

Güç sistemlerinde harmonik tespiti için gelişmiş meta sezgisel algoritmaların karşılaştırılması

Comparison of advanced metaheuristic algorithms for harmonic detection in power systems

Şule Nilhan OĞUZALP^{*1} , Sıtkı AKKAYA² , Ulaş EMİNOĞLU³ 

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik Bölümü, 58140, Sivas

²Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58000, Sivas

³Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun

• Geliş tarihi / Received: 13.01.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 30.05.2025

Öz

Enerji sektöründe rekabetin artması ve kullanıcıların daha kaliteli enerji talep etmesi, elektrik şebekelerinde güç kalitesini öncelikli bir konu haline getirmiştir. Güç kalitesini etkileyen parametrelerden biri de harmoniklerdir. Harmonikler güç sistemlerinde; gerilim-akım dalga şekillerinin bozulması, rezonans olayları sonucunda aşırı akım ve gerilim yükselmesi, sayaçlarda yanlış ölçmeler, yalıtım hataları ve elektronik cihazların arızalanmasına, ek enerji kayıpları ve ısınmalar gibi birçok istenmeyen durumlara neden olabilir. Bu nedenle harmonikler son yıllarda üzerinde sıkça çalışılan bir araştırma alanı olmuştur. Bu çalışmada, son yıllarda geliştirilen AVOA (African Vulture Optimization Algorithm), ARO (Artificial Rabbit Optimization), SWO (Spider Wasp Optimization), MGO (Mountain Gazelle Optimization) ve AO (Aquila Optimization) algoritmaları ve En Küçük Kareler (Least Squares) yönteminin bir arada kullanıldığı hibrit yöntemler, harmoniklerin tespitinde kullanılarak sonuçları incelenmiştir. Analizlerde, literatürde sıkça kullanılan bir test sinyali üzerinde çalışılmıştır. Bu sinyalin harmonik genlikleri, En Küçük Kareler (Least Squares) yöntemiyle belirlenmiş, faz açıları ise ilgili meta sezgisel algoritmalar kullanılarak hibritleştirilmiş yöntemlerle (MGO-LS gibi) tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, incelenen beş yöntem arasında önerilen MGO-LS'nin tahminleri gürültüsüz ve Gaussian gürültülü koşullarda bile daha doğru ve güvenilir olduğunu göstermiştir. Bu durum, incelenen problem için MGO-LS algoritmasının harmonik tespiti için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Dağ ceylanı optimizasyonu, En küçük kareler yöntemi, Güç kalitesi, Harmonik

Abstract

The increasing competition in the energy sector and the growing demand of users for higher quality energy have made power quality a priority issue in electrical networks. One of the parameters affecting power quality is harmonics. In power systems, harmonics can lead to various undesirable situations such as distortion of voltage and current waveforms, excessive current and voltage rise due to resonance phenomena, inaccurate measurements in meters, insulation failures, malfunctions in electronic devices, additional energy losses, and overheating. Therefore, harmonics have become a frequently studied research area in recent years. In this study, hybrid methods combining recently developed algorithms such as African Vulture Optimization Algorithm (AVOA), Artificial Rabbit Optimization (ARO), Spider Wasp Optimization (SWO), Mountain Gazelle Optimization (MGO), and Aquila Optimization (AO) with the Least Squares (LS) method were employed for harmonic detection, and their results were analyzed. In the analyses, a commonly used test signal from the literature was examined. The harmonic amplitudes of this signal were determined using the Least Squares (LS) method, while the phase angles were estimated using hybrid methods (e.g., MGO-LS) incorporating the relevant metaheuristic algorithms. The results obtained showed that among the five examined methods, the proposed MGO-LS provided more accurate and reliable estimations even under noiseless and Gaussian noisy conditions. This indicates that the MGO-LS algorithm is an effective method for harmonic detection for the problem under investigation.

Keywords: Mountain gazelle optimization, Least square method, Power quality, Harmonic

*Şule Nilhan OĞUZALP; soguzalp@cumhuriyet.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Güç sistemlerinde meydana gelen bozulmaların doğru ve etkin bir şekilde tespiti, güvenilir enerji iletimi, sistem stabilitesinin korunması ve ekipman ömrünün uzatılması açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu bozulmaların analizi, yalnızca sistem performansının izlenmesi ve olası arızaların erken tespiti için değil, aynı zamanda enerji kalitesinin sürdürülebilir bir şekilde sağlanması açısından da kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Özellikle genlik ve frekans gibi parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, sistem verimliliğini artırmak ve kaliteli enerji sunumunu desteklemek açısından büyük önem taşımaktadır.

Analitik yöntemler, bozulma tespit süreçlerini iyileştirmek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, modern güç sistemlerinin artan karmaşıklığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, bu yöntemlerin doğruluğunu ve etkinliğini artırma gerekliliğini beraberinde getirmiştir. Geleneksel yöntemler arasında yaygın olarak kullanılan Fourier tabanlı teknikler, harmonik tespiti ve analizi için önemli araçlar sunmakla birlikte, yüksek harmonik derecelerinde çözünürlük ve doğruluk açısından sınırlamalar göstermektedir. Bu sınırlamalar, genlik ve faz parametrelerini daha yüksek doğrulukla tahmin edebilen, aynı zamanda düşük hesaplama maliyetleri sunan yeni yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir ([Subjak & McQuilkin, 1990](#)). Ayrıca harmonik bozulmalar voltaj ve akım dalga formlarını bozarak trafo kayıplarını %15 artırabilir ve elektronik cihazların ömrünü kısaltabilir. Harmonik kestiriminde geleneksel yöntemler sıklıkla Fourier dönüşümü, dalgacık dönüşümü ve istatistiksel analiz teknikleri gibi deterministik yaklaşımlara dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, özellikle doğrusal olmayan, zamana bağlı değişkenlik gösteren ve gürültü içeren karmaşık sistemlerde yeterli hassasiyet ve esneklik sağlayamamaktadır ([Bollen & Hassan, 2011](#)). Bu sınırlamaları aşmak amacıyla meta sezgisel (metaheuristic) algoritmalar tercih edilmektedir. Genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), diferansiyel evrim (DE) ve yapay arı kolonisi (ABC) gibi meta sezgisel yöntemler, küresel optimizasyon yetenekleri sayesinde çoklu yerel minimum problemlerinde daha doğru ve kararlı çözümler sunabilmektedir ([Yang, 2010](#)). Meta sezgisel yaklaşımlar, ön bilgiye ihtiyaç duymadan geniş çözüm uzaylarında etkili arama yapabildikleri için, harmonik bileşenlerin doğru kestiriminde avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemler, sinyaldeki ani değişimleri, zamansal varyasyonları ve harmoniklerin karmaşık yapısını daha iyi modelleyebilmektedir ([Zhao et al., 2014](#)). Bu bağlamda, harmonik kestiriminde meta sezgisel algoritmaların kullanımı, sistem doğruluğunu ve kestirim güvenilirliğini artırmak açısından literatürde yaygın bir şekilde benimsenmiştir. Meta sezgisel optimizasyon algoritmaları, klasik Fourier tabanlı yöntemlerin “picket-fence” etkisi ve spektral sızıntı, çözünürlük-hız takası, ön bilgi bağımlılığı ve gürültüye karşı zayıf dayanıklılık gibi temel kısıtlarını aşmak için nüfus temelli global arama stratejileri, esnek çok-kriterli maliyet fonksiyonları ve rastgelelik özellikleri sunar. Picket-fence etkisi, ayrık Fourier dönüşümü temelli analizlerde, sinyal frekanslarının analiz edilen frekans bileşenlerine tam olarak denk gelmemesi durumunda ortaya çıkan bir hata türüdür. Bu etki, özellikle analiz pencere uzunluğunun yetersiz olduğu durumlarda belirginleşir. Bu durum spektral genliklerin gerçek değerlere göre düşük tahmin edilmesine neden olur. ([Oppenheim & Schaffer, 2010](#)). Bu nedenle, sinyaldeki harmonik bileşenlerin doğru ve hassas kestirimi için alternatif yöntemlerin, özellikle meta sezgisel algoritmaların kullanımı tercih edilmektedir. Çalışmamızda MGO-LS, kaçış-takip döngüsüyle yerel minimum tuzaklarından kaçarak hem gürültüsüz hem de gürültülü ortamlarda tutarlı genlik tahminleri ($\epsilon=0,0331$ ve $\epsilon=8,3413$) elde eder, hibrit LS döngüsü ile gerçek zamanlı uygulama gereksinimlerini karşılayacak hız-doğruluk dengesini sağlar ve çoklu simülasyonlarda ortalama ve standart sapma değerleriyle istatistikî güvenilir performans sergiler.

