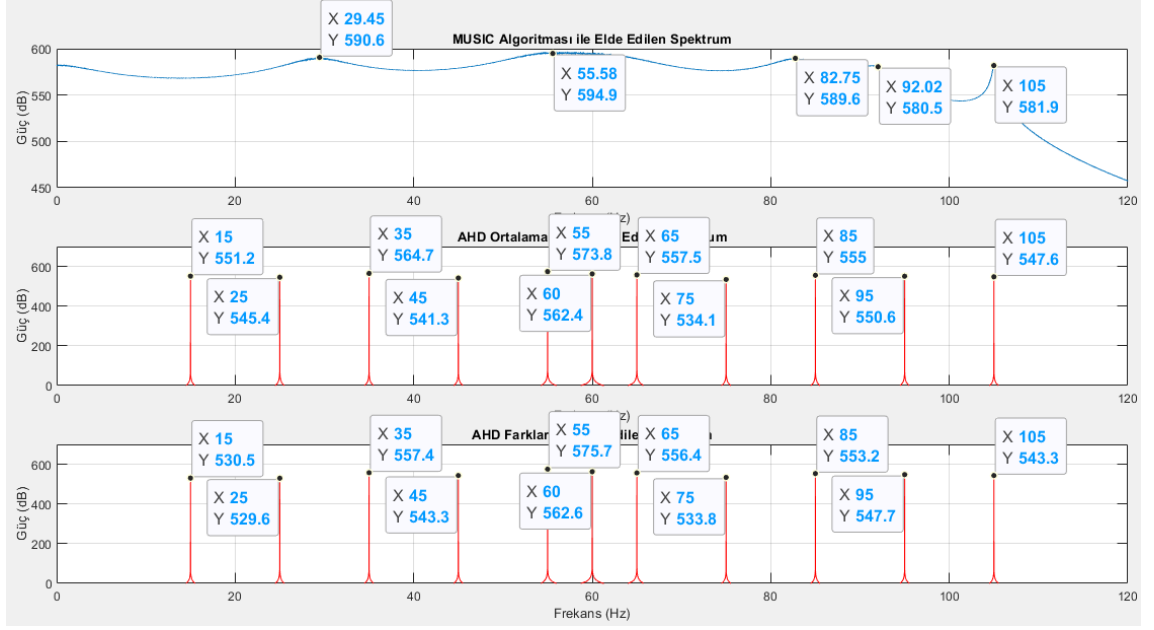
Şekil 4.72. Örneklem frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.6 için elde edilen sonuçlar.



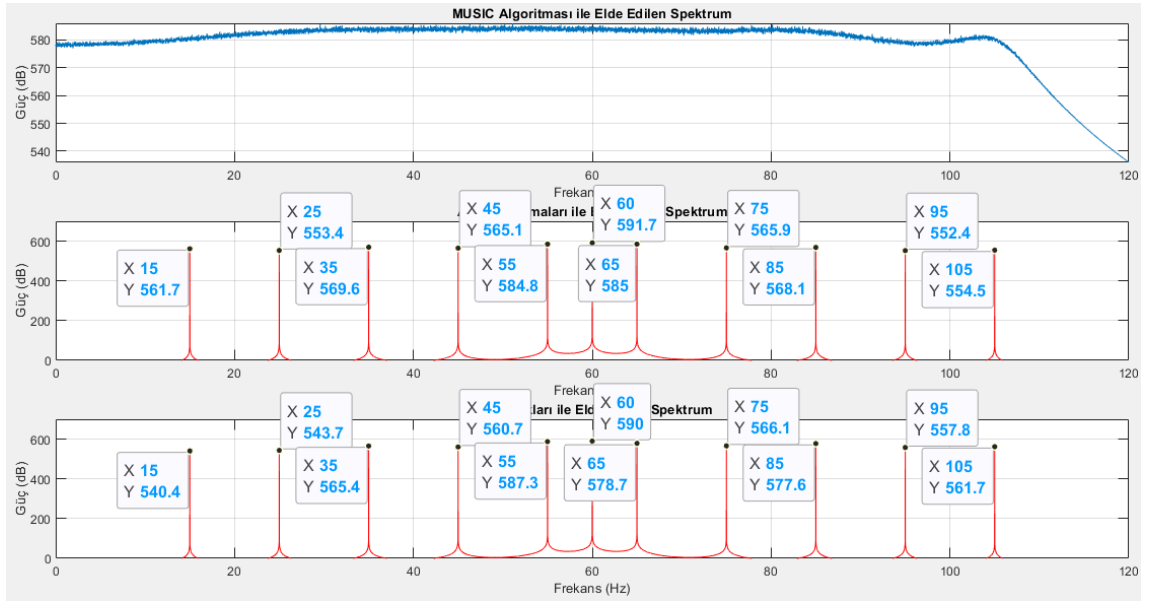
Şekil 4.73. Örnekleme frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.7 için elde edilen sonuçlar.



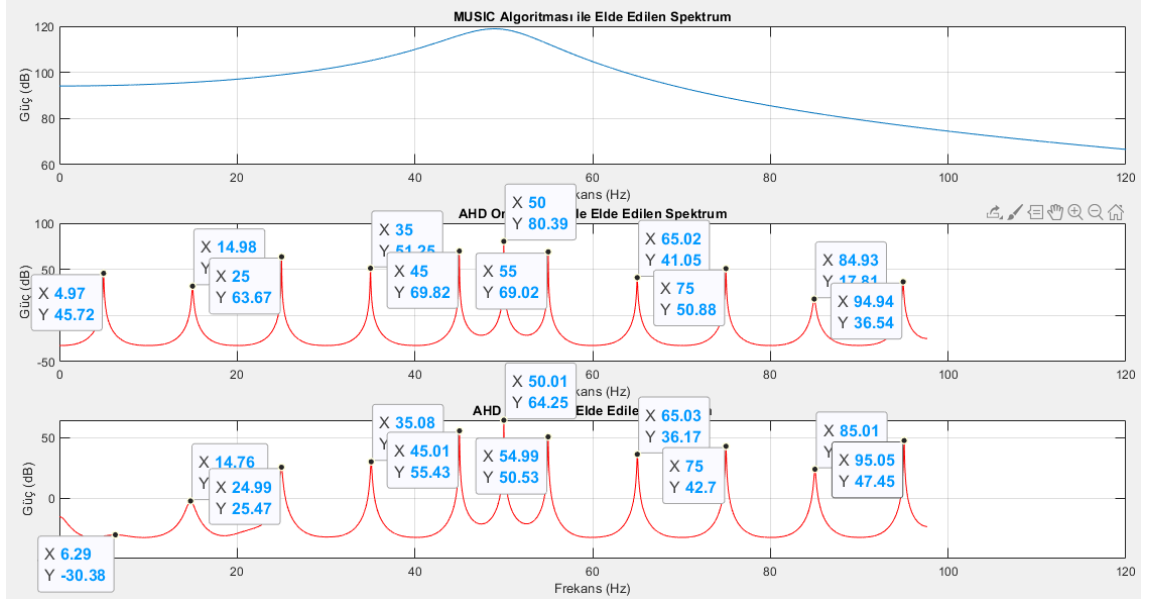
Şekil 4.74. Örnekleme frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.7 için elde edilen sonuçlar.



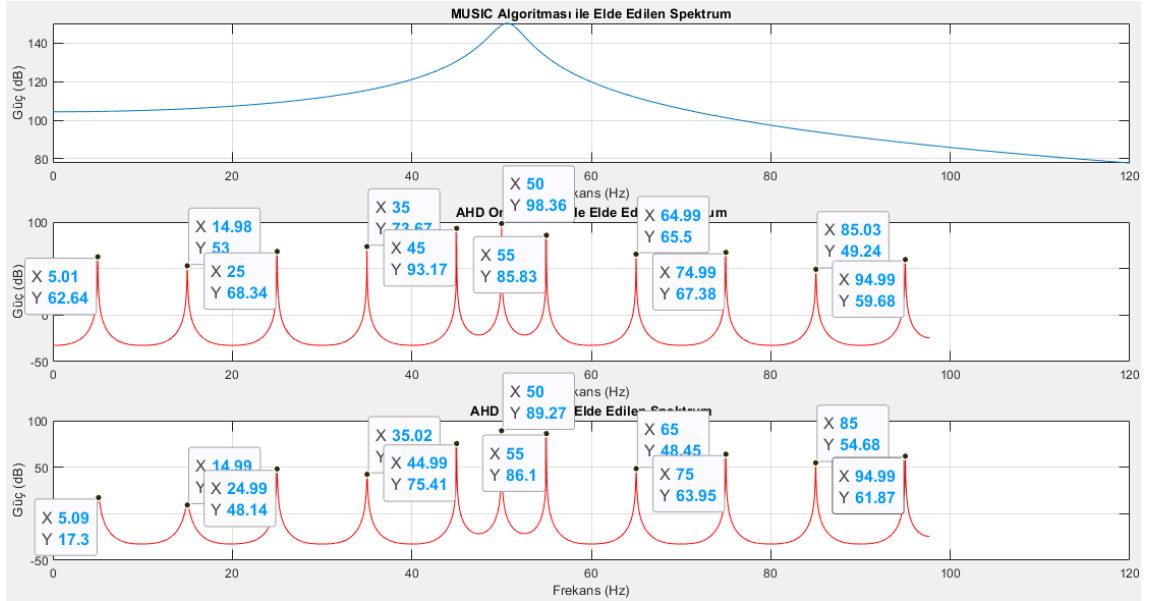
Şekil 4.75. Örneklem frekansı 8 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar.



