

Güç Sistemlerinde Harmonik Kestirim Problemlerinin Çözümü için Sezgisel Yöntemler

Mustafa SAKA*¹ 

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, Hatay, Türkiye

(Alınış / Received: 02.08.2024, Kabul / Accepted: 07.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Harmonikler,
Harmonik kestirim,
SNR,
Sezgisel teknikler,
Optimizasyon

Öz: Globalleşen dünya ile birlikte kaliteli elektrik enerjisine olan ihtiyaç da her geçen gün artmaktadır. Güç sistemlerinde yer alan lineer olmayan bileşenler nedeniyle, harmonikler oluşmakta ve sinyal formunda bozulmalar meydana gelmektedir. Harmoniklerin neden olabileceği olumsuz etkileri azaltmak amacıyla, sinyallerin genlik, faz ve frekans bileşenlerinin kestirimi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, sentetik bir güç sinyaline ait genlik, faz ve frekans parametreleri, Gri Kurt Optimizasyonu (GWO), Güve Alev Optimizasyonu (MFO), Balık Kartalı Optimizasyon Algoritması (OOA) ve Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) sezgisel optimizasyon yöntemleri ile bulunmuştur. Güç sistemlerinin sahip olduğu bileşenlerden dolayı sinyaller gürültü içerebilmektedir. Bu nedenle, seçilen test sinyalinin 20db sinyal gürültü oranı (SNR) içeren durumu da ayrıca dikkate alınmıştır. Bu sayede, farklı sezgisel yöntemlerin harmonik kestirim problemlerindeki etkisi analiz edilmiştir. Seçilen yöntemler ile tahmin edilen parametrelerin yüzde hata oranları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Dahası, sezgiler teknikler için performans indeksleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, MFO ile sentetik güç sinyaline ait genlik, frekans ve faz parametrelerinin en yüksek doğrulukta belirlendiği ve en düşük performans indeksine ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Heuristic Methods for Solving of Harmonic Estimation Problems in Power Systems

Keywords

Harmonics,
Harmonic estimation,
SNR,
Heuristic techniques,
Optimization

Abstract: With the globalizing world, the need for quality electrical energy is increasing day by day. Due to the nonlinear components in power systems, harmonics and distortions occur in the signal form. In order to reduce the negative effects of harmonics, estimation of amplitude, phase and frequency components of signals is very important. In this study, amplitude, phase and frequency parameters of a synthetic power signal have been found via Grey Wolf Optimizer (GWO), Moth Flame Optimization (MFO), Osprey Optimization Algorithm (OOA) and Whale Optimization Algorithm (WOA) heuristic optimization methods. Due to the components of power systems, signals may contain noise. For this reason, the case containing 20db signal-to-noise ratio (SNR) was taken into account of the selected test signal. In this way, the effect of different heuristic methods on harmonic estimation problems has been analyzed. The percentage error rates of the estimated parameters with the selected methods have been presented comparatively. Moreover, the performance indexes for the heuristic techniques have been computed separately. When the obtained results have been analyzed, it has been observed that the amplitude, frequency and phase parameters of the synthetic power signal have been determined with the highest accuracy with MFO and the lowest performance index has been achieved with MFO.

1. Giriş

Elektrik güç sistemlerindeki sinyallerin düzgün bir dalga formunda olması oldukça önemli bir durumdur. Ancak güç sistemlerinde kullanılan, transformatörler,

doğrultucular, invertörler, güç kaynakları gibi lineer olmayan yükler ve periyodu zamanla değişen yükler nedeniyle, harmonik bozulmalar meydana gelmektedir. Bunlara ilave olarak, günümüzde giderek yaygınlaşan güneş ve rüzgar enerji santralleri de şebekelerde harmoniklere neden olabilmektedir [1]. Güç sistemlerinde temel frekans değeri farklılaştıkça, sistemdeki harmonik bozulmalarda artmaktadır. Bu durum ise, güç sistemlerinde ve kullanılan cihazlarda verimsizliklere ve güç kalitesi sorunlarına neden olmaktadır. Güç kalitesi sorunları ise sistemdeki kontrol ve koruma cihazlarında arızalara ve hatalara yol açmaktadır [2, 3]. Güç sistemlerindeki harmonikler dinamik olduğundan dolayı, bu sinyallere ait parametrelerin hızlı ve doğru bir şekilde kestirilmesi önemlidir [4].

Güç sistemlerinde harmoniklerin olumsuz etkilerini azaltmak için, harmoniklere ait genlik ve faz değerlerinin doğru tahmin edilmesi oldukça önemlidir [5]. Ayrıca, bu iki parametre ile birlikte frekans değerlerinin de belirlenmesi, sinyalin daha yüksek doğrulukta tahmini için gereklidir. 2008 yılında, Lu ve diğerleri harmoniklerin fazlarını belirlemek için Pasif Toplanma ile Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSOPC) metodunu ve genliklerini belirlemek için en küçük kareler (LS) metodunu kullanmışlardır [6]. 2003 yılında, Bettayeb ve diğerleri harmoniklere ait faz değerlerini Genetik Algoritmayla (GA) ve genlik değerlerini en küçük kareler (LS) metoduyla belirlemişlerdir [7]. 2018 yılında Kabalcı ve diğerleri, harmoniklere ait genlik ve faz parametrelerinin tahmini için Modifiye Edilmiş Yapay Arı Kolonisi (MABC) yöntemini kullanmışlardır [8]. 2016 yılında Singh ve diğerleri, harmoniklere ait parametreleri tahmin etmek amacıyla Ateşböceği Algoritması (FA) and tekrarlayan en küçük kareler (RLS) yöntemini geliştirmiş ve kullanmışlardır [9]. 2021 yılında Avalos ve diğerleri, harmonik tahmin problemleri için Çekirdek tekrarlı en küçük kareler (KRLS) yaklaşımını önermişlerdir [10]. 2024 yılında Çoban ve Saka, Denge Optimizasyonu (EO) ile sinyale ait genlik, frekans ve faz değerlerine ilave olarak dc bozulma terimlerinin de kestirimini gerçekleştirmişlerdir [11].