Son yıllarda, sinyal işleme teknikleri ile optimizasyon algoritmalarını birleştiren modern yöntemler, harmonik tespiti alanında daha esnek, hızlı ve etkili çözümler sunmaktadır. Harmoniklerin doğru bir şekilde tespiti, yalnızca enerji kalitesini korumakla sınırlı kalmayıp, hat kayıplarını azaltmak, ekipmanların ömrünü uzatmak ve işletme maliyetlerini düşürmek açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, doğrusal olmayan yüklerin artışıyla birlikte harmonik distorsiyonlar daha yaygın hale gelmiştir. Bu distorsiyonlar, voltaj ve akımın ideal sinüzoidal dalga formundan sapmasına yol açarak ekipman arızalarına, verimlilik kayıplarına ve artan işletme maliyetlerine neden olmaktadır ([Apon vd., 2021](#)). Harmonik tahmini, bu tür sorunları hafifletmek ve etkili telafi tekniklerini geliştirmek için temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Harmonik sinyallerin dinamik yapısı ve zamanla değişen koşullar, tahmin sürecini daha karmaşık hale getirmekte ve geleneksel yöntemlerin sınırlarını zorlamaktadır. Discrete Fourier Transform (DFT) ve Fast Fourier Transform (FFT) gibi yaygın analiz yöntemleri, harmonik tespiti için temel araçlar olsa da aliasing (yansıma), sızıntı ve picket fence gibi etkiler nedeniyle pratik uygulamalarda sınırlamalar gösterebilmektedir

(Bettayeb & Qidwai, 2003). Klasik hızlı Fourier dönüşümü (FFT), birçok bilimsel alanda yaygın olarak kullanılır; ancak FFT, zaman sınırlaması nedeniyle spektral sızıntı ve hesaplanan spektrumda ayrık frekans örneklemeinden kaynaklanan picket-fence etkisi gibi temel sorunlara sahiptir (Li & Fu, 2008). Bu yaklaşımların sınırlamalarını aşmak amacıyla, Kalman filtresi ve benzeri model tabanlı sinyal işleme tekniklerinin meta sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla bütünleştirildiği hibrit yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler genellikle şu adımları içerir:

- (i) Sinyalin lineer durum-uzay modelinin tanımlanması,
- (ii) Sistem ve ölçüm gürültüsünün kovaryans matrislerinin belirlenmesi,
- (iii) Kalman filtresiyle ilk tahmin adımının yapılması ve
- (iv) Elde edilen parametrelerin optimizasyon algoritmasıyla rafine edilmesi.

Bununla birlikte, gerçek dünya güç sistemlerinde model parametrelerinin (örneğin stokastik gürültü istatistikleri, sistem dinamikleri) kesin olarak bilinmemesi, hata kovaryanslarının yanlış kurulması sonucunda filtre performansının ciddi şekilde bozulmasına yol açar. Ayrıca hem filtreleme hem de nüfus temelli optimizasyon adımlarının ardışık çalıştırılması yüksek bellek ve işlemci kaynakları tüketimine neden olur; bu da özellikle dar zaman pencerelerinde gerçek zamanlı uygulamalarda gecikme ve hesaplama darboğazlarına sebep olmaktadır (Costa vd., 2007). Böylece, ön-bilgi gereksinimi ve artan hesaplama yükü, bu hibrit yöntemlerin pratikte sınırlı kabul edilmesine yol açmaktadır. Meta sezgisel optimizasyon yöntemleri, harmonik tespiti alanında klasik tekniklerin ötesine geçerek yüksek doğruluk ve işlem verimliliği sunan güçlü alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Örneğin Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSO) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC), karmaşık hata yüzeylerinde global en iyi çözüme yaklaşma potansiyeli taşıırken, erken yakınsama ve yerel minimum tuzaklarına duyarlılık gibi kısıtlarla karşılaşabilmektedir (Shi & Eberhart, 1998). Bunun üzerine geliştirilen Afrika Akbaba Optimizasyon Algoritması (AVOA), Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA) ve Passif Congregation ile Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSOPC) gibi hibrit yaklaşımlar, popülasyon temelli arama stratejilerini farklı mekanizmalarla birleştirerek harmonik tahminindeki doğruluğu önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca, bu meta sezgisel algoritmaların En Küçük Kareler (Least Squares) yöntemiyle entegrasyonu, başlangıç tahminlerindeki sapmaları azaltarak hem çözüme ulaşma hızını artırmakta hem de hesaplama yükünü optimize etmektedir (Ali vd., 2023).

Sonuç olarak, güç sistemlerindeki harmoniklerin doğru tespiti, enerji kalitesinin artırılması ve sistem stabilitesinin korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, farklı harmonik tahmin yöntemlerinin doğruluk ve etkinlik açısından değerlendirilmesini ve enerji kalitesine katkılarını ele almayı amaçlamaktadır.

2. Literatür taraması ve temel yöntemler

2. Literature review and basic methods

Harmonik sinyallerin genlik tahmini genellikle doğrusaldır ve geleneksel En Küçük Kareler (Least Squares, LS) yöntemi ile kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Ancak, faz tahmini, sinyalin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle daha karmaşık bir problem olarak karşımıza çıkar. Bu nedenle, literatürde birçok araştırmacı, harmonik bileşenlerin doğru ve hızlı bir şekilde tahmin edilmesine yönelik yeni algoritmalar geliştirmiştir. Bu çalışmaların temel amacı, yalnızca harmonik bileşenleri tespit etmekle sınırlı kalmayıp, tahmin doğruluğunu artırmak ve hesaplama süresini kısaltmaktır.

Önerilen algoritmalar arasında Genetik Algoritma (GA) tabanlı LS yöntemi (GA-LS) dikkat çekmektedir. (Bettayeb & Uvais, 2003), faz tahmini için GA, genlik tahmini için ise LS yöntemi kullanan bir hibrit algoritma geliştirmiştir. Bu yöntem, genlik tahmininde başarılı sonuçlar sunarken, faz tahmininde doğruluk açısından belirgin iyileştirmeler sağlamaktadır. Ancak, GA tabanlı algoritmalar, erken yakınsama eğilimi ve yerel minimumlara duyarlılık gibi sınırlamalara sahiptir, bu da güç sistemi harmoniklerinin tahmininde maksimum doğruluğa ulaşılmasını engelleyebilmektedir (Gaing, 2004).

Harmonik tahminindeki diğer bir yaklaşım, Bakteri Foraging Optimizasyonu (BFO) algoritmasıdır. Ray (2012), bu yöntemi Yinelemeli En Küçük Kareler (RLS) yöntemi ile birleştirerek RLS-BFO adlı bir model geliştirmiştir. Bu çalışmada, faz tahmini için Parçacık Sürüşü Optimizasyonu Pasif Congregation (PSOPC), genlik tahmini için ise LS yöntemi kullanılmıştır. Bu hibrit yöntem, özellikle düşük hesaplama maliyetleri ile dikkat çekmektedir.

Diğer bir çalışmada, Biswas (2013), Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması ile LS yöntemini birleştirerek harmonik bileşenlerin fazını ve genliğini tahmin etmek için etkili bir çözüm sunmuştur. Bu algoritma, yüksek doğruluk sağlamasına rağmen, büyük boyutlu problemlerde hesaplama maliyeti açısından bazı kısıtlamalar taşımaktadır. Bu sorunu ele almak için Kabalci vd. (2018), Modifiye ABC (MABC) algoritmasını tanıtarak algoritmanın performansını önemli ölçüde artırmıştır.

Daha yakın zamanda, Haseb vd. (2023), Hibrit Ağırlıklı En Küçük Kareler Çok Yönlü Optimize Edici (WLS-MVO) yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, özellikle faz ve genlik tahminindeki doğruluğu artırarak enerji kalitesini iyileştirme potansiyeli sunmaktadır. Benzer şekilde, Apon vd. (2021), Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA) tabanlı LS yöntemi (AOA-LS) ile faz tahmini konusunda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Her iki yöntemde, harmonik tahmininde yüksek doğruluk ve düşük hesaplama maliyetleri sağlayarak geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşmaktadır.

Bu çalışmalar, harmonik tespiti ve tahmin süreçlerinde önemli ilerlemeler sağlamış olsa dahi mevcut yöntemlerin performansını daha da artırmak için ek araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, değişen yük koşulları ve gürültülü ortamlar gibi zorlu senaryolarda daha dayanıklı ve verimli algoritmalar geliştirilmesi gerekmektedir.

Tahmin $\hat{\Phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ koşulunda en iyi sonucu sağlamasına olanak tanır. Ancak $\hat{\Phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ değerleri en iyi çözüm olmayabilir ve optimize edilmesi gerekebilir. Bu nedenle, bir sonraki iterasyonda $\hat{\Phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$, aşağıdaki J maliyet fonksiyonuna göre bir optimizasyon algoritması kullanılarak Denklem 8'deki gibi güncellenir. Bu işlem nihai yakınsama koşuluna ulaşılan kadar tekrarlanır.

2.1. Dağ ceylanı optimizasyonu (MGO)

2.1.1. Mountain gazelle optimization (MGO)

Dağ ceylanlarının sosyal yaşamından ve hiyerarşik düzenlerinden esinlenerek geliştirilmiş bir meta sezgisel optimizasyon algoritmasıdır (Abdollahzadeh vd., 2022). Algoritma, ceylanların dört temel davranışını modellemektedir: bekar erkek sürüleri, doğum sürüleri, bölgesel bekar erkekler ve göç davranışı (Khodadadi, 2023).