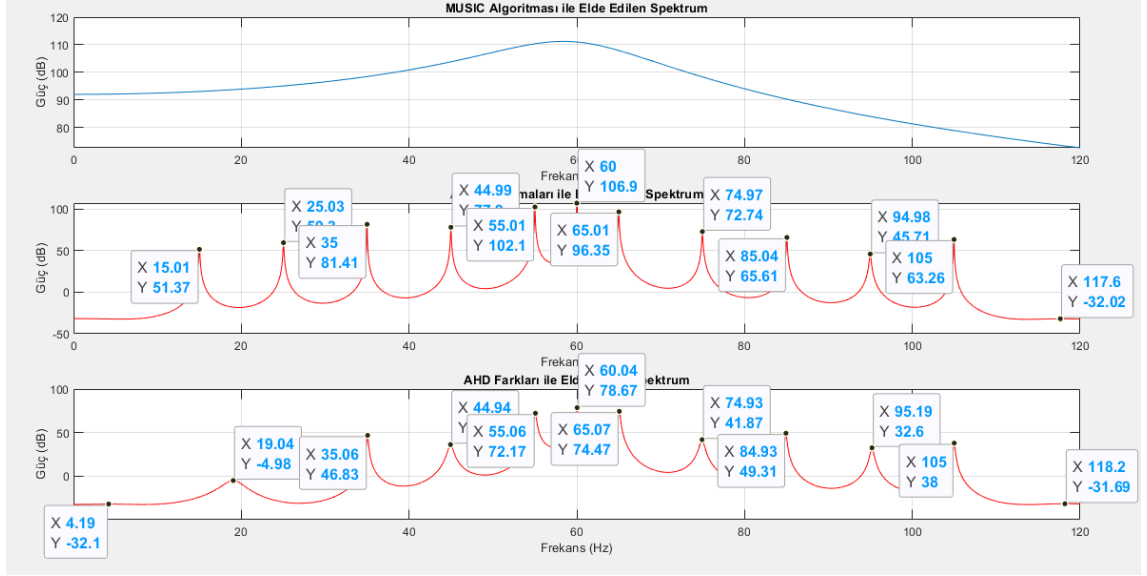
Şekil 4.76. Örneklem frekansı 100 kHz olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar.



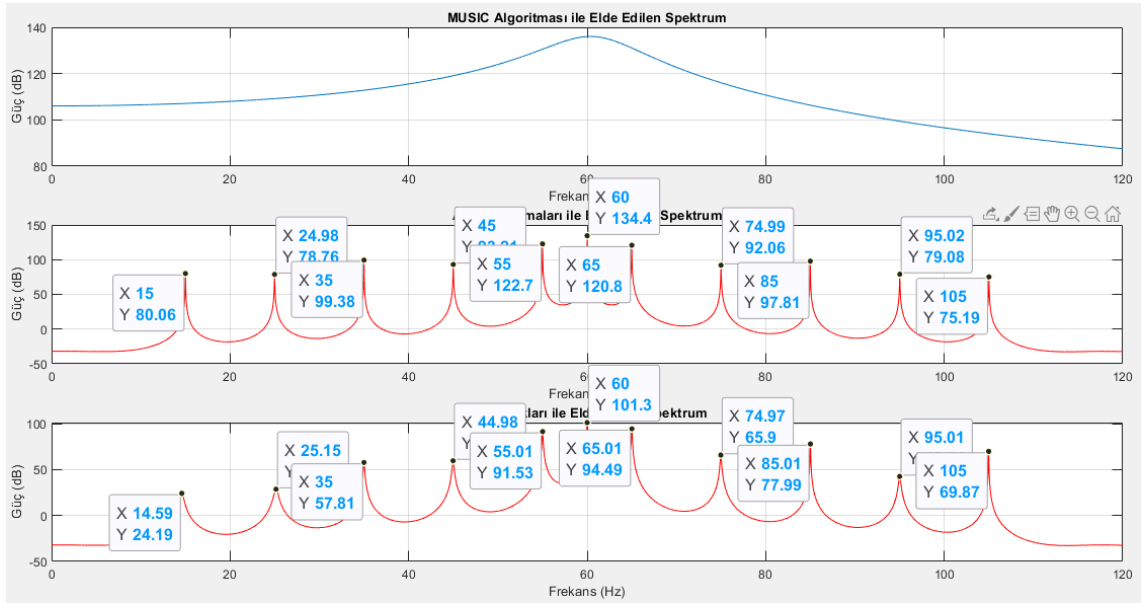
Şekil 4.77. Örnekleme frekansı 100 kHz ve $SNR = 10$ dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar.



Şekil 4.78. Örnekleme frekansı 100 kHz ve $SNR = 20$ dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.4 için elde edilen sonuçlar.



Şekil 4.79. Örnekleme frekansı 100 kHz ve $SNR = 10$ dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar.



Şekil 4.80. Örnekleme frekansı 100 kHz ve $SNR = 20$ dB olduğu durumda sırasıyla; MUSIC, önerilen AHD ortalamalı MUSIC ve önerilen AHD fark katsayılı MUSIC algoritmaları kullanılarak Çizelge 4.8 için elde edilen sonuçlar.

Çizelge 4.50. Farklı SNR değerleri için Çizelge 4.4'deki veriler kullanılarak elde edilen frekansların bağıl hata oranları (%)

| <i>SNR = 10 dB</i> | | <i>SNR = 20 dB</i> | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| AHD-MUSIC ortalama | AHD-MUSIC fark | AHD-MUSIC ortalama | AHD-MUSIC fark |
| 0,6 | 25,8 | 0,2 | 1,8 |
| 0,133333 | 1,6 | 0,133333 | 0,066667 |
| 0 | 0,04 | 0 | 0,04 |
| 0 | 0,228571 | 0 | 0,057143 |
| 0 | 0,022222 | 0 | 0,022222 |
| 0 | 0,02 | 0 | 0 |
| 0 | 0,018182 | 0 | 0 |
| 0,030769 | 0,046154 | 0,015385 | 0 |
| 0 | 0 | 0,013333 | 0 |
| 0,082353 | 0,011765 | 0,035294 | 0 |
| 0,063158 | 0,052632 | 0,010526 | 0,010526 |

Çizelge 4.51. Farklı SNR değerleri için Çizelge 4.8'deki veriler kullanılarak elde edilen frekansların bağıl hata oranları (%)

| <i>SNR = 10 dB</i> | | <i>SNR = 20 dB</i> | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| AHD-MUSIC ortalama | AHD-MUSIC fark | AHD-MUSIC ortalama | AHD-MUSIC fark |
| 0,066667 | 72,06667 | 0 | 2,733333 |
| 0,12 | 23,84 | 0,08 | 0,6 |
| 0 | 0,171429 | 0 | 0 |
| 0,022222 | 0,133333 | 0 | 0,044444 |
| 0,018182 | 0,109091 | 0 | 0,018182 |
| 0 | 0,066667 | 0 | 0 |
| 0,015385 | 0,107692 | 0 | 0,015385 |
| 0,04 | 0,093333 | 0,013333 | 0,04 |
| 0,047059 | 0,082353 | 0 | 0,011765 |

Çizelge 4.51. Farklı SNR değerleri için Çizelge 4.8’deki veriler kullanılarak elde edilen frekansların bağıl hata oranları (%) (devam)

| <i>SNR = 10 dB</i> | | <i>SNR = 20 dB</i> | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| AHD-MUSIC ortalama | AHD-MUSIC fark | AHD-MUSIC ortalama | AHD-MUSIC fark |
| 0,021053 | 0,2 | 0,021053 | 0,010526 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |

Çizelge 4.52. MUSIC ve AHD tabanlı MUSIC algoritmaları için hesaplama süreleri.

| Şekil No | MUSIC (s) | Ortalamalar (s) | Farklar (s) |
|-------------------|------------------|------------------------|--------------------|
| Şekil 4.61 | 2.5609 | 0.0712 | 0.0924 |
| Şekil 4.62 | 33.602 | 0.0746 | 0.0562 |
| Şekil 4.63 | 2.5315 | 0.0708 | 0.1144 |
| Şekil 4.64 | 40.909 | 0.1041 | 0.1071 |
| Şekil 4.65 | 2.6643 | 0.1104 | 0.0714 |
| Şekil 4.66 | 35.4087 | 0.1275 | 0.1384 |
| Şekil 4.67 | 2.6209 | 0.0809 | 0.0730 |
| Şekil 4.68 | 35.7437 | 0.0709 | 0.0568 |
| Şekil 4.69 | 2.6366 | 0.1133 | 0.0686 |
| Şekil 4.70 | 36.1964 | 0.0876 | 0.0555 |
| Şekil 4.71 | 2.5852 | 0.0772 | 0.0662 |
| Şekil 4.72 | 35.4068 | 0.0587 | 0.0510 |
| Şekil 4.73 | 2.5616 | 0.0687 | 0.0652 |
| Şekil 4.74 | 35.4356 | 0.1234 | 0.1029 |
| Şekil 4.75 | 2.6926 | 0.0700 | 0.0673 |
| Şekil 4.76 | 35.9393 | 0.1255 | 0.0974 |
| Şekil 4.77 | 32.8471 | 0.0647 | 0.0564 |
| Şekil 4.78 | 32.9045 | 0.0715 | 0.0535 |
| Şekil 4.79 | 32.9311 | 0.0899 | 0.0594 |
| Şekil 4.80 | 32.4225 | 0.1147 | 0.1026 |

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tezde, işaret parametrelerinin kestirimi için var olan yöntemler incelenmiş ve iki yeni yöntem önerilmiştir. İncelenen yöntemler, parametrik, parametrik olmayan ve hibrit teknikler olarak sınıflandırılmıştır. Bu alt başlıklarda, türetilen yöntemlerin matematiksel ifadeleri, ayrıntılarıyla ortaya konulmuştur. Ardından iki farklı hibrit yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerden birincisi işaretlerin genlik, faz ve frekans bilgilerini ortaya çıkarabilmekteyken, ikincisi frekans parametrelerini hızlı bir şekilde bulabilmektedir. Yapılan benzetimler, önerilen yöntemlerin türetildikleri ana yöntemlerden, daha hızlı yakınsama sağladığını ve daha düşük bağıl hata oranına sahip sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır.