Bu çalışmada, literatüre katkı sağlamak amacıyla, yakın zamanda geliştirilmiş Gri Kurt Optimizasyonu [12], Güve Alev Optimizasyonu [13], Balık Kartalı Optimizasyon Algoritması [14] ve Balina Optimizasyon Algoritması [15] yöntemleri, bir harmonik test sinyaline ait genlik, faz ve frekans parametrelerinin kestirimi için kullanılmıştır. Bu sayede, farklı yöntemlerin harmonik parametrelerinin tahminindeki performansları aynı anda incelenmiştir. Ayrıca, bu yöntemler ile bulunan sonuçlar literatürde yer alan Sinüs Kosinüs Algoritması (SCA) yöntemi ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir [16]. Elde edilen sonuçlardan, harmonik sinyal parametreleri yüksek çözünürlükte ve doğrulukta tahmin edilmiştir.

Makalenin bundan sonraki bölümleri şu şekilde sıralanmıştır: 2. bölümünde harmonik tahmin

problemi açıklanmıştır. 3. Bölümde, GWO, MFO, OOA ve WOA yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir. 4. Bölümde bu yöntemler elde edilen sonuçlar ve yaklaşım grafikleri sunulmuştur. Son bölümde ise çalışmaya ait sonuç bölümü verilmiştir.

2. Harmonik Kestirim Problemleri

Güç sistemlerindeki harmonik sinyaller, cihazların bozulmasına, hatalı çalışmasına, aşırı ısınmasına yol açabilir. Bu nedenle harmonik sinyallere ait parametrelerin kestirilmesi oldukça önemli bir konudur. Harmoniklerin genel formu aşağıda verilen denklem1 ile ifade edilebilir.

$$g(t) = \sum_{x=1}^X G_x \sin(w_x t + \theta_x) + G_{dc} \exp(-\beta_{dc} t) + \gamma(t) \quad (1)$$

Bu denklemde X harmonik sayısını, $\gamma(t)$ Gauss gürültüsünü ve $G_{dc} \exp(-\beta_{dc} t)$ olası bozulma terimini temsil etmektedir. Ayrıca, w_x terimi $2\pi f_0$ olarak ifade edilir ve x. harmoniğin açısal frekansını temsil eder. Eğer Denklem1'deki ifade T_m örnekleme periyodu ile örneklenirse, Denklem2'de verilen ifade elde edilir:

$$g(n) = \sum_{x=1}^X G_x \sin(w_x n T_s + \theta_x) + G_{dc} \exp(-\beta_{dc} n T_s) + \gamma(t) \quad (2)$$

Eksponansiyel terimli ifadeyi daha açık yazmak için bu ifadeye Taylor seri açılımı uygulanırsa, Denklem3'teki denklem bulunur:

$$g(n) = \sum_{x=1}^X G_x \sin(x 2\pi f_0 n T_s + \theta_x) + G_{dc} - G_{dc} \beta_{dc} n T_s + \gamma(t) \quad (3)$$

Elde edilen bu denklem sayesinde, harmoniklerin genlik, faz ve frekans parametrelerinin tahmin edilmesi için genel bir denkleme ulaşılmış olur.

3. Harmonik Kestirim için Sezgisel Teknikler

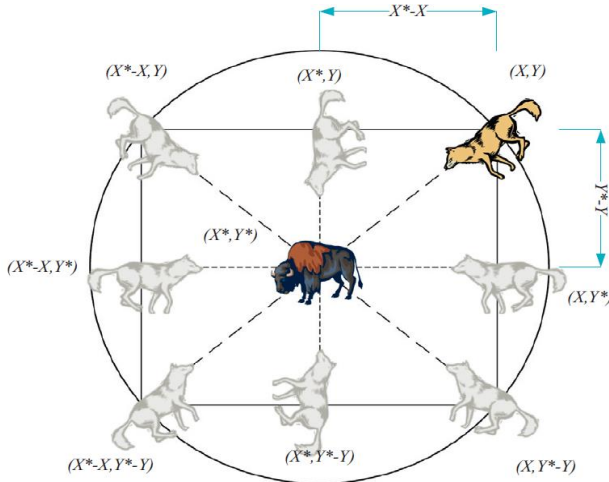
Bu bölümde, harmonik kestirim problemlerinin çözümü için seçilen GWO, MFO, OOA ve WOA sezgisel teknikleri kısaca açıklanmıştır.

3.1. Gri kurt optimizasyonu

Gri kurt optimizasyonu, Mirjalili ve diğerleri tarafından 2014 yılında geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir algoritmadır. Bu algoritmanın geliştirilmesinde gri kurtların avlanma davranışlarından ilham alınmıştır [12]. GWO'da 3 adet Alpha, Beta ve Delta olmak üzere 3 adet kurt grubu hiyerarşisi vardır. GWO'da kurtların pozisyonları rastgele oluşturulur. Belirlenen bir amaç fonksiyonu için bu pozisyonlar değerlendirilir. Elde edilen amaç fonksiyonu sonuçlarına göre yeni Alpha,

Beta ve Delta değerleri belirlenir. Daha sonra elde edilen sonuçlara göre, kurtlara ait Alpha, Beta ve Delta pozisyonları güncellenir. Bu iteratif süreç, sonlandırma şartlarına sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

GWO'nun çalışma prensibine ait görsel Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. GWO için kurtların (aday çözümlerin) ava (optimal noktaya) yakınsamaları [12]