Algoritmada, her bir ceylan, bu gruplardan birine atanarak çözüm alanını etkili bir şekilde keşfetmeyi ve sömürü dengesini sağlamayı hedefler. MGO, grup dinamiklerini ve bireysel etkileşimleri simüle ederek optimizasyon problemlerinde güçlü performans sergiler (Abbassi vd., 2023).

Bölgesel bekar erkekler: Yetişkin erkek ceylanlar en iyi küresel çözüm konumu X^* etrafında bölgesel hakimiyet kurar (Ekinci & İzci, 2023). Aşağıda Denklem (1) ile matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$X_i^{t+1} = X^* - r_1 \cdot g (X^* - X_j^t) \quad (1)$$

Burada g arama yeteneğini artıran rastgele katsayı Denklem (2) ile verilmiştir.

$$g = g_{\max} \exp \left(-\lambda \frac{t}{T_{\max}} \right) \quad (2)$$

Doğum sürüleri: Dişi ve yavru gruplarına yardım davranışı Denklem (3) ile modellenir (Sarangi & Mohapatra, 2023).

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha r_2 (X_k^t - X_i^t) \quad (3)$$

α genç erkek etki faktörü, X_k rastgele seçilmiş bireydir.

Bekar erkek sürüleri: güçsüz genç erkeklerin baskın yetişkinlerle rekabeti Denklem (4) ile verilmiştir. Burada β genç sürü etki faktörü ve r_3 rastgele skalerdir (Alomoush vd., 2024).

$$X_i^{t+1} = X_j^t + \beta r_3 (X_j^t - X_i^t) \quad (4)$$

Yiyecek aramaya geçiş: Dağ ceylanları, otlamak ve yiyecek kaynakları bulmak amacıyla sürekli olarak uzun mesafeli yolculuklar yaparlar. Bu yolculuklar, ceylanların yüksek hızlı koşma ve atlama becerileri sayesinde

etkili bir şekilde gerçekleştirilir (Alomoush vd., 2024). Dağ ceylanlarının bu davranışı, optimizasyon algoritmasında geniş çaplı arama süreçlerini simgelemek için kullanılmıştır. Uzun mesafe göç ve besin aramaya ilişkin matematiksel model Denklem (5) te gösterilmiştir.

$$X_i^{t+1} = L + r_4 (U - L) \quad (5)$$

Burada L, U problem sınırları r_4 uniform rastgele sayıdır.

Her iterasyonda bu 4 mekanizma uygulanıp yeni nesil oluşturulur ve en iyi çözümler korunur. Zayıf bireyler elenir.

3. Materyal ve metod

3. Material and method

Bu çalışmada, harmonik bileşenlerin genliklerinin doğru ve güvenilir biçimde tahmin edilmesi amacıyla, En Küçük Kareler (Least Squares – LS) yöntemi ile beş farklı meta sezgisel optimizasyon algoritması hibrit bir yapıda birleştirilmiştir. Kullanılan test sinyali, farklı genlik ve faz açılarına sahip temel bileşen ile çeşitli harmonik bileşenlerin sinüs bileşiminden oluşmakta ve hem gürültüsüz hem de farklı sinyal-gürültü oranlarına (SNR) sahip ortamlarda değerlendirilmiştir. LS yöntemi, sinyaldeki sabit frekans bileşenleri için genlik tahmini yapılmasında temel teknik olarak kullanılmış; ancak doğrudan uygulandığında yerel minimumlara takılma riskini azaltmak amacıyla, çözüm uzayının küresel olarak taranmasını sağlayan meta sezgisel algoritmalarla desteklenmiştir. Bu bağlamda, Afrika Akbaba Optimizasyon Algoritması (AVOA) (Abdollahzade vd., 2021), Arşimet Optimizasyon Algoritması (ARO) (Wang vd., 2022), Deniz Martısı Optimizasyonu (SWO) (Faramarzi vd., 2020), Dağ Ceylanı Optimizasyonu (MGO) (Abdollahzade vd., 2021) ve Aquila Optimizasyonu (AO) (Abuailgah vd., 2021) olmak üzere beş farklı yöntem kullanılmıştır. Her bir algoritma ile birlikte 100 iterasyon ve 50 bireyden oluşan popülasyon parametreleriyle çoklu simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve her bir deney, 50 tekrar üzerinden Performans metriği olarak normalize edilmiş ortalama karesel hata (%ε) ile değerlendirilmiştir. Denklem 14 'de % ε, tahmin hatasının gerçek sinyal enerjisine oranını % cinsinden verir. Böylece yöntemlerin hem tahmin doğruluğu hem de gürültüye karşı dayanıklılığı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu yapı hem teorik hem de pratik düzlemde güçlü bir tahmin modeli sunmakta ve özellikle LS yönteminin doğrusal yapı avantajını, meta sezgisel algoritmaların küresel çözüm arama yeteneğiyle birleştirerek etkin bir sistem oluşturmaktadır.

Bu bölümde, harmonik parametrelerin tahmin süreci, doğrusal olmayan optimizasyon algoritması ve doğrusal LS (Least Squares) yöntemi kullanılarak ele alınmaktadır. Elektrik sinyalinin temel tanımı Denklem (6)'de verilmiştir:

$$Z(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(w_n t + \phi_n) + v(t) \quad (6)$$

Bu denklemde, $n = 1, 2, \dots, N$ harmonik sırasını ifade ederken, A_n , ϕ_n ve w_n sırasıyla n 'inci harmoniğin genliği, faz açısı ve açısal frekansıdır. $w_n = 2\pi f_n$ ve $v(t)$, ölçülen sinyale eklenen gürültüyü temsil eder. Her bir harmoniğin A_n , ϕ_n ve w_n değerlerini tahmin etmek için Denklem (7)'de verilmiştir.

$$\hat{Z}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{A}_n \sin(\hat{w}_n t + \hat{\phi}_n) \quad (7)$$

Burada $\hat{A}_n$, $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ sırasıyla A_n , ϕ_n ve w_n tahminlerini ifade etmektedir. Bu durum göz önüne alınarak ana sinyal Denklem (8) ile ifade edilir.

$$Z(t) = \hat{Z}(t) + r(t) = \sum_{n=1}^N \hat{A}_n \sin(\hat{w}_n t + \hat{\phi}_n) + r(t) \quad (8)$$

Burada $r(t)$, $Z(t)$ ile $\hat{Z}(t)$ arasındaki farkı ifade eden tahminleri temsil etmektedir. Tahminin amacı N 'in belirlendiği koşullar $r(t)$ değerini en küçük yapacak en iyi $\hat{A}_n$, $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ değerlerini bulmaktır.

Modeldeki harmoniklerin fazları doğrusal olmayan ve $[0, 2\pi)$ aralığında sınırlı olduğundan, ϕ_n ve w_n değerlerini tahmin etmek için yinelenmeli MGO optimizasyon algoritması kullanılmaktadır. Her iterasyonda

fazlar ve frekanslar tahmin edildikten sonra, genlik $\hat{A}_n$, standart LS yöntemi ile elde edilir. $Z(t)$ sinyali K örnekle örneklendirildiğinde, ayrık doğrusal model Denklem (9) ve (10) ile temsil edilir.

$$Z(k) = H(k) \cdot A + v(k), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

Aşağıdaki Tablo 1 de MGO algoritmasının başlangıç parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 1. MGO algoritmasının başlangıç parametreleri

Tablo 1. Initial parameters of the MGO algorithm

Parametre	Açıklama	Önerilen Başlangıç Değeri
Popülasyon Boyutu	Aynı anda evrimleşen birey sayısı	50
Maksimum İterasyon	Algoritmanın çalışacağı jenerasyon sayısı	100
Keşif Katsayısı Başlangıç	Keşif yeteneğinin başlangıç değeri	2.0
Azalan Faktör λ	g 'nin iterasyonla azalma hızını kontrol eder	0.05
Doğum Sürü Etki Katsayısı α	Dişi-yavru grubundaki çekim gücü	0.5
Bekar Sürü Etki Katsayısı β	Genç erkeklerin baskınlarla rekabet şiddeti	0.5
Rastgele Skalerler $r1, r2, r3, r4$	Her adımda üretilen uniform rastgele sayı	Üretildiği gibi (0–1 arası)
Çözüm Aralığı (Lb, Ub)	Aranan değişkenlerin alt ve üst sınırları	$[0, 2\pi]$

$$H(k) = \begin{bmatrix} \sin(w_1 t_1 + \phi_1) & \dots & \sin(w_N t_1 + \phi_N) \\ \sin(w_1 t_2 + \phi_1) & \dots & \sin(w_N t_2 + \phi_N) \\ \vdots & & \vdots \\ \sin(w_1 t_k + \phi_1) & \dots & \sin(w_N t_k + \phi_N) \\ \vdots & & \vdots \\ \sin(w_1 t_K + \phi_1) & \dots & \sin(w_N t_K + \phi_N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Burada $Z(k)$, eklenen gürültü $v(k)$ ile ölçülen değerin k . örneğidir; $A = [A_1, A_2, \dots, A_N]^T$ tahmin edilmesi gereken genlik vektörüdür; $H(k)$, sistem yapısı matrisidir. Daha önce belirtildiği gibi, amaç $Z(k)$ ile $\hat{Z}(k) = \hat{H}(k)\hat{A}$ arasındaki farkı en aza indiren en iyi $\hat{A}_n$, $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ değerini bulmaktır. $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{w}_n$ değerleri belirli bir optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplandıktan sonra $\hat{H}(k)$ bu değerlere bağlı kalarak hesaplanır. $\hat{H}(k)$ 'nin tam sıra bit matris olduğu varsayıldığında $\hat{A}$ 'nın tahmini için standart LS algoritması Denklem (11) olarak güncellenir.