Bu tezin çıkış noktası, Prony yönteminin ayrıntılarıyla incelenmesi ve sonuç bulma adımlarının değerlendirilmesi konusuna dayanmaktadır. Bilindiği üzere Prony yöntemi, oluşturduğu işaret modeli içerisinde bir sönüm parametresi tanımlamaktadır. Bu sönüm parametresi, Fourier serisine göre Prony açılımında bir fark oluşturmakta ve var olan ara-harmoniklerin tespit edilmesi konusunda üstünlük meydana getirmektedir. Tez içerisinde anlatıldığı üzere Prony yöntemi, işaretin anlık değeri ile geçmişteki değerleri arasında, geçmiş değerlerin sabit katsayılar ile ağırlıklandırılması, toplanması ve nihayetinde anlık değere eşitlenmesi biçiminde bir ilişki olduğunu varsayar. Bu katsayıların bir polinom oluşturacağını ve bu polinomun köklerinin işaretin frekanslarını vereceğini ifade eder. Tüm bunları, Prony seri açılımının; genlik, sönüm parametresi ve frekans bileşenlerinin toplanması esasına dayandırarak ve buradan ilgili polinomun türetilmesini sağlayarak yapar. Bu sayede; genlik, faz ve frekans değerlerini ortaya çıkarır.

Bu çalışmada, aşağıda maddeler halinde ifade edilen sorular üzerinde durulmuştur:

- Prony yöntemi, çok büyük eleman sayısına sahip matrislerin hesaplanmasına dayanır, peki bu matrisi küçültmek nasıl mümkün olabilir?
- İşaretin içerisindeki frekansları temsil eden polinomun derecesi düşürülebilir mi?
- Prony polinomunun derecesinin düşürülmesi, frekans tahmini konusunda olumlu veya olumsuz etki yaratır mı?
- Polinom derecesi nasıl seçilmelidir?
- Beyaz gürültünün polinom katsayılarına etkisi nedir?

Tüm bu soruların çözümü olarak, matris eleman sayılarının AHD katsayılarının kullanılması ile düşürülebileceği fikri ortaya atılmıştır. Fakat burada matematiksel bir ispatın olması gerekmektedir. AHD katsayıları, işaret verilerinin çiftler çiftler toplamı ve farklarının toplamından oluşmaktadır. Bu durum, Prony matrisinin satırlarının ikişerli toplamının tek bir farkla benzer bir veri sisteminin elde edilebileceğinin gösterilmesi ile yeni bir yöntemin türetilmesinin kapılarını açabilir. Burada meydana gelen fark, Prony matrisinin satırlarının ikişerli toplamının, işaret çiftlerinin yanında ara değerleri de hesaba katmasından dolayı, AHD katsayılarından farklı olarak işaretlerin ara toplamlarının da veri kümesinde yer almasına neden olmaktadır. Bunun üstesinden gelmek için ara toplamlara denk düşen polinom katsayılarının sıfır seçilmesi makul bir yaklaşımdır. Bu durumda aşağıda sıralanan kazanımlar elde edilmiş olur.

- Prony yönteminin hem kompleks genlik hem de frekans değerlerini elde etmek için kullanılan matrislerin eleman sayıları önemli ölçüde azaltılmış olur.
- Her bir AHD adımında polinom katsayı sayısı yarıya inmesi nedeniyle polinom derecesinin dikkate değer ölçüde düşürülmesi sağlanır.
- Bir polinomun katsayılarının üzerinde meydana gelecek ufak bir değişim, bu polinomun köklerinde ciddi oranda sapmalar meydana getirmektedir. İşaret üzerindeki gürültü, Prony polinom katsayılarının ufak oranda yanlış hesaplanmasına bile neden olsa, frekanslar bu katsayılardan oluşan polinomun kökleri olduğu için frekans tahmininde çok ciddi hatalar oluşur. Kompleks genlik matrisi ise yanlış bulunan frekanslardan dolayı, yine yanlış olarak genlik ve faz değerlerini verir. Bu nedenle, polinom derecesinin düşürülmesi, gürültülü veriler üzerinde frekansların doğru bir şekilde tahmin edilebilmesini sağladığı için önemli bir üstünlük meydana getirir.
- Seçilen polinom katsayı sayısının derecesinin düşürülmesi, hem gürültüye bağımlılığının azaltılmasından, hem de matris hesaplamalarından meydana gelecek bilgisayar hatalarından etkilenme riskinin düşürülmesinden dolayı, polinom katsayı seçiminde serbestlik sağlar. Çünkü elde edilen polinomun kökleri, polinom katsayılarının gürbüzleştirilmesi sebebiyle daha kararlı yapıda olacaktır.

Elde edilen bu kazanımlar, Nyquist kriterinin ihlal edilmemesi şartına bağlıdır. AHD katsayıları her bir adımda işaretin örnekleme frekansını yarı yarıya düşürür. Eğer bu

düşüş, işaret içerisindeki en yüksek mertebeden işaret bileşeninin frekansının altında olursa, Nyquist kriteri ihlal edilmiş olur ve frekanslar doğru bir biçimde azaltılamaz. Burada “Q öğrenmesi”ni temel alan yaklaşımların frekans tahmini açısından kullanılabileceğini gösterir. Basit bir ifadeyle, AHD katsayı derecesi görece yüksek bir seviyeden başlatılıp her bir adımda bir mertebe düşürülürse ve en az iki mertebede aynı frekanslar elde ediliyorsa, frekans bileşenlerinin doğru tahmin edildiği sonucuna ulaşılabilir ve önerilen yöntemin, orijinal Prony yöntemine göre hem daha kesin hem de daha hızlı sonuca ulaşabileceğini gösterir.

Ayrıca bu tezde sadece, AHD katsayılarının değil aynı zamanda “2” sayısından farklı toplamlardan meydana gelecek işaret grupları ile de benzer bir tarzda eleman sayısının ve polinom derecesinin azaltılmasının sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu durum önerilen yöntemin geliştirilmesi başlığı altında irdelenmiştir.

Önerilen ikinci yöntem, birinci yöntemin sonuçlarına dayanmaktadır ve MUSIC algoritmasının AHD katsayıları ile de hesaplanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda birinci yöntemin sonuçlarının irdelenmesi yerinde olacaktır. Önerilen yöntemin frekans kestirimi açısından en önemli sonucu, herhangi bir yöntem ile AHD katsayılarının kullanılması doğrultusunda, AHD derecesinin 2'nin kuvveti olarak hesaplanması ve elde edilen frekans değerleri ile çarpılması, Nyquist kriteri ihlal edilmediği sürece, orijinal işaretin frekanslarının bulunabileceği bilgisini ortaya koymasındadır. Bu bağlamda, ilgili denklem kurularak AHD katsayıları ile MUSIC algoritması gerçekleştirilebilir. MUSIC algoritmasının uygulanmasında, frekans kestirimi ile ilgili bu sonuca ek olarak iki önemli fayda daha vardır. Bunlardan birincisi, işaretin spektrumunun AHD derecesine bağlı olarak her adımda yarıya düşürülmesinin, ortaya çıkarılacak frekans bileşenlerinin değerini değiştirmemesidir. İkinci fayda ise, gürültü ile korelasyonu araştırılan frekans vektörünün, spektrumun daraltılmasından dolayı daha az elemandan oluşacağı ve bu sayede algoritmanın daha hızlı çalışacağı gerçeğidir. Önerilen birinci yöntemin sonucu ve MUSIC algoritmasına özgü iki önemli fayda sayesinde, AHD ile MUSIC algoritmalarının gerçekleştirilmesi, önerilen yöntemlerden ikincisini oluşturmaktadır.

Önerilen yöntemler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, ileriye yönelik birçok çalışmanın gerçekleştirilmesi konusunda ön ayak oluşturacak yapıdadırlar. Bunlardan önemli bir tanesi, filtre tasarım uygulamaları olabilir. Prony yönteminde, frekansların tahmini için polinom

katsayılarının elde edildiği matris eşitliği bir filtre olarak yorumlanabilir. Çünkü işaretin anlık değeri, geçmişteki değerlerine sabit katsayılarla bağımlıdır. Bu tez çalışmasında, AHD katsayılarının işaretin frekans bileşenlerini Prony yöntemi ile ortaya çıkardığı gösterilmiştir. Buradan hareketle, AHD katsayılarının işaretin anlık ve geçmiş değerleriyle ilişkili olduğu, bu ilişkinin sabit katsayılarla sağlandığı ve bu katsayıların değiştirilerek manipülasyonu sayesinde istenmeyen frekans bileşenlerinin silinebileceği sonucuna ulaşılabılır. Örneğin, istenmeyen bir frekansın sönüm katsayısı çok yüksek seçilerek, o frekansın işaret içerisinde silinebilmesi sağlanabilir. Veyahut polinomun ilgili kökü, katsayılar değiştirilerek tamamen ortadan kaldırılabilir. Bu yöntemlerden birincisinin (sönüm frekansının yüksek seçilmesinin) daha pratik olacağı aşikârdır. Çünkü kökü ortadan kaldırmak, frekans bileşeninin anlık olarak azaltılmasından daha da zordur. Sönüm parametresinin yüksek seçilmesi, sadece ilgili kökün reel bir sayı ile çarpılması anlamına gelir ve oluşan köklere sahip polinomun katsayılarının bulunması gayet kolay olacaktır.

Önerilen yöntemlerin ileriye yönelik çalışmalar konusunda etki edebileceği ikinci bir araştırma konusu, yüksek veri gerektiren YSA uygulamalarında, yapay olarak veri sayısının artırılmasını sağlamasıdır. Bunu başarmak için, işaretin orijinal değerlerinin daha yüksek örnekleme frekansına sahip başka bir işaretin AHD dönüşümü ile elde edildiği varsayılır. Başka bir deyişle, orijinal işaretin, aslında başka bir işaretin AHD katsayıları olduğu düşünülür. Bu düşünce sayesinde, orijinal işaret üzerinden daha yüksek frekans bileşenlerine sahip yeni işaretler üretilebilir. Üretilen bu işaretin, YSA'lara uygulanabilecek orijinal frekans bileşenlerinin yanında yeni bileşenlere de sahip bir veri seti olacağı öngörülebilir. Başka bir açıdan bu yöntem takip edilerek, bir tür işaret generatörü oluşturulmuş olur. Bu işaret generatörü, daha üst mertebenden frekans bileşenlerine sahip yeni bir işareti, düşük örnekleme frekanslı halinden üretmiş olacaktır.