GWO'nun harmonik tahmin problemlerine uygulanması ile ilgili bir pseudo kod Algoritma1'de verilmiştir.

```

Başla
  Tanımla GWO parametrelerini,
  Tanımla of Alpha, Beta ve Delta'ya ait başlangıç
    pozisyonlarını,
  Oluştur gerçek harmonik sinyali,
  While < maksimum iterasyon
    Oluştur kestirilen sinyali
    Kullan kestirilen ve gerçek sinyali bir
      amaç fonksiyonu için,
    Belirle Alpha, Beta ve Delta uygunluk
      değerlerini,
    Güncelle Alpha, Beta ve Delta
      pozisyonlarını,
  end
  Bul kestirilen harmonik sinyal için en iyi
    parametreleri,
Bitir

```

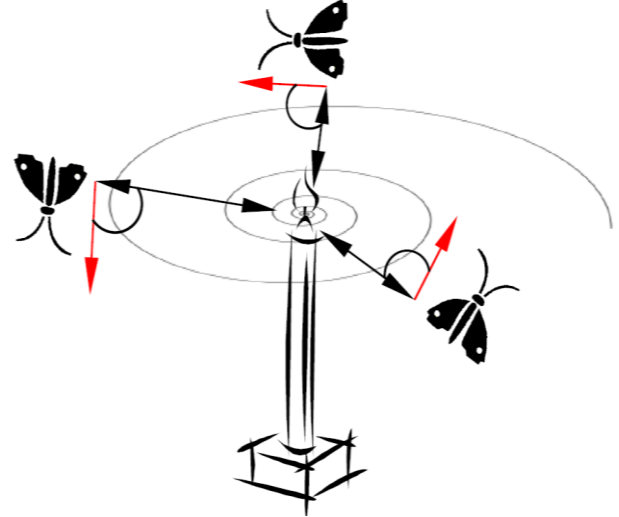
Algoritma 1. GWO için bir pseudo kod

3.2. Güve alev optimizasyonu

Güve alev algoritması, Mirjalili tarafından 2015 yılında geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, güvelerin doğadaki enine yönlendirme adı verilen gezinme yönteminden ilham alınarak geliştirilmiştir [13]. Bu yöntemde, güveler her bir alevin etrafında çözüm ararlar. Güvenin daha iyi bir çözüm bulması ile birlikte alevler de güncellenir. Alevlerin ve güvelerin pozisyonları, her iterasyon

sonunda bulunan çözüme göre güncellenir. Böylece algoritmanın sonunda, güveler ve alevler optimal çözüme ulaşmış olur.

MFO'nun çalışma prosedürüne Şekil 2 ile aşağıda verilmiştir [13].



Şekil 2. Güvelerin (aday çözümlerin) spiral bir biçimde aleve doğru yakınsamaları

MFO'nun harmonik tahmin problemlerine uygulanması ile ilgili bir pseudo kod Algoritma2'de verilmiştir.

```

Başla
  Tanımla MFO için başlangıç parametrelerini,
  Oluştur gerçek harmonik sinyali,
  Oluştur güvelerin başlangıç pozisyonlarını,
  While < maksimum iterasyon
    Belirle alevlerin sayısını,
    Oluştur kestirilen sinyali,
    Kullan kestirilen ve gerçek sinyali bir
      amaç fonksiyonu için,
    Güncelle alevleri güncelle şimdiye
      kadar bulunan en iyi alevin
      pozisyonunu
    Güncelle alevlere göre güvelerin
      pozisyonlarını
  end
  Bul kestirilen harmonik sinyal için en iyi
    parametreleri,
Bitir

```

Algoritma 2. MFO için bir pseudo kod

3.3. Balık kartalı optimizasyon algoritması

Balık kartalı optimizasyon algoritması, 2023 yılında Dehghani ve Trojovsky tarafından önerilmiş popülasyon tabanlı bir sezgisel yöntemdir. Bu yöntem, balık kartallarının denizlerden balık avlama stratejileri dikkate alınarak geliştirilmiştir [14]. OOA'da her bir balık kartalı, optimal çözüme ulaşmada kullanılan aday çözüm olarak temsil edilir. Her

iterasyonda oluşturulan balık kartalları, avlarının konumunu rastgele algılar ve avlarına saldırır. Arama sonucunda, en iyi aday çözüm belirlenir ve balık kartallarının pozisyonları güncellenir. Balık kartalları avlarını yakaladıktan sonra, onu yemek için en uygun noktaya götürmeye çalışırlar. Bu amaçla pozisyonları yeniden güncellenir ve böylece çözüm için optimal nokta aranmış olur. Gerçekleştirilen bu avlanma stratejisi, iterasyon süresince devam eder ve iterasyon sonunda en iyi değerler belirlenmiş olur.

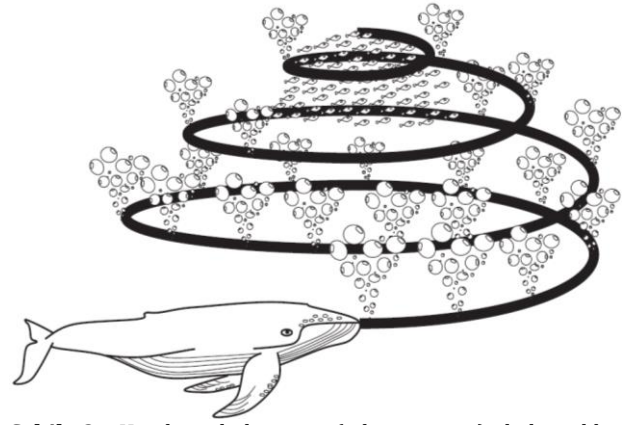
OOA'nın harmonik tahmin problemlerine uygulanması ile ilgili bir pseudo kod Algoritma3'te verilmiştir.