$$\hat{A} = [\hat{H}^T(k) \cdot \hat{H}(k)]^{-1} \hat{H}^T(k) Z(k) \quad (11)$$

Bu sinyalin tahmini Denklem (12) ile gerçekleştirilir.

$$\hat{Z}(k) = \hat{H}(k)\hat{A} \quad (12)$$

$$J = \sum_{k=1}^K (Z(k) - \hat{Z}(k))^2 \quad (13)$$

LS yöntemi, sinyali oluşturan frekans bileşenlerinin genliklerini tahmin etmek için temel araç olarak kullanılmıştır. Denklemler yardımıyla, hedef sinyal ile tahmini sinyal arasındaki hata fonksiyonu minimuma indirgenmiş ve bu işlem lineer cebirsel çözümle gerçekleştirilmiştir. Ancak, LS yöntemi başlangıç parametrelerine ve hatalı frekans tahminlerine karşı hassas olduğundan, hata yüzeyinde küresel minimumu bulmak için meta sezgisel algoritmalarla desteklenmiştir. Belirtilen beş optimizasyon algoritması, LS ile hibrit şekilde kullanılmıştır. Her biri, harmonik sinyaldeki genlik vektörünü optimize ederek toplam hatayı minimize etmeye çalışır. Bu çalışmada kullanılan En Küçük Kareler (Least Squares) yönteminin harmonik tespit sürecinde başlangıç hatalarını hızla gidererek global en iyi çözüme yönelmeyi sağlar. Burada;

-Daha Düşük Başlangıç Hatası: LS ön tahminindeki daha isabetli genlik değerleri, MGO'nun arama uzayını erkenden daraltarak erken yakınsama sağlar.

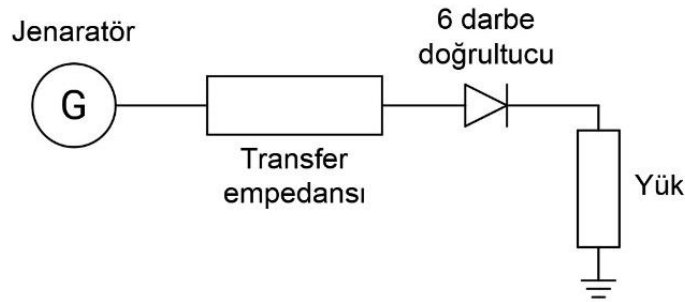
- Kaçış-Takip Dengesi:** MGO'nun eksplorasyon ve eksploitasyon evrelerindeki adaptif geçiş yeteneği, gürültü kaynaklı yerel maksimum tuzaklarından daha etkin biçimde kurtulur.
- Hızlı ve İstikrarlı Yakınsama:** Ortalama olarak ilk 50 iterasyonda ε değerini %75 oranında düşürerek, gerçek zamanlı uygulamalarda kritik öneme sahip hızlı güncellemeyi destekler.
- Gürültü Dayanıklılığı:** 0 dB koşulunda dahi diğer yöntemlere kıyasla yaklaşık %20–%35 daha düşük normalize hata ile çalışarak, sinyal gürültü oranı azaldığında bile yüksek performansını korur.

Karşılaştırma amacıyla, Tablo 2'de kullanılanla aynı test sinyalini üretmek için bir simülasyon modülü kullanılmaktadır. Test sinyali, $Z_0(t)$ olarak adlandırılır ve bu, basit güç sistemindeki yük barasının terminalinden örneklenen bozulmuş bir voltaj dalga formudur. Test sinyalinin harmoniklerinin frekansları ve fazları Tablo 1'de listelenmiştir (Z.Lu vd., 2008).

Tablo 2. Test sinyalinin harmonik içeriği
Tablo 2. Harmonic content of the test signal

Harmonik düzen	Genlik (p.u)	Faz (derece)
Temel (50 Hz)	0.95	-2.02
5. (250 Hz)	0.09	82.1
7. (350 Hz)	0.043	7.9
11. (550 Hz)	0.03	-147.1
13. (650 Hz)	0.033	162.6

Test sinyali, 50 Hz'lik bir voltaj dalga formundan döngü başına 64 nokta örneklenerek alınmıştır. Algoritma hem gürültüsüz hem de gürültülü durumlarda çalıştırılmıştır. Simülasyon Gauss gürültüsü kullanılmıştır. Her bir gürültü türü için sinyal-gürültü oranları (SNR) sırasıyla 40, 20, 10 ve ayrıca gürültüsüz olarak seçilmiştir. Bu nedenle, bu gürültüler orijinal sinyale eklenerek dört farklı sinyal üretilmiştir. Orijinal test sinyali dahil olmak üzere, her bir gürültülü durumda dört sinyal algoritma tarafından ayrı ayrı işlenmiştir. Bu makaledeki simülasyon çalışmasında, kullanılan algoritmalar için popülasyon boyutu ve maksimum jenerasyon sayısı sırasıyla 50 ve 100 olarak seçilmiştir. Algoritmaların durdurma kriteri, maksimum jenerasyon sayısına ulaşılmasıdır. Şekil 1 yük barasında tam dalga altı darbeleri köprü doğrultucu içeren iki baralı üç fazlı basit bir güç sistemini tanımlar.

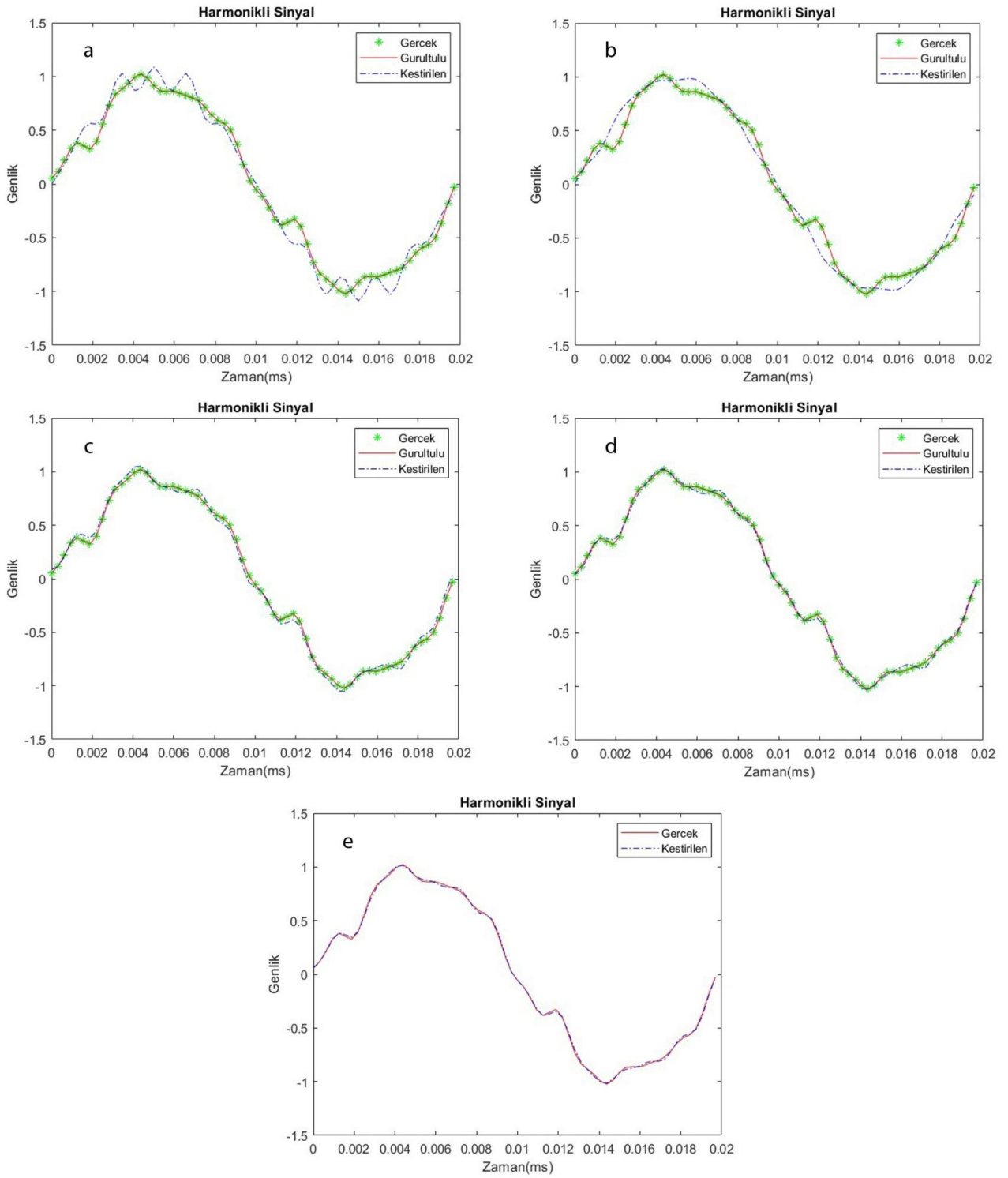


Şekil 1. Basit güç sistemi: yükü besleyen altı darbeleri tam dalga köprü doğrultucuya sahip iki veri yolu mimarisi
Figure 1. Simple power system: a two-bus architecture with six-pulse full wave bridge rectifier supplying the load