Önerilen yöntemlerin üçüncü bir faydası, başka frekans kestirim yöntemlerinin de AHD katsayıları ile gerçekleştirilebileceğini ortaya koymasındadır. Buradaki temel mantık AHD ile MUSIC algoritmasının gerçekleştirilmesine benzerdir. Bu yöntemden farklı olarak, her yöntemin kendi iç dinamikleri olduğu için, AHD katsayılarının veri sayısını azaltmasının ötesinde, uygulanacak yöntem içerisindeki farklı değişkenlerin de olumlu etkilenebileceği metotlar geliştirilebilir. Özellikle bu üçüncü yaklaşım frekans kestirim

alanında, yeni yöntemlerin geliştirilmesi konusunda çok önemli katkılar sağlayabileceği söylenebilir.

Bu tez çalışmasında, işaret parametre kestirim alanında iki farklı yöntem ve bu yöntemlerden birincisinin geliştirilmesi konusunda çalışmalar sunulmuştur. Önerilen bu yöntemlerin, farklı işaret kestirim yöntemlerine de uygulanabileceği konusuna değinilmiştir. Birçok farklı alanda da geliştirilen yöntemin uygulanmasının mümkün olduğu düşünülmektedir. Geliştirilen yöntemlerin gerçek zamanlı birçok uygulamada da başarılı sonuçlar vereceği, gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında elde edilen hızlı ve düşük bağıl hata oranına sahip sonuçlar sayesinde söylenebilir. Tezde ele alınan konu ve geliştirilen yöntemlerin, birçok işaret kestirim konusu ile ilgili alanda uygulanması ve buradaki bakış açısıyla daha üst düzeyde frekans kestirim yöntemlerinin geliştirilmesi açısından önemli olduğunu belirtmek, benzetim ile elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında mümkündür.

KAYNAKLAR

- Abu Al-Feilat, Eyad A., El-Amin, I., Bettayeb, M. 1994.** Power system harmonic estimation: a comparative study. *Electric Power Systems Research*, 29(2):, 91–97. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0378-7796(94)90066-3)
- Agha Zadeh, R., Ghosh, A., Ledwich, G. 2010.** Combination of Kalman filter and least-error square techniques in power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4):, 2868–2880. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2049276>
- Agrawal, S., Mohanty, S., Agarwal, V. 2015.** Harmonics and inter harmonics estimation of DFIG based standalone wind power system by parametric techniques. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*, 67:, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.014>
- Agrez, D. 2002.** Weighted multipoint interpolated DFT to improve amplitude estimation of multifrequency signal. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(2):, 287–292. <https://doi.org/10.1109/19.997826>
- Aiello, M., Cataliotti, A., Nuccio, S. 2005.** A Chirp-Z Transform-Based Synchronizer for Power System Measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54(3):, 1025–1032. <https://doi.org/10.1109/TIM.2005.847243>
- Aiello, M., Cataliotti, A., Cosentino, V., Nuccio, S. 2007.** Synchronization Techniques for Power Quality Instruments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(5):, 1511–1519. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.903585>
- Akaike, H. 1969a.** Fitting autoregressive models for prediction. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 21(1):, 243–247. <https://doi.org/10.1007/BF02532251>
- Akaike, H. 1969b.** Power spectrum estimation through autoregressive model fitting. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 21(1):, 407–419. <https://doi.org/10.1007/BF02532269>
- Alaşahan, Y., Ercan, İ., Öztürk, A., Tosun, S. 2016.** GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN KRİTİK DEĞERLERE ETKİSİ. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Düzce Üniversitesi: , 0.
- Alkan, A., Yılmaz, Ahmet S. 2007.** Frequency domain analysis of power system transients using Welch and Yule–Walker AR methods. *Energy Conversion and Management*, 48(7):, 2129–2135. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2006.12.017>
- Andria, G., Salvatore, L., Savino, M., Trotta, A. 1992.** Techniques for identification of harmonics in industrial power systems. *Conference Record IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference : Conference Record IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, IEEE: , 114–119. <https://doi.org/10.1109/IMTC.1992.245166>
- Andria, G., Savino, M., Trotta, A. 1989.** Windows and interpolation algorithms to

improve electrical measurement accuracy. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 38(4):, 856–863. <https://doi.org/10.1109/19.31004>

Arıcı, N.; İskender, A. 2020. Fotovoltaik Güneş Santrallerinde Şebeke Bağlantı Sorunları ve Çözümleri. *Politeknik Dergisi*, 23(1):, 215–222. <https://doi.org/www.doi.org/10.2339/politeknik.644820>

Arrillaga, J., Smith, B., Watson, N., Wood, A. 2013. Iterative Harmonic Analysis. *Power System Harmonic Analysis : Power System Harmonic Analysis*, John Wiley & Sons, Ltd: , 241–281. <https://doi.org/10.1002/9781118878316.ch9>

Arsac, J. 1961. Transformation de Fourier et théorie des distributions, Paris, : Dunod.

Barros, J.; Prez, E.; Pigazo, A.; Diego, R. 2002. Simultaneous measurement of harmonics, interharmonics and flicker in a power system for power quality analysis. *IET Conference Proceedings*, 100-105(5). <https://doi.org/10.1049/cp:20020018>

Barros, J., Diego, R. 2006. On the Use of the Hanning Window for Harmonic Analysis in the Standard Framework. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(1):, 538–539. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852339>

Bedell, F., Mayer, E. 1915. Distortion of Alternating-Current Wave Caused by Cyclic Variation in Resistance. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XXXIV(1):, 333–348. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1915.4765220>

Bedell, F., Tuttle, E. 1906a. The effect of iron in distorting alternating-current wave form. *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, 25(9):, 601–621. <https://doi.org/10.1109/PAIEE.1906.6742509>

Bedell, F., Tuttle, E. 1906b. The Effect of Iron in Distorting Alternating-Current Wave Form. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XXV:, 671–691. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1906.4764757>

Belega, D., Dallet, D., Slepicka, D. 2010. Accurate Amplitude Estimation of Harmonic Components of Incoherently Sampled Signals in the Frequency Domain. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(5):, 1158–1166. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2045144>

Bettayeb, M., Qidwai, U. 2003. A hybrid least squares-GA-based algorithm for harmonic estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2):, 377–382. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.807458>

Bettayeb, M., Qidwai, U. 1998. Recursive estimation of power system harmonics. *Electric Power Systems Research*, 47(2):, 143–152. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00063-7)

Bienvenu, G., Kopp, L. 1983. Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 31(5):, 1235–1248. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1983.1164185>

Bitmead, R. 1982. On recursive discrete Fourier transformation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 30(2):, 319–322.

<https://doi.org/10.1109/TASSP.1982.1163868>

- Bitmead, R., Ah Tsoi, P. 1986.** A Kalman filtering approach to short-time Fourier analysis. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 34(6):, 1493–1501. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1986.1164989>
- Boguslaw S., Rogoz, M., Zbigniew H. 2007.** Power system harmonic estimation using neural networks. *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation : 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, IEEE: , 1–8. <https://doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424245>
- Bollen, M., Gu, I. 2006.** Signal processing of power quality disturbances, IEEE Press. Erişim adresi: <https://www.wiley.com/entr/Signal+Processing+of+Power+Quality+Disturbances-p-9780471731689>
- Boucherot, P. 1907.** Séparation des puissances réelle et magnétique dans les calculs relatifs aux courants alternatifs. *La Houille Blanche*, 6(6):, 138-139. <http://doi.org/10.1051/lhb%2F1907031>
- Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G. 1994.** Time Series Analysis: Forecasting & Control. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2004.02.001>
- Bracale, A., Carpinelli, G. 2009.** An ESPRIT and DFT-based new method for the waveform distortion assessment in power systems. *IET Conference Publications : IET Conference Publications*, IET: , 430–430. <https://doi.org/10.1049/cp.2009.0746>
- Bracale, A., Carpinelli, G., Leonowicz, Z., Lobos, T., Rezmer, J. 2008.** Measurement of IEC Groups and Subgroups Using Advanced Spectrum Estimation Methods. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(4):, 672–681. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.911701>
- Brigham, E. 1973.** The Fast Fourier Transform: An Introduction to Its Theory and Application, Englewood Cliffs, New Jersey, : Prentice Hall PTR.
- Caramia, P., Carpinelli, G., Rossi, F., Verde, P. 1994.** Probabilistic iterative harmonic analysis of power systems. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 141(4):, 329–338. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19941089>
- Carbone, R;Morrison, R E; Testa, A;Menniti, D. 1995.** Harmonic and interharmonic distortion modeling in multiconverter systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(3):, 1685–1692. <https://doi.org/10.1109/61.400957>
- Carbone, R., Lo Schiavo, A., Marino, P., Testa, A. 2002.** Frequency coupling matrices for multi-stage conversion system analysis. *European Transactions on Electrical Power*, 12(1):, 17–24. <https://doi.org/10.1002/etep.4450120104>
- Carbone, R., Menniti, D., Morrison, R. E., Testa, A. 1995.** Harmonic and Interharmonic Distortion Modeling in Multiconverter Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(3):, 1685–1692. <https://doi.org/10.1109/61.400957>
- Cataliotti, A., Cosentino, V., Nuccio, S. 2007.** A Phase-Locked Loop for the Synchronization of Power Quality Instruments in the Presence of Stationary and

Transient Disturbances. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(6):, 2232–2239. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908350>