Başla
 Belirle OOA için başlangıç parametrelerini,
 Oluştur gerçek harmonik sinyali,
 Oluştur balık kartallarının başlangıç popülasyonunu,
 While < maksimum iterasyon
 Oluştur kestirilen sinyali,
 Kullan kestirilen ve gerçek sinyali bir amaç fonksiyonu için,
 Belirle iterasyonda bulunan en iyi kestirilen harmonik sinyali,
 Güncelle balık kartallarını,
 end
 Bul kestirilen harmonik sinyal için en iyi parametreleri,
 Bitir

Algoritma 3. OOA için bir pseudo kod

3.4. Balina optimizasyon algoritması

Balina optimizasyon algoritması, 2016 yılında Mirjalili ve Lewis tarafından önerilmiş ve kambur balinaların avlanma stratejilerinden ilham alınarak geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir algoritmadır [15]. Bu yöntemde, kambur balinalar avlarını baloncuk kabarcıkları kullanarak ve daralan çemberler oluşturarak kuşatırlar. Kambur balinalar, belirlenen bir amaç fonksiyonuna göre arama yaparlar. Bu balinalar içerisinde, en iyi çözüme yakınsayan balina lider konuma geçer. Her iterasyon sonunda, diğer balinaların pozisyonları, liderin pozisyonu dikkate alınarak güncellenir. Bu sayede, tüm iterasyonlar bittiğinde balinalar optimal çözüme ulaşmış olurlar. WOA'nın çalışma mantığına Şekil 3 ile gösterilmiştir. WAO'nın harmonik tahmin problemlerine uygulanması ile ilgili bir pseudo kod Algoritma4'te verilmiştir.



Şekil 3. Kambur balinanın (aday çözüm) kabarcıklar vasıtasıyla avına (optimal noktaya) doğru yakınsaması

Başla
 Tanımla lider pozisyonunu,
 Oluştur gerçek harmonik sinyali
 Oluştur balinaların başlangıç pozisyonlarını
 While < maksimum iterasyon
 Kontrol et balinaların arama uzayı içerisinde olduğunu
 Oluştur kestirilen sinyali
 Kullan kestirilen ve gerçek sinyali bir amaç fonksiyonu için,
 Güncelle lider pozisyonunu,
 Güncelle lidere göre balinaların pozisyonlarını
 end
 Bul kestirilen harmonik sinyal için en iyi parametreleri,
 Bitir

Algoritma 4. WOA için bir pseudo code

4. Tartışma ve Uygulamalar

Bu bölümde sentetik bir test sinyaline ait genlik, frekans ve faz parametreleri GWO, MFO, OOA ve WOA optimizasyon algoritmaları ile belirlenmiştir. Bu yöntemlere ait performans indeksleri aşağıda verilen Denklem4 ile hesaplanmıştır.

$$\gamma = \frac{\sum_{n=1}^N (g[n] - g_{est}[n])^2}{\sum_{n=1}^N (g[n])^2} \quad (4)$$

Buna ilave olarak, elde edilen sonuçlar SCA ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bulunan sonuçları daha iyi analiz etmek amacıyla her bir parametre için yüzde hata değerleri hesaplanmıştır. Sentetik sinyalin matematiksel ifadesi Denklem5 ile verilmiştir [11]:

$$y(t) = 1.5\sin(2\pi f_1 t + 80^\circ) + 0.5\sin(2\pi f_3 t + 60^\circ) + 0.2\sin(2\pi f_5 t + 45^\circ) + 0.15\sin(2\pi f_7 t + 36^\circ) + 0.1\sin(2\pi f_{11} t + 30^\circ) + 0.5\exp(-5t) + \varepsilon(t) \quad (5)$$

Hesaplanan parametre değerleri ve yüzde hata oranları Tablo1'de verilmiştir.

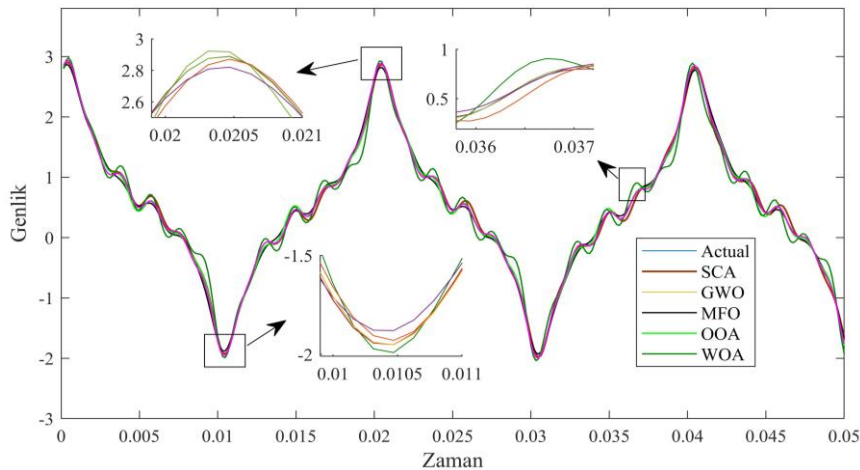
Tablo 1. Harmonik test sinyaline ait parametre değerleri ve yüzde hata oranları