4. Simülasyon sonuçları

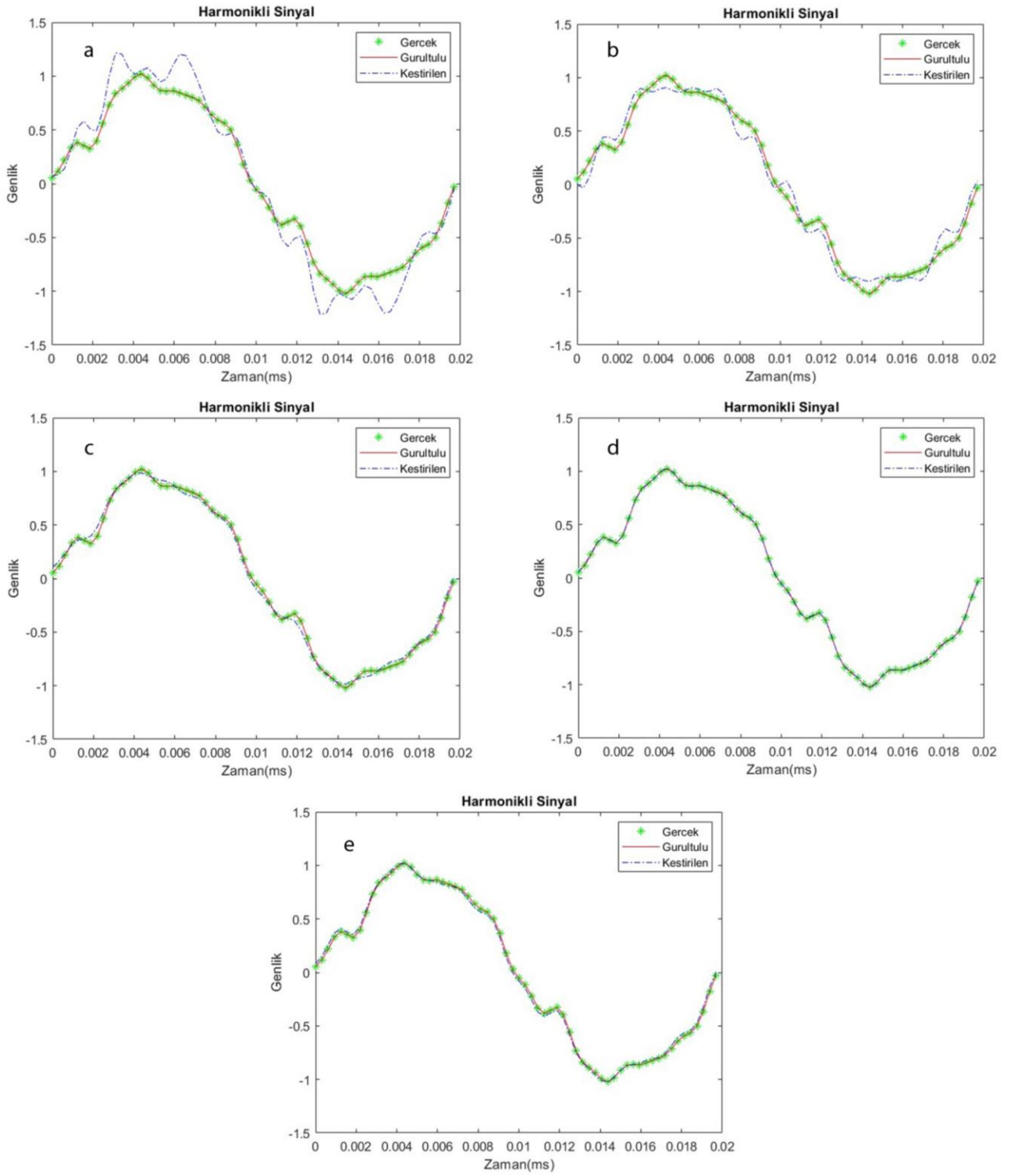
4. Simulation results

Bu simülasyonda, test sinyalinde beş harmonik dikkate alınmıştır. Sistem matrisi $H(k)$, denklem 10'da verilmiştir. Bu durumda tahmin edilmesi gereken parametreler temel frekans, 5., 7., 11. ve 13. harmonikler için beş faz ve beş genlik olmak üzere on adettir. Tahmin edilen harmoniklerden yeniden yapılandırılan dalga formu, orijinal test sinyali ile karşılaştırılmış ve hibrit yöntemlere ait tüm sonuçlar Şekil 2-3-4-5-6'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, yeniden yapılandırılmış sinyal, sinyal-gürültü oranının (SNR) yüksek olduğu durumda orijinal sinyale neredeyse aynıdır. Gürültü koşulları kötüleştikçe, tahmin sonucundaki hatalar artmasına rağmen sinyal yine de tatmin edici bir doğruluğu korur.

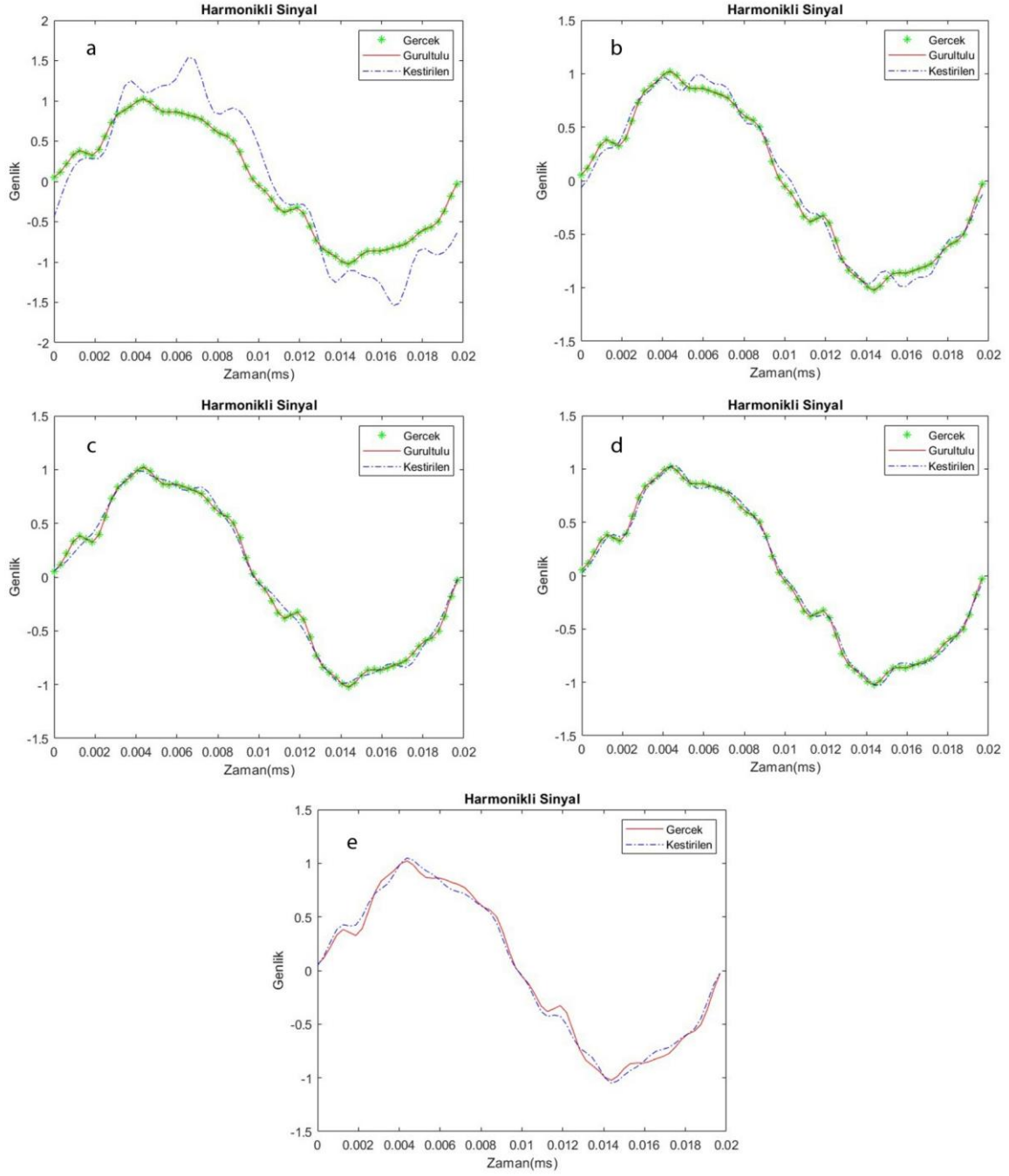


Şekil 2. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (AO-LS) a) 0dB’de AO-LS b) 10dB’de AO-LS c) 20dB’de AO-LS d) 40dB’de AO-LS d) Gürültüsüz ortamda AO-LS