- Chang, G., Chen, C., Chin, Y. 2008.** Modified high-resolution Singular Value Decomposition method for power signal analysis by using down-sampling technique. *2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power* : 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE: , 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2008.4668751>
- Chang, G., Cheng-I Chen, Quan-Wei Liang 2009.** A Two-Stage ADALINE for Harmonics and Interharmonics Measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6):, 2220–2228. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2017093>
- Chang, G., Cheng-I, C. 2010.** Measurement techniques for stationary and time-varying harmonics. *IEEE PES General Meeting : IEEE PES General Meeting*, IEEE: , 1–5. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589611>
- Chang, G., Chen, C. 2010.** An Accurate Time-Domain Procedure for Harmonics and Interharmonics Detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3):, 1787–1795. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2037230>
- Chang, G., Cheng-I C., Yu-Feng T. 2010.** Radial-Basis-Function-Based Neural Network for Harmonic Detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6):, 2171–2179. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2034681>
- Chang, G., Chen, C., Liu, Y., Wu, M. 2008.** Measuring power system harmonics and interharmonics by an improved fast Fourier transform-based algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2(2):, 192. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070205>
- Chang, Y., Hsieh, Y., Moo, C.** Truncation effects of FFT on estimation of dynamic harmonics in power system. *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)* : PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409) (Vol. 3), IEEE: , 1155–1160. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2000.898132>
- Chen, C., Chang, G., Hong, R., Li, H. 2010.** Extended Real Model of Kalman Filter for Time-Varying Harmonics Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(1):, 17–26. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2035217>
- Chen, C., Chang, G. 2009.** An efficient Prony’s method for time-varying power system harmonic estimation. *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems* : 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, IEEE: , 1701–1704. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2009.5118102>
- Chen, C., Xu, T., Piao, Z., Liang, W., Yuan, Y. 2009.** The study on FFT harmonic detecting method of rural network based on wavelet denoising. *2009 International Conference on Energy and Environment Technology, ICEET 2009* : 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, ICEET 2009 (Vol. 2), , 365–368. <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.327>

- Chen, H., Sun, Y., Cheng, Y. 2009.** Harmonic and inter-harmonic detection of grid-connected distributed generation based on modified mathematical morphology filter and hilbert-huang transformation. *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09* : 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09, , 1155–1160. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2009.5157557>
- Chen, L., Zheng, D., Chen, S., Han, B. 2017.** Method based on sparse signal decomposition for harmonic and inter-harmonic analysis of power system. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 12(2):, 559–568. <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.2.559>
- Chen, Y. 2008.** Harmonic Detection in Electric Power System Based on Wavelet Multi-resolution Analysis. *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering* : 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering, IEEE: , 1204–1207. <https://doi.org/10.1109/CSSE.2008.18>
- Cho, S., Jang, G., Kwon, S. 2010.** Time-frequency analysis of power-quality disturbances via the Gabor-Wigner transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(1):, 494–499. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2034832>
- Cooley, J., Tukey, J., 1965.** An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*, 19(90):, 297–301. <https://doi.org/10.2307/2003354>
- Costa, F., Cardoso, A. 2006.** Harmonic and Interharmonic Identification Based on Improved Prony's Method. *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics* : IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IEEE: , 1047–1052. <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347673>
- Costa, F., Cardoso, A., Fernandes, D. 2007.** Harmonic Analysis Based on Kalman Filtering and Prony's Method. *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 696–701. <https://doi.org/10.1109/POWERENG.2007.4380137>
- 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 Transactions on Industrial Electronics*, 58(3):, 1027–1035. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2048293>
- Daponte, P., Menniti, D., Testa, A. 1996.** Segmented Chirp Z-Transform and multiple deep dip windows for electrical power system harmonic analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 18(4):, 215–224. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(96\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(96)00058-9)
- Das, S. ;Karnik, N. Santoso, S. 2011.** Time-Domain Modeling of Tower Shadow and Wind Shear in Wind Turbines. *International Scholarly Research Notices*, 2011:, 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.5402/2011/890582>
- Dash, P., Hasan, S., Panigrahi, B. 2010.** A hybrid unscented filtering and particle swarm optimization technique for harmonic analysis of nonstationary signals.

Measurement, 43(10):, 1447–1457.
<https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2010.08.013>

- Dash, P., Krishnanand, K., Padhee, M. 2011.** Fast recursive Gauss-Newton adaptive filter for the estimation of power system frequency and harmonics in a noisy environment. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 5(12):, 1277–1289. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2011.0034>
- Dash, P., Pradhan, A., Panda, G. 1999.** Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3):, 761–766. <https://doi.org/10.1109/61.772312>
- Dash, P., Sharaf, A. 1988.** Int. Conf. on Harmonics in Power Systems. *A Kalman filtering approach for estimation of power system harmonics* : A Kalman filtering approach for estimation of power system harmonics, Nashville, Indiana, : , 34–40.
- Dash, P., Swain, D., Liew, A., Rahman, S. 1996.** An adaptive linear combiner for on-line tracking of power system harmonics. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(4):, 1730–1735. <https://doi.org/10.1109/59.544635>
- De Carvalho, J., Duque, C., Lima, M., Coury, D., Ribeiro, P. 2014.** A novel DFT-based method for spectral analysis under time-varying frequency conditions. *Electric Power Systems Research*, 108:, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.10.017>
- De Carvalho, J., Duque, C., Ribeiro, M., Cerqueira, A., Baldwin, T., Ribeiro, O. 2009.** A PLL-Based Multirate Structure for Time-Varying Power Systems Harmonic/Interharmonic Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4):, 1789–1800. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2027474>
- Diego, R., Barros, J. 2010.** Subharmonic measurement using DFT and Wavelet-Packet Transform in an IEC extended framework. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 43(10):, 1603–1608. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.09.012>
- Do Nascimento, C., de Oliveira, A., Goedel, A., Amaral Serni, P. 2011.** Harmonic identification using parallel neural networks in single-phase systems. *Applied Soft Computing*, 11(2):, 2178–2185. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2010.07.017>
- Doggett, L. A., Queer, E. R. 1929.** Induction Motor Operation With Non-Sinusoidal Impressed Voltages. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48(4):, 1217–1220. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1929.5055384>
- Dos Santos, E., Neto, J., Juche., M., Cardoso, G. 2015.** Power system frequency estimation using morphological prediction of Clarke components. *Electric Power Systems Research*, 122:, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.01.012>
- Duhamel, P., Vetterli, M. 1990.** Fast fourier transforms: A tutorial review and a state of the art. *Signal Processing*, 19(4):, 259–299. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(90\)90158-U](https://doi.org/10.1016/0165-1684(90)90158-U)

- Elnady, A. 2012.** Accurate measurement and tracking for subharmonics and inter-harmonics. *Electric Power Components and Systems*, 40(9):, 935–955. <https://doi.org/10.1080/15325008.2012.666618>
- Evans, R., Muller, H. 1939.** Harmonics in the A-C Circuits of Grid-Controlled Rectifiers and Inverters. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 58(12):, 861–870. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1939.5057906>
- Ferrero, A., Ottoboni, R. 1992.** High-accuracy Fourier analysis based on synchronous sampling techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 41(6):, 780–785. <https://doi.org/10.1109/19.199406>
- Fisher, R. 1922.** On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics. *Philosophical Transactions Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 222(594):, 309–368. <https://doi.org/10.1098/rsta.1922.0009>
- Frank, J. 1910.** Observation of harmonics in current and in voltage wave shapes of transformers. *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, 29(5):, 665–746. <https://doi.org/10.1109/PAIEE.1910.6659994>
- Gallo, D., Langella, R., Testa, A. 2003.** Inter-harmonics. Part 1. Aspects related to modeling and simulation. *Proceedings of the 6th International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions* : Proceedings of the 6th International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Milan, Italy, : Politecnico di Milano. Dipartimento di Elettrotecnica: , 168–173. <https://doi.org/8874880731>
- Gallo, D., Langella, R., Testa, A. 2004.** Desynchronized Processing Technique for Harmonic and Interharmonic Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3):, 993–1001. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.829941>
- Gallo, D., Langella, R., Testa, A. 2003.** Interharmonics Part 2: Aspects related to measurement and limits. *6th International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions* : 6th International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Milan, Italy, : , 174–181.
- Garanayak, P., Naayagi, R., Panda, G. 2020.** A High-Speed Master-Slave ADALINE for Accurate Power System Harmonic and Inter-Harmonic Estimation. *IEEE Access*, 8:, 51918–51932. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980115>
- Golub, G. Loan, F. 1996.** Matrix computations, London, : Johns Hopkins University Press.
- Ghodratollah S., Razzaz, M., Moghaddasian, M. 2007.** Harmonic Estimation in Power Systems Using Adaptive Perceptrons Based on a Genetic Algorithm. *WSEAS Trans. Power Syst*, 11(11):, 11. Erişim adresi: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.495.8210&rep=rep1&type=pdf>
- Girgis, A., Chang, W., Makram, E. 1991.** A digital recursive measurement scheme for online tracking of power system harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*,