	Parametreler	Temel Harmonik	3'üncü Harmonik	5'inci Harmonik	7'inci Harmonik	11'inci Harmonik
Gerçek Değerler	Amplitude (p.u.)	1.5	0.5	0.2	0.15	0.1
	Frequency (Hz)	50	150	250	350	550
	Phase (°)	80	60	45	36	30
SCA [3]	Amplitude (p.u.)	1.490	0.487	0.200	0.143	0.100
	Error (%)	0.63	2.58	0.3	4.7	0.5
	Frequency (Hz)	50.080	150.240	250.090	348.460	547.220
	Error (%)	0.16	0.16	0.036	0.44	0.5
	Phase (°)	77.630	61.950	42.830	40.300	29.050
	Error (%)	2.96	3.25	4.82	11.94	3.17
GWO	Amplitude (p.u.)	1.512	0.487	0.1947	0.1161	0.061
	Error (%)	0.834	2.554	2.638	22.610	38.252
	Frequency (Hz)	49.904	149.509	248.925	348.062	549.766
	Error (%)	0.190	0.327	0.430	0.553	0.042
	Phase (°)	80.981	65.511	55.503	60.1645	18.240
	Error (%)	1.226	9.186	23.340	67.123	39.198
MFO	Amplitude (p.u.)	1.500	0.499	0.199	0.150	0.100
	Error (%)	0.005	0.0191	0.063	0.002	0.008
	Frequency (Hz)	49.998	149.995	249.994	350.021	550.030
	Error (%)	0.002	0.003	0.002	0.006	0.005
	Phase (°)	80.017	60.045	45.049	35.777	29.691
	Error (%)	0.022	0.075	0.109	0.617	1.029
OOA	Amplitude (p.u.)	1.417	0.456	0.289	0.170	0.187
	Error (%)	5.492	8.620	44.835	13.509	87.421
	Frequency (Hz)	50.178	150.527	250.903	351.251	551.912
	Error (%)	0.356	0.351	0.361	0.357	0.347
	Phase (°)	77.130	52.888	34.197	25.558	26.626
	Error (%)	3.586	11.852	24.004	29.004	11.244
WOA	Amplitude (p.u.)	1.500	0.497	0.222	0.124	0.100
	Error (%)	0.038	0.606	11.218	16.782	0.353
	Frequency (Hz)	49.947	149.819	249.686	349.579	549.358
	Error (%)	0.105	0.120	0.125	0.120	0.116
	Phase (°)	80.148	65.844	50.869	31.201	30.086
	Error (%)	0.185	9.741	13.043	13.329	0.289

Tablo1'de verilen değerlerden, MFO ile bulunan sinyal parametrelerinin gerçek sinyal değerlerine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, 11. harmoniğin faz değeri hariç tüm parametre değerlerinde, en düşük yüzde hata oranları da yine MFO ile hesaplanmıştır. Performans indeksleri SCA için 0.2399, GWO için

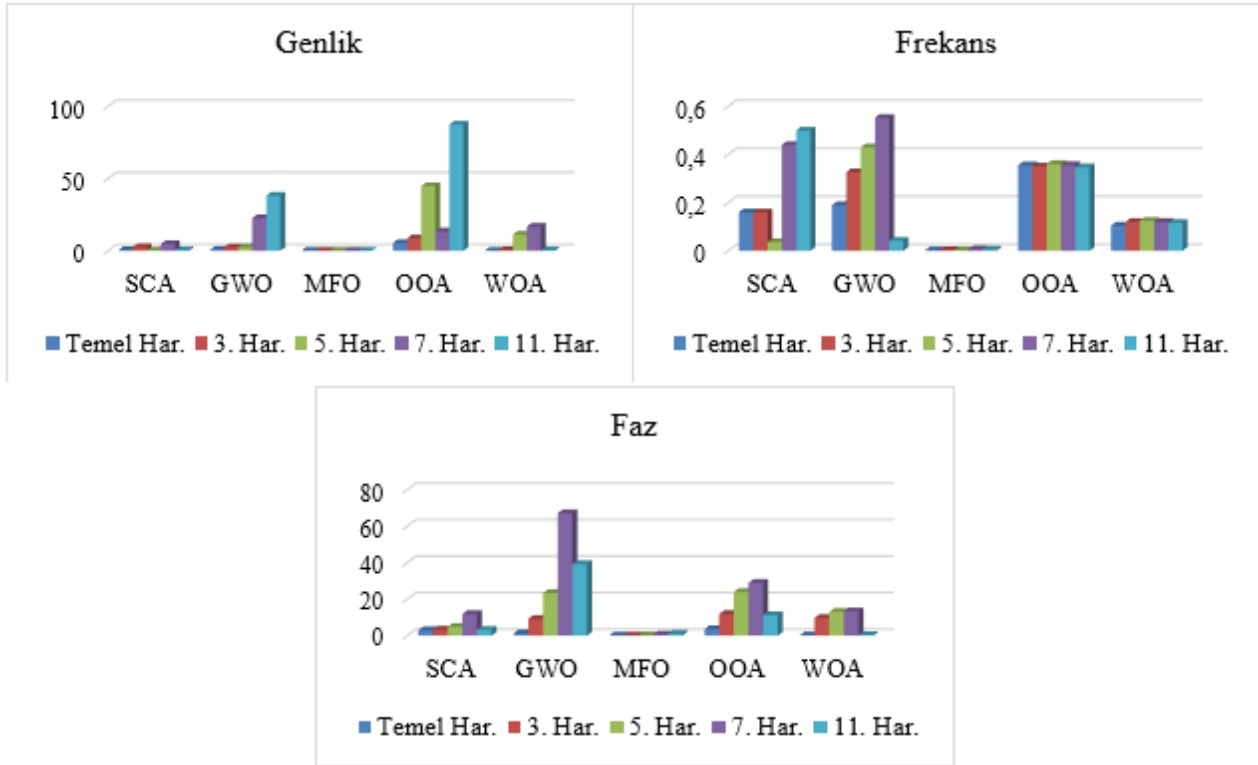
0.1556, MFO için 9.3936e-6, OOA için 0.8992 ve WOA için 0.1110 olarak elde edilmiştir.

GWO, MFO, OOA ve WOA ile bulunun sinyal çıkışları SCA ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4'te gösterilmiştir.