Figure 2. Actual and estimated waveforms for the test signal a) AO-LS in 0dB b) AO-LS in 10dB c) AO-LS in 20Db d) AO-LS in 40dB d) AO-LS in noiseless environment

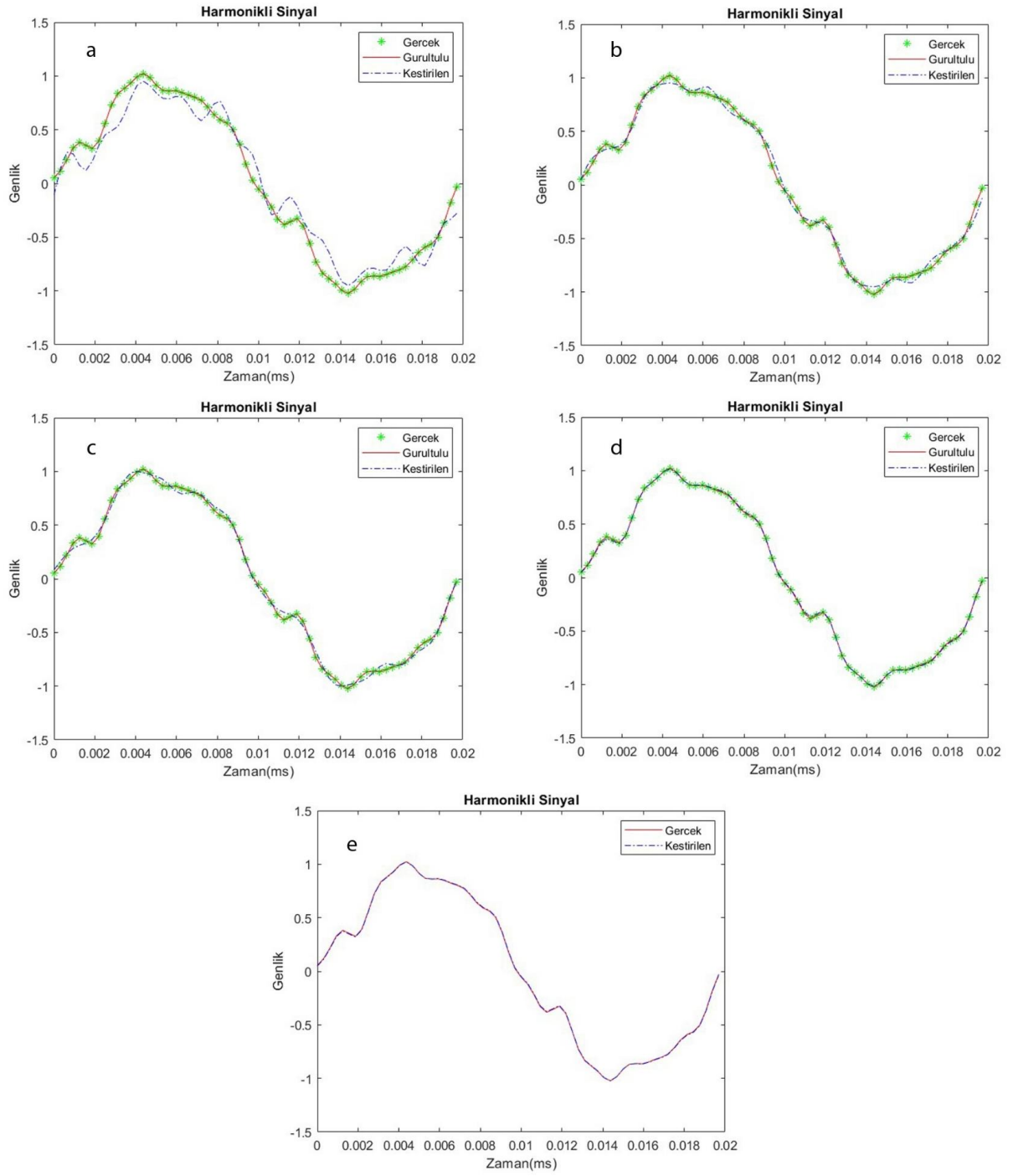


Şekil 3. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (AVOA-LS) a) 0dB’de (AVOA-LS) b) 10dB’de (AVOA-LS) c) 20dB’de (AVOA-LS) d) 40dB’de (AVOA-LS) d) Gürültüsüz ortamda (AVOA-LS)
Figure 3. Actual and estimated waveforms for the test signal a) (AVOA-LS) in 0dB b) (AVOA-LS) in 10dB c) (AVOA-LS) in 20dB d) (AVOA-LS) in 40dB d) (AVOA-LS) in noiseless environment



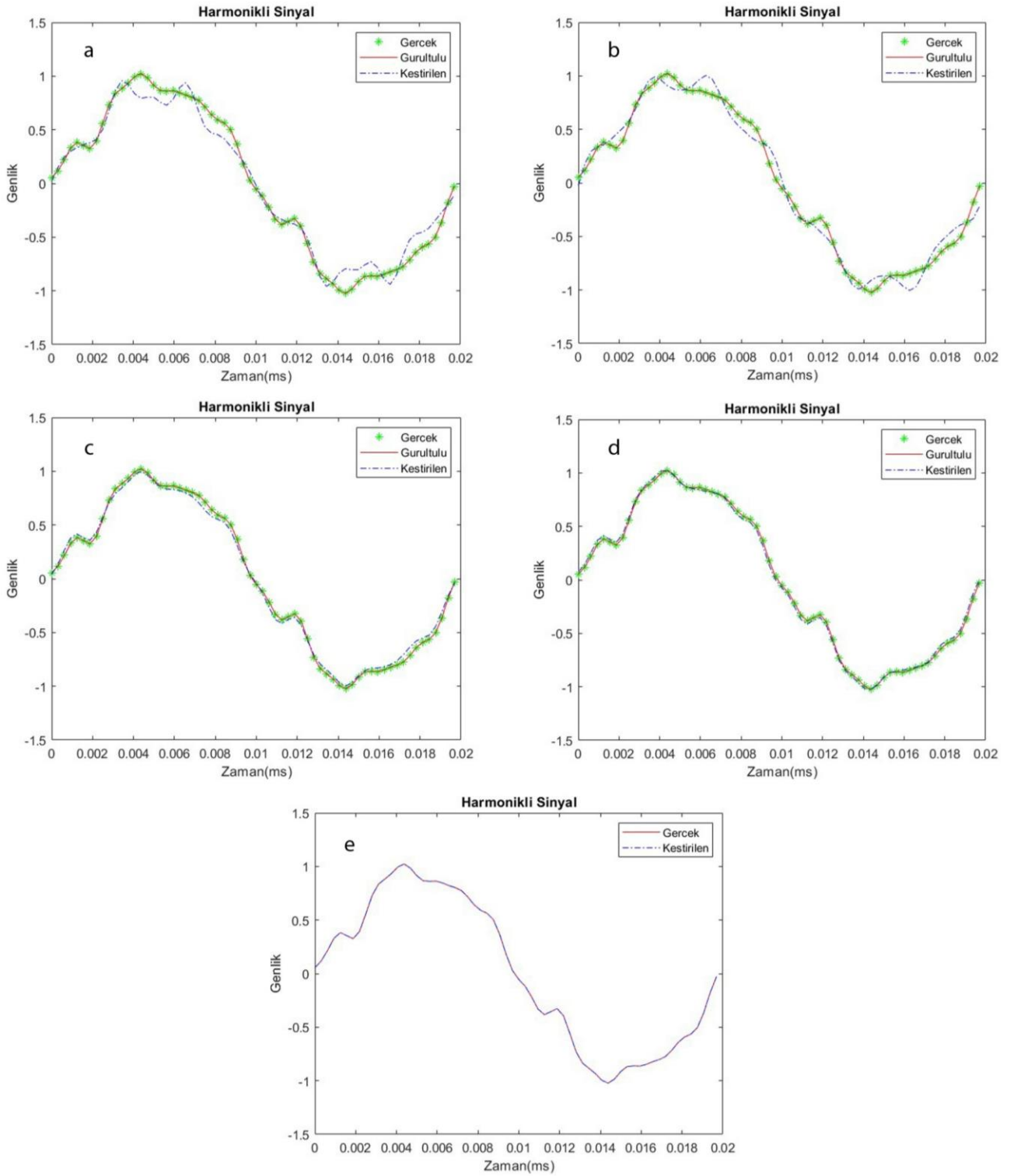
Şekil 4. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (SWO-LS) a) 0dB’de SWO-LS b) 10dB’de SWO-LS c) 20dB’de SWO-LS d) 40dB’de SWO-LS d) Gürültüsüz ortamda SWO-LS