6(3):, 1153–1160. <https://doi.org/10.1109/61.85861>

- Girgis, A., Ham, F. 1980.** A Quantitative Study of Pitfalls in the FFT. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-16(4):, 434–439. <https://doi.org/10.1109/TAES.1980.308971>
- Goertzel, G. 1958.** An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series. *The American Mathematical Monthly*, 65(1):, 34–35. <https://doi.org/10.2307/2310304>
- Gonen, T. 1984.** Bibliography of Power System Harmonics, Part I. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103(9):, 2460–2469. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318400>
- Grady, W. 1983.** Harmonic power flow studies, University Microfilms. (Doktora tezi). Purdue University veri tabanından erişildi.
- Grandke, T. 1983.** Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transforms of Weighted Signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 32(2):, 350–355. <https://doi.org/10.1109/TIM.1983.4315077>
- Gu, I., Bollen, M. 2008.** Estimating Interharmonics by Using Sliding-Window ESPRIT. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(1):, 13–23. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911130>
- Guangjie, F., Hailong, Z. 2009.** The Study of the Electric Power Harmonics Detecting Method Based on the Immune RBF Neural Network. *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation : 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, IEEE: , 121–124. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2009.38>
- Guillaume, P., Schoukens, J., Pintelon, R. 1989.** Sensitivity of roots to errors in the coefficient of polynomials obtained by frequency-domain estimation methods. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 38(6):, 1050–1056. <https://doi.org/10.1109/19.46399>
- Gunther, E. 2001.** Interharmonics in power systems. *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262) : 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262) (Vol. 2), , 813–817 vol.2.* <https://doi.org/10.1109/PESS.2001.970156>
- Ha, M., Girgis, A. 1996.** Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3):, 1659–1665. <https://doi.org/10.1109/61.517531>
- Hamid, E., Kawasaki, Z. 2002.** Instrument for the quality analysis of power systems based on the wavelet packet transform. *IEEE Power Engineering Review*, 22(3):, 52–54. <https://doi.org/10.1109/MPER.2002.989197>
- Hanzelka, Z., Bien, A. 2004a.** Harmonics, Interharmonics. *Power Quality Application Guide*, 4:. Erişim adresi: <http://copperalliance.org.uk/uploads/2018/03/31-causes->

and-effects.pdf

- Hanzelka, Z., Bien, A. 2004b.** Power Quality Application Guide: Harmonics & Interharmonics. *A guide material by Leonardo Power Quality Initiative, Copper Development Association.*
- Harmonics, Power 1983.** Power System Harmonics: An Overview. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102(8):, 2455–2460. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.317745>
- Harris, F. 1978.** On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1):, 51–83. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>
- Hauer, J., Demeure, C., Scharf, L. 1990.** Initial Results in Prony Analysis of Power System Reponse Signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(1):, 80–89.
- He, C., Shu, Q. 2015.** Separation and analyzing of harmonics and inter-harmonics based on single channel independent component analysis. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 25(1):, 169–179. <https://doi.org/10.1002/etep.1832>
- Heartz, R., Saunders, R. 1954.** Harmonics due to Slots in Electric Machines [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 73(2):. <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1954.4498912>
- Hidalgo, R., Fernandez, J., Rivera, R., Larrondo, H. 2002.** A simple adjustable window algorithm to improve FFT measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(1):, 31–36. <https://doi.org/10.1109/19.989893>
- Horn, R., Johnson, C. 1985.** Matrix Analysis, New York, : Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810817>
- Hostetter, G. 1980.** Recursive discrete Fourier transformation. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 28(2):, 184–190. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1980.1163389>
- Hostetter, G. 1983.** Recursive Discrete Fourier Transformation with Unevenly Spaced Data. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 31(1):, 206–209. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1983.1164034>
- Hua, Y., Sarkar, T. 1990.** Matrix Pencil Method for Estimating Parameters of Exponentially Damped/Undamped Sinusoids in Noise. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 38(5):, 814–824. <https://doi.org/10.1109/29.56027>
- Hua, Y., Sarkar, T. 1991.** On SVD for Estimating Generalized Eigenvalues of Singular Matrix Pencil in Noise. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 39(4):, 892–900. <https://doi.org/10.1109/78.80911>
- Huang, N., Shen, Z., Long, S., Wu, M., Shih, H., Zheng, Q., Yen, N., Tung, C., Liu,**

- H. 1998a.** The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971):, 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Huang, C., Lee, C., Shih, K., Wang, Y. 2010.** A robust technique for frequency estimation of distorted signals in power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(8):, 2026–2036. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2028776>
- Iec 2002.** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. . Erişim adresi: www.iec.ch
- IEEE Interharmonic Task Force, Cigré 36. 05/CIRE. 2. CC02 Voltage Quality Working Group 1995.** Interharmonics in Power.
- IEEE Power System Harmonics Committee 1984.** Bibliography of Power System Harmonics, Part I. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103(9):, 2460–2469. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318400>
- IEEE Std 1547-2003 2015.** IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems, New York. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2003.94285>
- Jafarian, P., Sanaye-Pasand, M. 2011.** Weighted least error squares based variable window phasor estimator for distance relaying application. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 5(3):, 298–306. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0244>
- Jain, S., Singh, S.. 2011.** Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges. *Electric Power Systems Research*, 81(9):, 1754–1766. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2011.05.004>
- Jain, V., Collins, W., Davis, D. 1979.** High-Accuracy Analog Measurements via Interpolated FFT. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 28(2):, 113–122. <https://doi.org/10.1109/TIM.1979.4314779>
- Ji, T., Li, M., Wu, Q., Jiang, L. 2011.** Optimal estimation of harmonics in a dynamic environment using an adaptive bacterial swarming algorithm. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 5(6):, 609–620. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0171>
- Xiong, J., Wang, B., Zhang, S. 2010.** Interharmonics analysis based on windowed interpolation and prony algorithm. *2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010) : 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010)*, IEEE: , 430–433. <https://doi.org/10.1109/CAR.2010.5456806>
- Joorabian, M., Mortazavi, S., Khayyami, A. 2009.** Harmonic estimation in a power system using a novel hybrid Least Squares-Adaline algorithm. *Electric Power*

Systems Research, 79(1):, 107–116. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2008.05.021>

- Karadeniz, A., Atsever, M., Köksoy, A., Öztürk, O., Balcı, M., Hocaoğlu, M. 2018.** Fotovoltaik Dağıtık Üretim Birimleri için Harmonik Modellerin Ölçüm Temelli İstatistiksel Hassasiyet Analizi. *ENRES 2018* : ENRES 2018, , 346–356.
- Karimi-Ghartemani, M., Iravani, M. 2002.** A nonlinear adaptive filter for online signal analysis in power systems: applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(2):, 617–622. <https://doi.org/10.1109/61.997949>
- Karimi-Ghartemani, M., Iravani, M. 2003.** Wide-range, fast and robust estimation of power system frequency. *Electric Power Systems Research*, 65(2):, 109–117. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00223-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00223-7)
- Karimi-Ghartemani, M., Iravani, M. 2005.** Measurement of harmonics/interharmonics of time-varying frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1):, 23–31. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.837674>
- Karimi-Ghartemani, M., Mokhtari, H., Iravani, M., Sedighy, M. 2004.** A Signal Processing System for Extraction of Harmonics and Reactive Current of Single-Phase Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3):, 979–986. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.829942>
- Karimi, H., Karimi-Ghartemani, M., Reza Iravani, M., Bakhshai, A. 2003.** An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(4):, 1350–1356. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817752>
- Kay, S., Marple, S. 1981.** Spectrum analysis—A modern perspective. *Proceedings of the IEEE*, 69(11):, 1380–1419. <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.12184>
- Keaochantranond, T., Boonseng, C.** Harmonics and interharmonics estimation using wavelet transform. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition* : IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition (Vol. 2), IEEE: , 775–779. <https://doi.org/10.1109/TDC.2002.1177573>
- Kennedy, K., Lightbody, G., Yacamini, R.** Power system harmonic analysis using the Kalman filter. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)* : 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491), IEEE: , 752–757. <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1270401>
- Kim, S., Enjeti, P., Rendusara, D., Pitel, I. 1994.** A new method to improve THD and reduce harmonics generated by a three phase diode rectifier type utility interface. *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1071–1077. <https://doi.org/10.1109/IAS.1994.377561>
- Köse, N., Salor, Ö., Leblebicioğlu, K. 2010.** Interharmonics analysis of power signals with fundamental frequency deviation using Kalman filtering. *Electric Power Systems Research*, 80(9):, 1145–1153. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2010.03.006>
- Kovacevic, J., Vetterli, M. 1995.** Wavelets and Subband Coding, Prentice Hall PTR.

Erişim adresi: https://books.google.com.tr/books?id=4Qt_QgAACAAJ

- Kusljevic, M., Tomic, J., Jovanovic, L. 2010.** Frequency Estimation of Three-Phase Power System Using Weighted-Least-Square Algorithm and Adaptive FIR Filtering. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(2):, 322–329. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2023816>
- Lavopa, E., Zanchetta, P., Sumner, M., Cupertino, F. 2009.** Real-Time Estimation of Fundamental Frequency and Harmonics for Active Shunt Power Filters in Aircraft Electrical Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(8):, 2875–2884. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015292>
- Leonowicz, Z., Lobos, T., Rezmer, J. 2003.** Advanced spectrum estimation methods for signal analysis in power electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(3):, 514–519. <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.812361>
- Levenberger, K. 1944.** A METHOD FOR THE SOLUTION OF CERTAIN NON-LINEAR PROBLEMS IN LEAST SQUARES. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2(2):, 164–168. Erişim adresi: <http://www.jstor.org/stable/43633451>
- Li, T. 2014.** Time Series with Mixed Spectra, Boca Raton, : CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15154>
- Lim, Y., Sohn, S., Yun, J., Bae, H., Choi, H. 2010.** Time varying harmonics estimation of power signal based on filter banks and adaptive filtering. *2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings : 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings*, IEEE: , 829–834. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2010.5488131>
- Lin, H. 2004** Intelligent neural network based dynamic power system harmonic analysis. *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.* : 2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. (Vol. 1), IEEE: , 244–248. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2004.1460000>
- Lin, H. 2013.** Accurate Harmonic/Interharmonic Estimation Using DFT-Based Group-Harmonics Energy Diffusion Algorithm. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 36(4):, 158–171. <https://doi.org/10.1109/CJECE.2014.2303520>
- Lin, H. 2014.** Sources, Effects, and Modelling of Interharmonics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014:, 730362. <https://doi.org/10.1155/2014/730362>
- Lin, H. 2007.** Intelligent Neural Network-Based Fast Power System Harmonic Detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1):, 43–52. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.888685>
- Liu, Q., Qin, S. 2010.** A DFP-Neural Networks Algorithm for Analysis of Power System Harmonics. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference : 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, IEEE: , 1–4. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5448477>