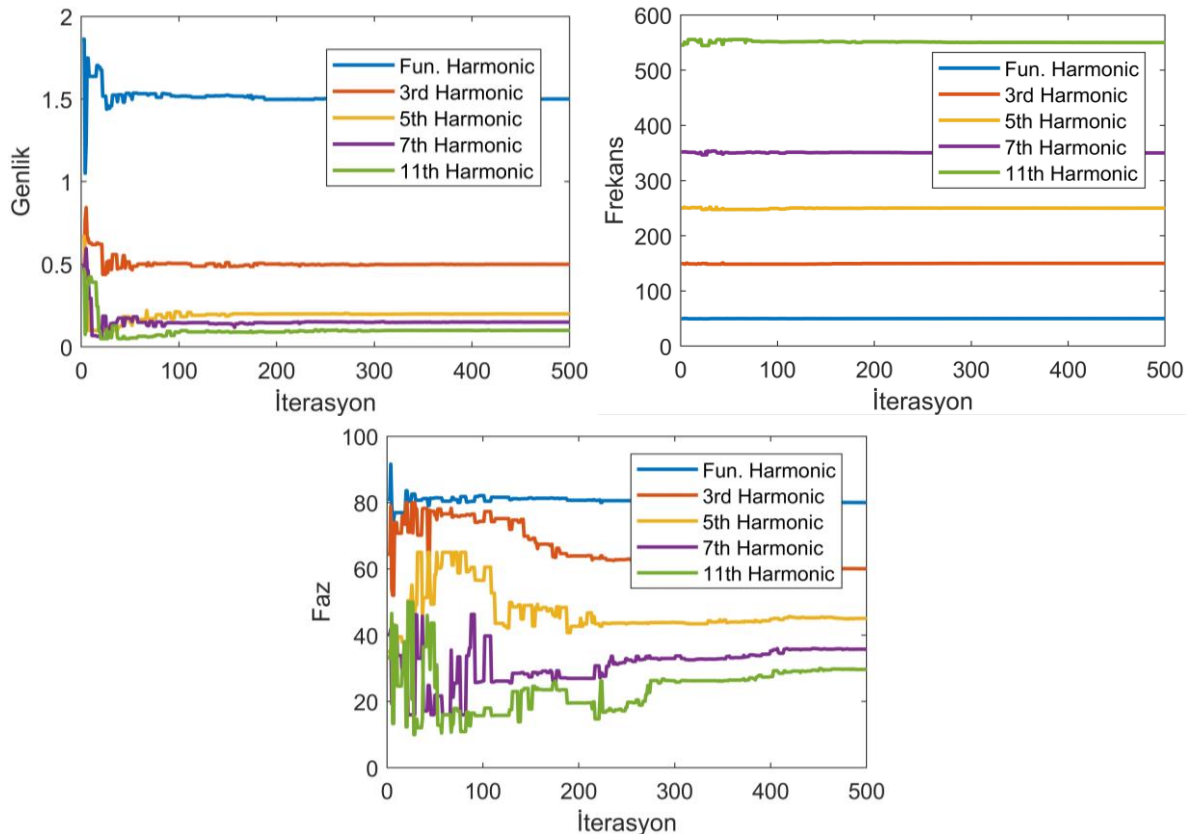
**Şekil 4.** 0db için elde edilen sinyal çıkışları

Şekil 4'te SCA, GWO ve WOA ile bulunan sinyaller gerçek sinyale yakın performans sergilerken, OOA ile bulunan sinyalin daha fazla hataya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, MFO'nun gerçek sinyal ile üst üste oturduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 5'te genlik, frekans ve faz parametrelerine ait hesaplanan yüzde hata değerleri bar grafik olarak sunulmuştur. Şekil 6'da ise en iyi değerlerin bulunduğu MFO için yakınsama grafikleri verilmiştir.



Şekil 5. 0db için sinyal parametrelerine ait yüzde hata değerlerinin gösterimi

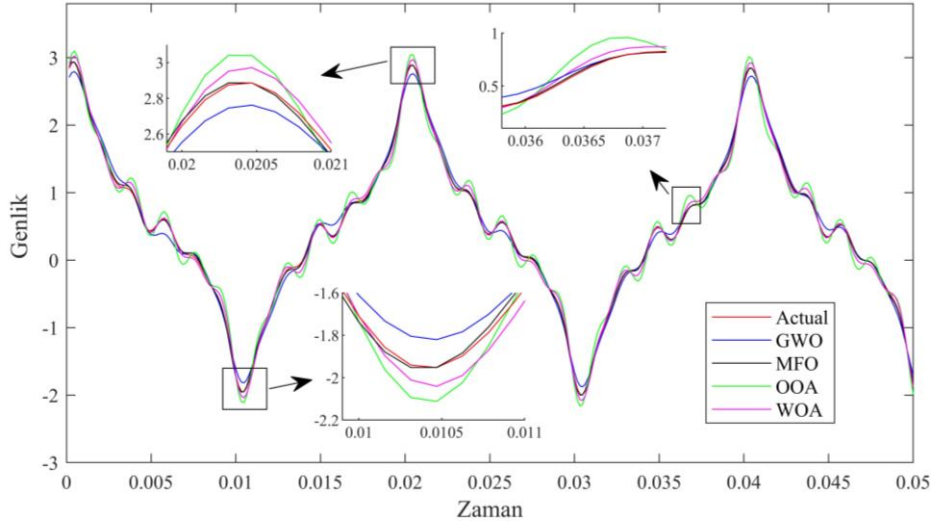


Şekil 6. 0db için MFO'nun sinyal parametrelerine yakınsama grafikleri

Bu grafiklerden, MFO'nun sinyal parametrelerini belirlemede yüksek hassasiyet yeteneğine sahip olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

Güç sistemlerinin sahip olduğu bileşenlerden dolayı, sinyaller gürültü içerebilmektedir. Bu nedenle,

sinyalin parametrelerini belirlerken, gürültü faktörünün dahil edildiği durumlar içinde analizler yapmak büyük öneme sahiptir. Şekil 7'de, 20db SNR seviyesi içeren sentetik sinyal için GWO, MFO, OOA ve WOA ile tahmin edilmiş sinyal grafikleri verilmiştir.