Figure 4. Actual and estimated waveforms for the test signal a) SWO-LS in 0dB b) SWO-LS in 10dB c) SWO-LS in 20dB d) SWO-LS in 40dB d) SWO-LS in noiseless environment



Şekil 5. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (ARO-LS) a) 0dB’de ARO-LS b) 10dB’de ARO-LS c) 20dB’de ARO-LS d) 40dB’de ARO-LS d) Gürültüsüz ortamda ARO-LS

Figure 5. Actual and estimated waveforms for the test signal a) ARO-LS in 0dB b) ARO-LS in 10dB c) ARO-LS in 20dB d) ARO-LS in 40dB d) ARO-LS in noiseless environment



Şekil 6. Test sinyali için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (MGO-LS) a) 0dB’de (MGO-LS) b) 10dB’de (MGO-LS) c) 20dB’de (MGO-LS) d) 40dB’de (MGO-LS) d) Gürültüsüz ortamda (MGO-LS)

Figure 6. Actual and estimated waveforms for the test signal a) (MGO-LS) in 0dB b) (MGO-LS) in 10dB c) (MGO-LS) in 20dB d) (MGO-LS) in 40dB d) (MGO-LS) in noiseless environment

Simülasyon çalışmalarında, normalize edilmiş ortalama karesel hata (ϵ) Denklem (14) ile hesaplanmıştır:

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=1}^K (Z(k) - \hat{Z}(k))^2}{\sum_{k=1}^K Z(k)^2} \times 100 \quad (14)$$

Önerilen algoritmaların ilgili tahmin sonuçları denklem 14'te hesaplanan sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, MGO-LS algoritmasıyla yeniden yapılandırılmış sinyal, sinyal-gürültü oranının (SNR) yüksek olduğu yani gürültü oranının düşük olduğu durumda orijinal sinyalle yüksek uyum içinde elde edildiği gözlenmektedir. Gürültü koşulları kötüleştikçe yani SNR azaldıkça, tahmin sonucundaki tahmin hataları artmasına rağmen diğer kestirim yöntemleriyle kıyaslandığında en iyi kestirilen sinyal olarak umut vadeci bir sonuç verdiği gözlenmiştir.

Tablo 3. Test sinyalindeki harmoniklerin tahmini için kullanılan algoritma hatalarının karşılaştırılması

Table 3. Comparison of algorithm errors used for estimating harmonics in the test signal.

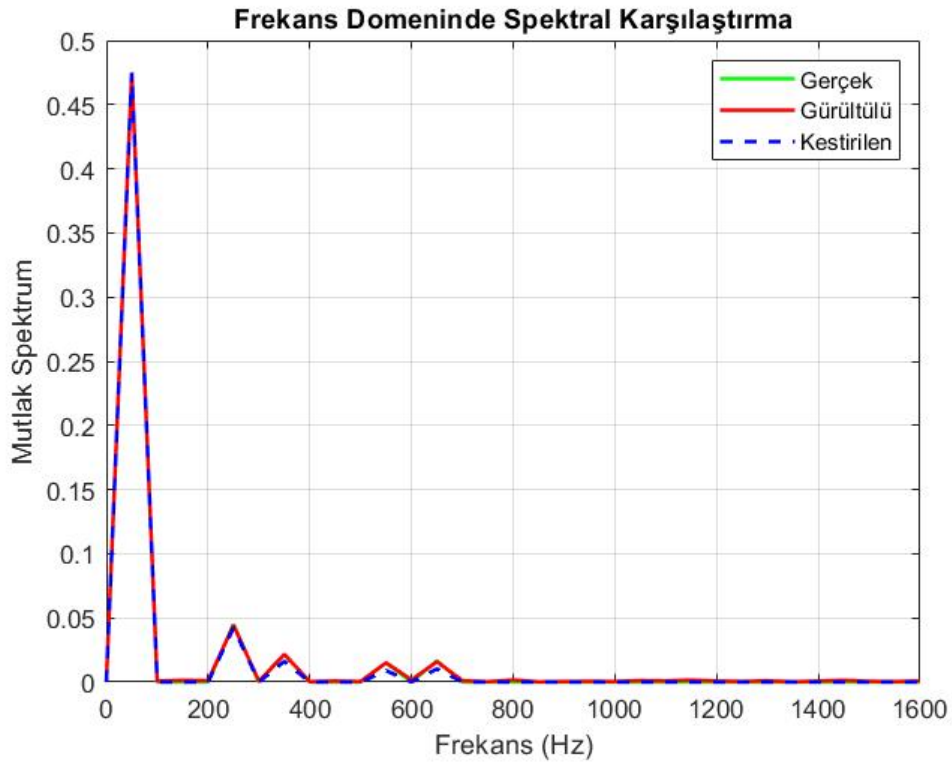
Test Ortamı	SNR	% ϵ				
		MGO-LS	AVOA-LS	SWO-LS	ARO-LS	AO-LS
Beyaz Gaussian Gürültülü Ortam	0dB	8.3413	18.7593	14.6448	10.5234	9.6438
	10 dB	1.3551	1.9084	1.7824	4.3213	1.6828
	20 dB	0.2892	0.2856	0.5690	2.6807	0.2404
Gürültüsüz Ortam	40 dB	0.0417	0.0854	0.4404	3.4095	0.0734
	-	0.0331	0.0439	0.4495	3.2362	0.0808

Tablo-3'te görüldüğü üzere en iyi tahmini veren algoritma MGO-LS'nin farklı parametrelerdeki karşılaştırmalı grafikleri aşağıdaki gibidir.

4.1. Frekans domeninde spektral karşılaştırma

4.1. Spectral comparison in frequency domain

Aşağıdaki Şekil 7'de kestirilen sinyalin frekans domeninde gerçek sinyale oldukça yakın bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle temel frekans bileşenlerinde (200-600 Hz aralığı) kestirilen genliklerin gürültüsüz sinyal ile neredeyse örtüştüğü görülmektedir. Gürültülü sinyale kıyasla, kestirim algoritmasının yüksek frekans bileşenlerinde bile (1200-1600 Hz) gürültüyü etkili bir şekilde filtrelediği ve sinyalin orijinal yapısını koruduğu açıkça gözlemlenmektedir. Bu sonuç, modelin spektral bozulmaları başarıyla düzeltebildiğinin bir göstergesidir.



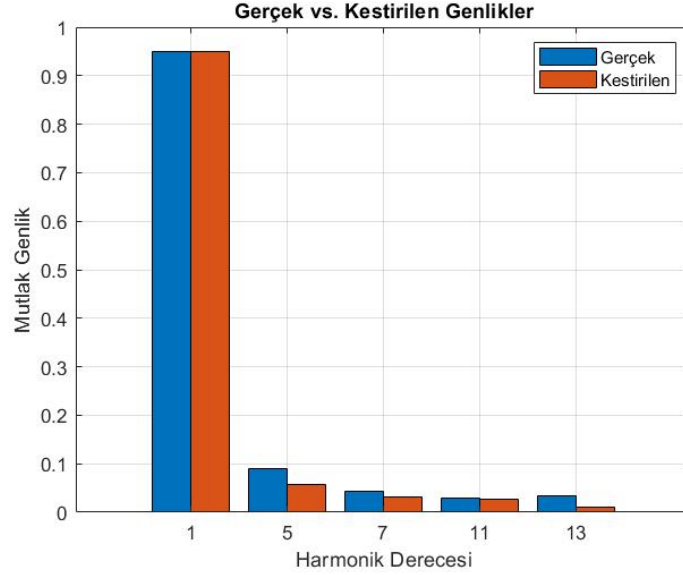
Şekil 7 MGO-LS yöntemi için frekans domeninde spektral karşılaştırması

Figure 7. Spectral comparison in frequency domain for MGO-LS method.

4.2. Gerçek ve kestirilen genlikler

4.2. Actual vs. predicted amplitudes

Şekil 8’de Harmonik genliklerin karşılaştırılması, kestirim modelinin temel harmoniklerde (5. ve 7.) mükemmel yakın bir doğruluk sağladığını ortaya koymaktadır. Yüksek harmoniklerde (11.ve 13.) gözlemlenen küçük sapmalara rağmen, genliklerin genel eğiliminin doğru bir şekilde yakalandığı görülmektedir. Bu durum, modelin harmonik içeriği büyük ölçüde koruyabildiğini ve sinyalin enerji dağılımını başarıyla temsil ettiğini kanıtlamaktadır.