- Liu, S. 1998.** An adaptive Kalman filter for dynamic estimation of harmonic signals. *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227)* : 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227) (Vol. 2), IEEE: , 636–640. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.1998.760120>
- Liu, Y. 2001.** A wavelet based model for on-line tracking of power system harmonics using Kalman filtering. *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)* : 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262), IEEE: , 1237–1242 vol.2. <https://doi.org/10.1109/PSS.2001.970245>
- Lobos, T., Kozina, T., Koglin, H. 2001.** Power system harmonics estimation using linear least squares method and SVD. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 148(6):, 567. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20010563>
- Lobos, T., Leonowicz, Z., Rezmer, J.** Harmonics and interharmonics estimation using advanced signal processing methods. *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)* : Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441) (Vol. 1), IEEE: , 335–340. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2000.897050>
- Lobos, T., Rezmer, J., Koglin, H.** Analysis of power system transients using wavelets and Prony method. *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)* : 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502) (Vol. vol.4), IEEE: , 4. <https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964820>
- Lu, Z., Ji, T., Tang, W., Wu, Q. 2008.** Optimal Harmonic Estimation Using A Particle Swarm Optimizer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2):, 1166–1174. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917656>
- Macias, J., Gomez, A. 2006.** Self-Tuning of Kalman Filters for Harmonic Computation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(1):, 501–503. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.860411>
- Marple, L. 1979.** Spectral line analysis by Pisarenko and Prony methods. *ICASSP '79. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* : ICASSP '79. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (Vol. 4), Institute of Electrical and Electronics Engineers: , 159–161. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1979.1170707>
- Marquardt, D. 1963.** An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2):, 431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>
- Martens, J. 1984.** Recursive Cyclotomic Factorization—A New Algorithm for Calculating the Discrete Fourier Transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 32(4):, 750–761. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1984.1164395>
- Marz, M. 2016.** Interharmonics : What They Are , Where They Come From and What

They Do. *Minnesota Power Systems Conference Papers (MIPSYCON)*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Mathew, G., Reddy, V. 1994. Development and analysis of a neural network approach to Pisarenko's harmonic retrieval method. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(3):, 663–667. <https://doi.org/10.1109/78.277859>

Mathworks.com 2019. Matlab. *The MathWorks*.

Mazloomzadeh, A., Mirsalim, M., Fathi, H. 2009. Harmonic and inter-harmonic measurement using discrete wavelet packet transform with linear optimization. *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications : 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, IEEE: , 825–830. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138318>

Mbihi, J. 2018. Analog automation and digital feedback control techniques, London, : ISTE Ltd.

McNamara, D., Ziarani, A., Ortmeyer, T. 2007. A New Technique of Measurement of Nonstationary Harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1):, 387–395. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874622>

Mishra, S. 2005. A Hybrid Least Square-Fuzzy Bacterial Foraging Strategy for Harmonic Estimation. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9(1):, 61–73. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2004.840144>

Moghadasian, M., Mokhtari, H., Baladi, A. 2010. Power system harmonic state estimation using WLS and SVD; A practical Approach. *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010 : Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, IEEE: , 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625307>

Mohan, N., Soman, K. 2020. A data-driven technique for harmonics monitoring in emerging power grids using noise-aware dynamic mode decomposition. *Measurement Science and Technology*, 31(1):. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab33ea>

Mojiri, M., Karimi-Ghartemani, M., Bakhshai, A. 2010. Processing of Harmonics and Interharmonics Using an Adaptive Notch Filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2):, 534–542. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2036624>

Moon, J., Kang, S., Ryu, D., Chang, J., Nam, Soon R. 2015. A two-stage algorithm to estimate the fundamental frequency of asynchronously sampled signals in power systems. *Energies*, 8(9):, 9282–9295. <https://doi.org/10.3390/en8099282>

Mori, H., Itou, K., Uematsu, H., Tsuzuki, S. 1992. An artificial neural-net based method for predicting power system voltage harmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(1):, 402–409. <https://doi.org/10.1109/61.108934>

Mori, H., Suga, S. 1991. Power system harmonics prediction with an artificial neural network. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems : IEEE*

- International Symposium on Circuits and Systems, IEEE: , 1129–1132. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.1991.176565>
- Morsi, W., El-Hawary, M. 2011.** Power quality evaluation in smart grids considering modern distortion in electric power systems. *Electric Power Systems Research*, 81(5):, 1117–1123. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.12.013>
- Mostafa, M. 2007.** Kalman Filtering Algorithm for Electric Power Quality Analysis: Harmonics and Voltage Sags Problems. *2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering : 2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, IEEE: , 159–165. <https://doi.org/10.1109/LESCPE.2007.4437371>
- Mucha, M., Sankowski, P. 2004.** Maximum matchings via Gaussian elimination. *45th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science : 45th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, , 248–255. <https://doi.org/10.1109/FOCS.2004.40>
- Nagesha, V., Kay, S. 1996.** Spectral analysis based on the canonical autoregressive decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(7):, 1719–1733. <https://doi.org/10.1109/78.510619>
- Najjar, M. Y., Heydt, G. 1991.** A hybrid nonlinear-least squares estimation of harmonic signal levels in power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(1):, 282–288. <https://doi.org/10.1109/61.103749>
- Nam, S., Kang, S., Kang, S. 2015.** Real-time estimation of power system frequency using a three-level discrete fourier transform method. *Energies*, 8(1):, 79–93. <https://doi.org/10.3390/en8010079>
- Nguyen, T. 1997.** Parametric harmonic analysis. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 144(1):, 21. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19970717>
- Norman R. Draper, H. 1998.** Applied Regression Analysis, Third Edition (Wiley Series in Probability and Statistics), Canada, : John Wiley & Sons, Ltd.
- Oppenheim, A., Willsky, A., Nawab, S., Hamid, W., Young, I. 1997.** Signals & Systems, Prentice Hall. Erişim adresi: <https://books.google.com.tr/books?id=LwQqAQAAMAAJ>
- Osborne, M. 1975.** Some Special Nonlinear Least Squares Problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 12(4):, 571–592. <https://doi.org/10.1137/0712044>
- Osowski, S. 1992.** Neural network for estimation of harmonic components in a power system. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, 139(2):, 129. <https://doi.org/10.1049/ip-c.1992.0021>
- Osowski, S. 1994.** SVD technique for estimation of harmonic components in a power system: a statistical approach. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 141(5):, 473. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19941358>

- Ozpineci, B., Tolbert, L.** Cycloconverters. Erişim adresi: <https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/cycloconvertertutorial.pdf>
- Pan, V. 1987.** Algebraic complexity of computing polynomial zeros. *Computers & Mathematics with Applications*, 14(4):, 285–304. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0898-1221\(87\)90137-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0898-1221(87)90137-4)
- Peng, Z., Hong-Bin, L. 2012.** Power system frequency estimation algorithm for electric energy metering of nonlinear loads. *Metrology and Measurement Systems*, 19(2):, 307–320. <https://doi.org/10.2478/v10178-012-0026-7>
- Stoica, P., Moses, R. 1997.** Introduction to Spectral Analysis, New Jersey, : Prentice Hall.
- Pham, V., Wong, K. 1999.** Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 146(3):, 249. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19990316>
- Garza, P., Serna, J. 2011.** Dynamic harmonic analysis through Taylor-Fourier transform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(3):, 804–813. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2064690>
- Portnoff, M. 1980.** Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 28(1):, 55–69. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1980.1163359>
- Prony, G. 1795.** Essai experimental et analytique, etc. *Journal de L'Ecole Polytechnique*, 1(1):, 24–76. Erişim adresi: <http://users.polytech.unice.fr/~leroux/PRONY.pdf>
- Qi, L., Qian, L., Woodruff, S., Cartes, D. 2007.** Prony analysis for power system transient harmonics. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2007:. <https://doi.org/10.1155/2007/48406>
- Qian, H., Zhao, R., Chen, T. 2007.** Interharmonics Analysis Based on Interpolating Windowed FFT Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(2):, 1064–1069. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.893187>
- Ray, P., Subudhi, B. 2015.** Neuro-evolutionary approaches to power system harmonics estimation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64:, 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.035>
- Ren, J., Kezunovic, M. 2010.** A wavelet method for power system frequency and harmonic estimation. *North American Power Symposium 2010 : North American Power Symposium 2010*, IEEE: , 1–6. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2010.5618977>
- Ren, Z., Wang, B. 2010.** Estimation Algorithms of Harmonic Parameters Based on the FFT. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference : 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, IEEE: , 1–4. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5448836>
- Robinson, E. 1982.** A historical perspective of spectrum estimation. *Proceedings of the IEEE*, 70(9):, 885–907. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12423>

- Routray, A., Pradhan, A., Rao, K. 2002.** A novel Kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(3):, 469–479. <https://doi.org/10.1109/TIM.2002.1017717>
- Roy, R., Kailath, T. 1989.** ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(7):, 984–995. <https://doi.org/10.1109/29.32276>
- Roy, R., Paulraj, A., Kailath, T. 1986.** ESPRIT—A Subspace Rotation Approach to Estimation of Parameters of Cisoids in Noise. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 34(5):, 1340–1342. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1986.1164935>
- Sadinezhad, I., Agelidis, V. 2010.** A new optimization technique to measure frequency and harmonics in power systems. *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010* : Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, IEEE: , 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625376>
- Sahoo, H., Dash, P., Rath, N., Sahu, B. 2009.** Harmonic estimation in a power system using hybrid H ∞ - adaline algorithm. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON* : IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, , 1–6. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2009.5396254>
- Sangwongwanich, A., Yang, Y., Sera, D., Soltani, H., Blaabjerg, F. 2018.** Analysis and Modeling of Interharmonics from Grid-Connected Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(10):, 8353–8364. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2778025>
- Sarkar, A., Choudhury, S., Sengupta, S. 2011.** A self-synchronized ADALINE network for on-line tracking of power system harmonics. *Measurement*, 44(4):, 784–790. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2011.01.009>
- Schmidt, R. 1986.** Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3):, 276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
- Schoukens, J., Pintelon, R., Van Hamme, H. 1992.** The interpolated fast Fourier transform: a comparative study. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 41(2):, 226–232. <https://doi.org/10.1109/19.137352>
- Sedláček, M., Titěra, M. 1998.** Interpolations in frequency and time domains used in FFT spectrum analysis. *Measurement*, 23(3):, 185–193. [https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(98\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(98)00031-1)
- Sharma, K., Mahalanabis, A. 1973.** Harmonic analysis via Kalman filtering technique. *Proceedings of the IEEE*, 61(3):, 391–392. <https://doi.org/10.1109/PROC.1973.9043>
- Singh, G. 2009.** Power system harmonics research: a survey. *European Transactions on*