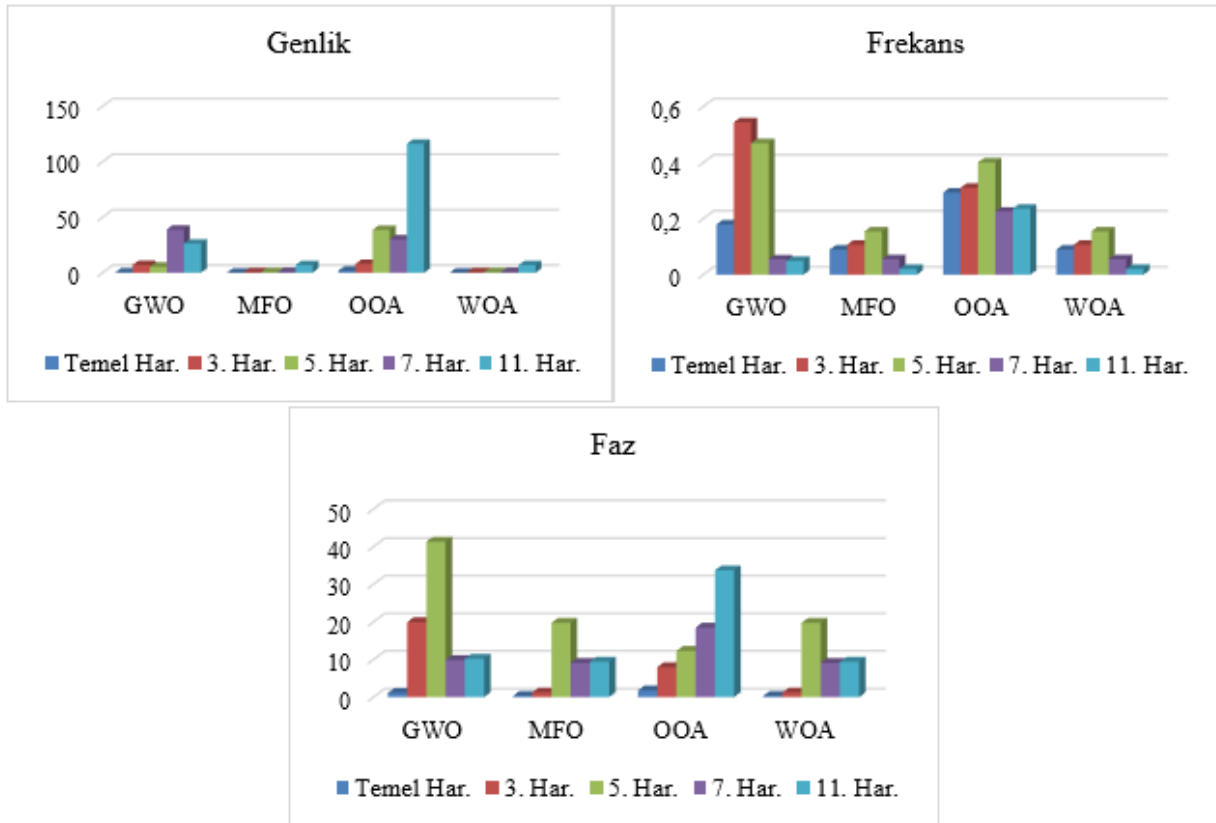


Şekil 7. 20db için elde edilen sinyal çıkışları

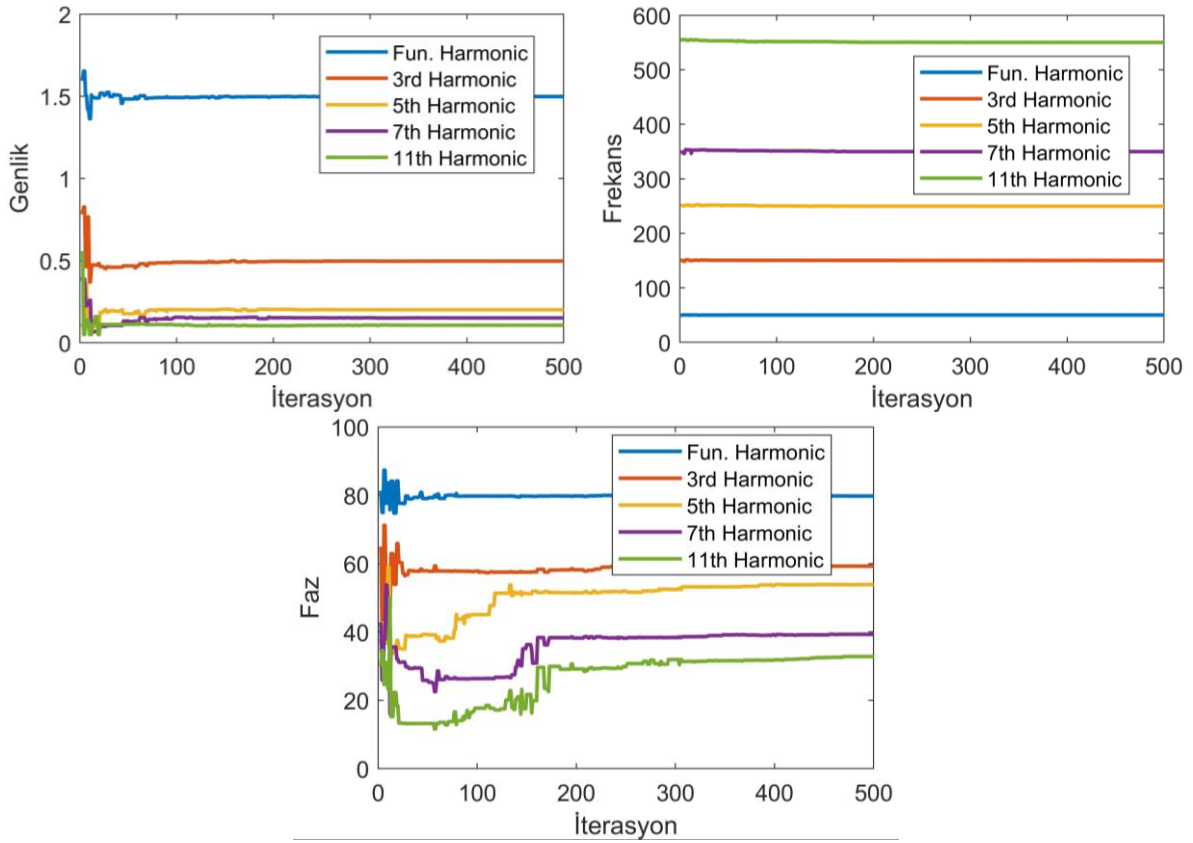
Şekil 7'de gösterilen tahmin edilen sinyallerden, MFO'nun neredeyse gerçek sinyal ile üst üste oturduğu gözlemlenmiştir. 20db SNR içeren sentetik sinyal için hesaplanan performans indeksleri; GWO için 0.3169, MFO için 0.0224, OOA için 0.8006 ve WOA için 0.2277 olarak hesaplanmıştır.