Electrical Power, 19(2):, 151–172. <https://doi.org/10.1002/etep.201>

- Singh, S., Goswami, A., Sinha, N. 2015.** Power system harmonic parameter estimation using Bilinear Recursive Least Square (BRLS) algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 67:, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.006>
- Smith, K., Yacamini, R. 1993.** Time domain modelling of electrical machines and drives using modern CAE software. *1993 Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 376)* : 1993 Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 376), , 323–327.
- Soliman, S., Alammari, R., El-Hawary, M. 2003.** Frequency and harmonics evaluation in power networks using fuzzy regression technique. *Electric Power Systems Research*, 66(2):, 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(03\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00043-9)
- Soliman, S., Christensen, S., Kelly, D., El-Naggar, K. 1990.** A state estimation algorithm for identification and measurement of power system harmonics. *Electric Power Systems Research*, 19(3):, 195–206. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(90\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0378-7796(90)90032-X)
- Soliman, S. A., Helal, I., Al-Kandari, A. 1999.** Fuzzy linear regression for measurement of harmonic components in a power system. *Electric Power Systems Research*, 50(2):, 99–105. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00101-1)
- Std, 1559-2019 IEEE 2019.** 1159-2019 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality | IEEE Standard | IEEE Xplore. *IEEE Std 1159-2019*, 1–98. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
- Chapra, S., Canale, R. 2014.** Numerical Methods for Engineers, New York, : McGraw-Hill Education.
- Subudhi, B., Ray, P. K. 2009.** Estimation of power system harmonics using hybrid RLS-adaline and KF-Adaline algorithms. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON* : IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, , 1–6. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2009.5396102>
- Sun, S., Shu, H., Dong, J., Liu, Z. 2009.** Analysis of low frequency oscillation mode based on PMU and PRONY method. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC* : Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918159>
- Swain, A., Zhao, L., Patel, N. 2005.** Accurate Estimation of Harmonic Components of Power Signal. *TENCON 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference* : TENCON 2005 - 2005 IEEE Region 10 Conference, IEEE: , 1–4. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2005.301004>
- Tao, C., Shanxu, D., Ting, R., Fangrui, L. 2010.** A robust parametric method for power harmonic estimation based on M-Estimators. *Measurement*, 43(1):, 67–77. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2009.06.010>

- Tarasiuk, T. 2004.** Hybrid wavelet-Fourier spectrum analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3):, 957–964. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.824398>
- Tarasiuk, T. 2011.** Estimator-analyzer of power quality: Part i - Methods and algorithms. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44(1):, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.09.049>
- Tarasiuk, T., Szweda, M., Tarasiuk, M. 2011.** Estimator-analyzer of power quality: Part II - Hardware and research results. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44(1):, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.09.048>
- Temurtas, H., Temurtas, F. 2011.** An application of neural networks for harmonic coefficients and relative phase shifts detection. *Expert Systems with Applications*, 38(4):, 3446–3450. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2010.08.131>
- Testa, A., Gallo, D., Langella, R. 2004.** On the Processing of Harmonics and Interharmonics: Using Hanning Window in Standard Framework. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1):, 28–34. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820437>
- Testa, A., Akram, M., Burch, R., Carpinelli, G., Chang, G., Dinavahi, V., Hatziadoniu, C., Grady, W., Gunther, E., Halpin, M., Lehn, P., Liu, Y., Langella, R., Lowenstein, M., Medina, A., Ortmeier, T., Ranade, S., Ribeiro, P., Watson, N., Wikston, J., Xu, W. 2007.** Interharmonics: Theory and modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905505>
- The MathWorks, Inc. 2020a.** MATLAB Signal Processing Toolbox™ User's Guide, The MathWorks, Inc. Erişim adresi: <https://www.mathworks.com/help/signal/>
- The MathWorks, Inc. 2020b.** MATLAB Signal Processing Toolbox™ User's Guide, The MathWorks, Inc.
- Thomson, D. 1982.** Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proceedings of the IEEE*, 70(9):, 1055–1096. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12433>
- Thornton, R. 1929.** A portable electric harmonic analyser. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 67(394):, 1249–1259. <https://doi.org/10.1049/jiee-1.1929.0145>
- Tretter, S., Steiglitz, K. 1967.** Power-spectrum identification in terms of rational models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 12(2):, 185–188. <https://doi.org/10.1109/TAC.1967.1098544>
- Tripathy, P., Srivastava, S., Singh, S. 2009.** An improved Prony method for identifying low frequency oscillations using synchro-phasor measurements. *2009 International Conference on Power Systems, ICPS '09 : 2009 International Conference on Power Systems, ICPS '09*. <https://doi.org/10.1109/ICPWS.2009.5442754>
- Vatansever, F., Ozdemir, A. 2008.** A new approach for measuring RMS value and phase

angle of fundamental harmonic based on Wavelet Packet Transform. *Electric Power Systems Research*, 78(1):, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.12.009>

Wang, D., Lu, Y. 2006. The signal subspace decomposition method for extracting harmonic signal. *2006 IEEE Information Theory Workshop : 2006 IEEE Information Theory Workshop*, IEEE: , 714–717. <https://doi.org/10.1109/ITW.2006.322913>

Wang, F., Chang, S., Lee, J. 2005. Hybrid wavelet-Hilbert-Huang spectrum analysis. *Oceans 2005 - Europe : Oceans 2005 - Europe (Vol. 2)*, , 902–905. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2005.1513176>

Wang, T. 1990. The segmented chirp Z-transform and its application in spectrum analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 39(2):, 318–323. <https://doi.org/10.1109/19.52508>

Widrow, B. 1960. An Adaptive “Adaline” Neuron Using Chemical “Memistors”. 1553-2. Solid State Electronik Laboratory, Stanford University.

Wu, J., Zhao, W. 2005. New precise measurement method of power harmonics based on FFT. *2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 365–368. <https://doi.org/10.1109/ISPACS.2005.1595422>

Wu, X., He, W., Zhang, Z., Deng, J., Li, B. 2008. The harmonics analysis of power system based on artificial neural network. *World Automation Congress proceedings.* : World Automation Congress proceedings., TSI Press: , 1–4.

Mei Ye, X., He Liu, X. 2009. The harmonic detection based on wavelet transform and FFT for electric ARC furnaces. *2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition : 2009 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, IEEE: , 408–412. <https://doi.org/10.1109/ICWAPR.2009.5207486>

Xin, L., Xu, W., Yu, Y. 2007. A fast harmonic detection method based on recursive DFT. *2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI : 2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI*, , 3972–3976. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2007.4351082>

Xiao, X., Jiang, X., Shi, X., min Lu, X., Zhang, Y. 2010. A neural network model for power system inter-harmonics estimation. *2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA) : 2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*, IEEE: , 756–760. <https://doi.org/10.1109/BICTA.2010.5645220>

Xiuchun, X., Xiaohua, J., Xiaomin, L., Botao, C. 2009. A Harmonics Analysis Method Based on Triangular Neural Network. *2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009) : 2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009)*, IEEE: , 323–326. <https://doi.org/10.1109/CASE.2009.59>

Xu, Y., Du, Y., Li, Z., Lu, M. 2019a. Inter-harmonic parameters estimation in power

grid based on accelerated PSO and T5R11 window. *IET Science, Measurement and Technology*, 13(6):, 883–894. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5406>

Xu, Y., Du, Y., Li, Z., Lu, M. 2019b. Inter-harmonic parameters estimation in power grid based on accelerated PSO and T5R11 window. *IET Science, Measurement and Technology*, 13(6):, 883–894. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5406>

Yang, K., Bollen, M., Larsson, E., Wahlberg, M. 2014. Measurements of harmonic emission versus active power from wind turbines. *Electric Power Systems Research*, 108:, 304–314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.11.025>

Ying, C., Qingsheng, L. 2009. New Research on Harmonic Detection Based on Neural Network for Power System. *2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application : 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, IEEE: , 113–116. <https://doi.org/10.1109/IITA.2009.146>

Yu, J., Yang, L. 2009. Analysis of harmonic and inter-harmonic based on Hilbert-Huang transform. *Proceedings - 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, CiSE 2009 : Proceedings - 2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, CiSE 2009*. <https://doi.org/10.1109/CISE.2009.5365111>

Zhan, Y., Cheng, H. 2005. A robust support vector algorithm for harmonic and interharmonic analysis of electric power system. *Electric Power Systems Research*, 73(3):, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.09.002>

Zhang, F., Geng, Z., Yuan, W. 2001. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(2):, 160–164. <https://doi.org/10.1109/61.915476>

Zhang, S., Wang, Q., Liu, R. 2009. Power system harmonic analysis based on improved hilbert-huang transform. *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments : 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, IEEE: , 4-343-4–347. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2009.5274060>

Liquan, Z., Yanfei, J. 2010. Harmonic and interharmonic estimation using improved complex maximization of nongaussianity algorithm. *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology : 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, IEEE: , V6-204-V6-207. <https://doi.org/10.1109/ICCET.2010.5486310>

Zhao, Y., Zhen, Z., Cui, J., Wang, Y. 2020. Harmonic Detection for Harmonic/Inter-Harmonic Based on Improved Glowworm Swarm Optimization and Neural Network. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 15(12):, 1769–1779. <https://doi.org/10.1002/tee.23251>

Zhijian, H., Jianquang, G., Mei, Y., Zhiwei, D., Chao, W. 2007. The studies on power system harmonic analysis based on extended prony method. *2006 International Conference on Power System Technology, POWERCON2006 : 2006 International*

Conference on Power System Technology, POWERCON2006.
<https://doi.org/10.1109/ICPST.2006.321738>

Zhu, T. 2007. Exact Harmonics/Interharmonics Calculation Using Adaptive Window Width. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(4);, 2279–2288.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899526>