20db SNR içeren sinyale ait genlik, frekans ve faz parametreleri için hesaplanan yüzde hata değerleri, bar grafik olarak Şekil 8'de verilmiştir.

Ayrıca MFO için yakınsama grafikleri Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. 20db için sinyal parametrelerine ait yüzde hata değerlerinin gösterimi



Şekil 9. 20db içi MFO'nun sinyal parametrelerine yakınsama grafikleri

5. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada sentetik bir test sinyaline ait genlik, frekans ve faz parametre değerleri GWO, MFO, OOA ve WOA sezgisel teknikleri ile tahmin edilmiştir. Ayrıca, güç sistemlerindeki bileşenlerden dolayı sinyalde oluşabilecek gürültüler nedeniyle, 20db SNR içeren sinyale ait tahmin analizleri de gerçekleştirilmiştir. GWO, MFO, OOA ve WOA ile yapılan analizler sonucunda tahmin edilen sinyaller, birbirleri ile ve literatür ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Buna ilave olarak, bu yöntemler ile bulunan genlik, frekans ve faz değerleri ile hesaplanan yüzde hata değerleri verilmiştir. Dahası, her bir sezgisel teknik için performans indeksleri ayrı ayrı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, gürültü içermeyen ve içeren gerçek sinyale en yakın değerlere MFO ile ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, en düşük performans indeksleri gürültü içermeyen sinyal için 9.3936×10^{-6} ve gürültü içeren sinyal için 0.0224 olarak MFO ile elde edilmiştir.

Bu çalışmada, gerçek sinyal parametrelerine en yakın değerlere MFO ile ulaşıldığından dolayı, gelecekteki çalışmalarda, MFO'nun gerçek zamanlı sinyallerdeki performansı analiz edilecektir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi

geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Gençol K., 2023. An efficient iterative optimization-based algorithm for the real-time estimation of harmonics under power system frequency deviations, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 47, 1-14.
- [2] S Jain S. K., Singh, S. N., 2011. Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges, *Electric Power Systems Research*, 81(9), 1754-1766.
- [3] Kalair, A., Abas, N., Kalair, A. R., Saleem, Z., Khan, N., 2017. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152-1187.
- [4] Wiczynski, G., 2008. Analysis of voltage fluctuations in power networks, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(11), 2655-2664.
- [5] Kabalci, Y., Kockanat, S., Kabalci, E., 2017. Harmonic estimator design using hybrid particle swarm optimization, *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Türkiye, 1-4.
- [6] Lu, Z., Ji, T. Y., Tang, W. H., Wu, Q. H., 2008. Optimal harmonic estimation using a particle swarm

- optimizer, IEEE Transactions on Power Delivery, 23(2), 1166-1174.
- [7] Bettayeb M., Qidwai, U., 2003. A hybrid least squares-GA-based algorithm for harmonic estimation, IEEE Transactions on Power Delivery, 18(2), 377-382.
- [8] Kabalci, Y., Kockanat, S., Kabalci, E., 2018. A modified ABC algorithm approach for power system harmonic estimation problems, Electric Power Systems Research, 154, 160-173.
- [9] Singh, S. K., Sinha, N., Goswami, A. K., Sinha, N., 2016. Robust estimation of power system harmonics using a hybrid firefly based recursive least square algorithm, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 80, 287-296.
- [10] Avalos, O., Cuevas, E., Becerra, H. G., Gálvez, J., Hinojosa, S., Zaldívar, D., 2021. Kernel recursive least square approach for power system harmonic estimation, Electric Power Components and Systems, 48:16-17, 1708-1721.
- [11] Coban M., Saka, M., 2024. Directly power system harmonics estimation using Equilibrium Optimizer, Electric Power Systems Research, 234, 1-14.
- [12] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A., 2014. Grey wolf optimizer, Advances in Engineering Software, 69, 46-61.
- [13] Mirjalili, S., 2015. Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm, Knowledge-Based Systems, 89, 228-249.
- [14] Dehghani M., Trojovský, P., 2023. Osprey optimization algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems, Frontiers in Mechanical Engineering, 8, 1-43.
- [15] Mirjalili S., Lewis, A., 2016. The whale optimization algorithm, Advances in Engineering Software, 95, 51-67.
- [16] Altintasi, C., 2021. Sine cosine algorithm approaches for directly estimation of power system harmonics & interharmonics parameters, IEEE Access, 9, 73169-73181.