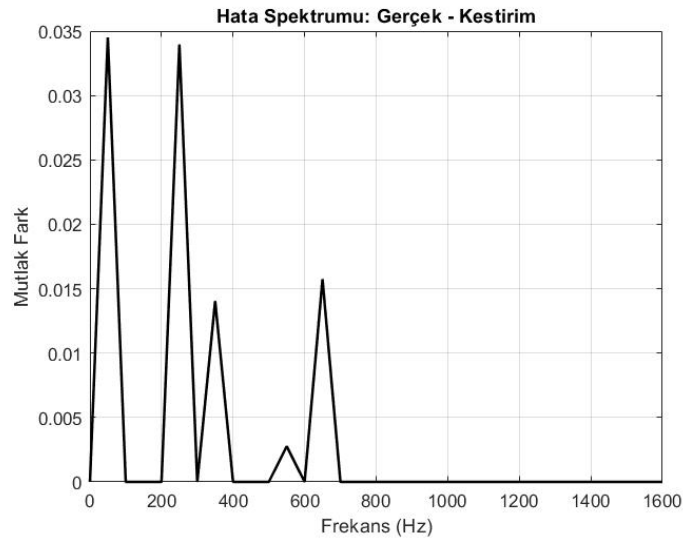
Şekil 8 MGO-LS yöntemi için gerçek ve kestirilen genlikler için karşılaştırma grafiği

Figure 8. Comparison graph for real and estimated amplitudes for MGO-LS method.

4.3. Hata spektrumu: gerçek ve kestirim arası fark

4.3. Error spectrum: difference of actual and predicted values

Şekil 9’da Hata spektrumu analizi, kestirilen sinyal ile gerçek sinyal arasındaki farkın genel olarak düşük seviyelerde kaldığını göstermektedir. Özellikle düşük ve orta frekans bölgelerinde (200-1000 Hz) hataların minimum düzeyde olduğu görülmekte olup, bu da modelin bu bantlarda son derece güvenilir olduğunu desteklemektedir. Yüksek frekanslardaki küçük sapmalar ise, modelin gürültüyü bastırma konusundaki dengeli yaklaşımını yansıtmaktadır.



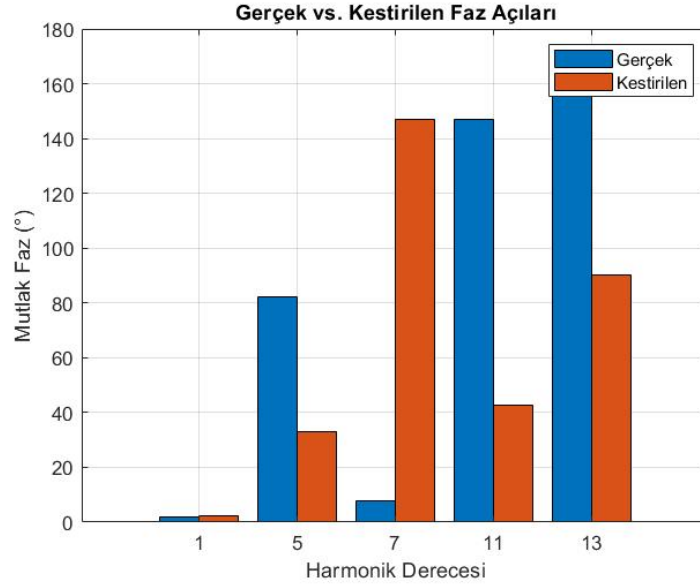
Şekil 9 MGO-LS yöntemi için gerçek - kestirim hata spektrumu

Figure 9. Actual - prediction error spectrum for MGO-LS method

4.4 Gerçek vs. kestirilen faz açıları

4.4 Actual vs. predicted phase angles

Şekil 10'da Faz açılarının karşılaştırılması, modelin harmonik fazları büyük bir doğrulukla tahmin edebildiğini göstermektedir. Temel harmoniklerde gerçek ve kestirilen fazların neredeyse tamamen örtüştüğü gözlemlenmektedir. Yüksek harmoniklerdeki sapmalara rağmen, faz kestirimindeki genel başarı, modelin sinyalin zaman-faz ilişkisini doğru bir şekilde koruyabildiğinin güçlü bir kanıtıdır.



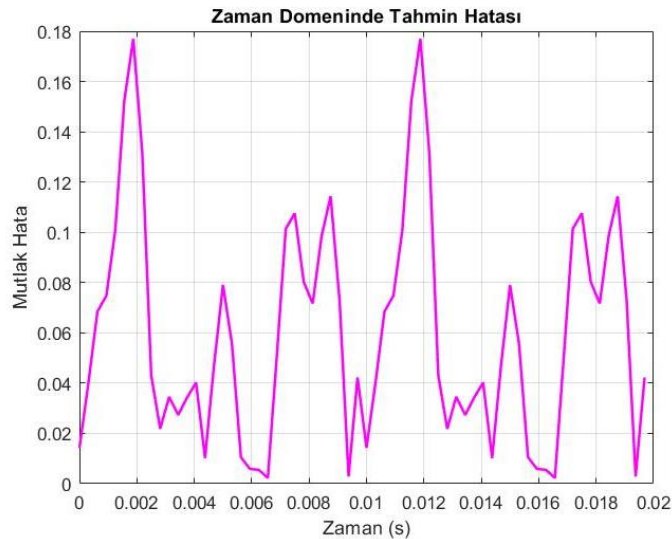
Şekil 10 MGO-LS yöntemi için gerçek ve kestirilen faz açıları için karşılaştırma grafiği

Figure 10 Comparison graph for actual and estimated phase angles for MGO-LS method

4.5. Zaman domeninde tahmin hatası

4.5. Forecast error in time domain

Şekil 11'de Zaman domenindeki hata analizi, kestirilen sinyalin gerçek sinyale genel olarak çok yakın olduğunu ortaya koymaktadır. Hata değerlerinin büyük ölçüde sıfıra yakın seyretmesi, modelin dinamik davranışları başarıyla taklit edebildiğini göstermektedir. 0.002 ve 0.006 sn gibi zaman aralıklarındaki küçük sapmalar, sinyalin geçici özelliklerinin kestirimindeki zorlukları yansıtsa da genel performansın oldukça yüksek olduğu açıktır.



Şekil 11 MGO-LS yöntemi için zaman domeninde tahmin hatası

Figure 11. Forecast error in time domain for MGO-LS method.

5.Sonuçlar

5.Conclusions

Bu çalışmada, harmoniklerin tespitinde kullanılan son yıllarda geliştirilen optimizasyon yöntemlerinin en hızlı şekilde en doğru genlik ve faz açısı değerlerini bulan kestirim yöntemini verecek bir çalışma karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. AVOA (African Vulture Optimization Algorithm), ARO (Artificial Rabbit Optimization), SWO (Spider Wasp Optimization), MGO (Mountain Gazelle Optimization) ve AO (Aquila Optimization) algoritmaları incelenmiştir. Algoritmalara ait sonuçlardan, aynı popülasyon jenerasyonu kullanıldığında, MGO-LS algoritması, harmonik tahminindeki hataları azaltma konusunda diğer algoritmalar ile karşılaştırıldığında en iyi tahminle önemli bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Gürültü (SNR) yüksek olduğunda, özellikle gürültü olmadığındaki koşullarda dahi en iyi tahmini sağlamıştır. Gürültüsüz durumda en kısa sürede tahmin yapan algoritma ise 0.0062 sn ile SWO-LS algoritması olmuştur. Deneysel bulgular, MGO-LS algoritmasının özellikle gürültülü (0 dB) koşullarda diğer hibrit yöntemlere kıyasla belirgin bir üstünlük sergilediğini göstermektedir. Deneysel bulgular, MGO-LS'nin hem gürültüsüz hem de 0 dB SNR (yüksek gürültü) koşullarında en düşük ε değerini koruduğunu göstermiştir. Gürültüsüz ortamda $\varepsilon = 0,0331$ ile en düşük hatayı veren MGO-LS, 0 dB'de $\varepsilon = 8,3413$ değerine ulaşmıştır. Aynı koşulda AVOA-LS'in ε değeri 18,7593, SWO-LS'in 14,6448, ARO-LS'in 10,5234 ve AO-LS'in 9,6438 olarak ölçülmüştür. Buna göre MGO-LS, AVOA-LS'e kıyasla %55,5, SWO-LS'e göre %43,0, ARO-LS'e göre %20,8 ve AO-LS'e göre %13,5 daha düşük normalize edilmiş hata (ε) sunmuştur. Bu başarı, MGO'nun adaptif "kaçış-takip" mekanizmasıyla erken iterasyonlarda hatayı hızlı azaltmasına ve LS ön tahmininin isabetli başlangıç değerleriyle arama uzayını etkin biçimde daraltmasına bağlanabilir. Ayrıca MGO-LS, ilk 50 iterasyonda ε değerini yaklaşık %75 oranında düşürerek gerçek zamanlı harmonik analizi gerektiren uygulamalarda gerekli hız-doğruluk dengesini sağlamaktadır.

Şekil 2–6'daki gerçek vs. tahmini dalga formları üzerinden, özellikle düşük SNR'de MGO-LS'nin yeniden yapılandırma başarısı ortaya konmuştur. Ayrıca burada hızlı yakınsama performansı gösterdiği de grafiksel sonuç ile tespit edilmiştir. Çalışmada önerilen MGO-LS yöntemi hem gürültüsüz hem de düşük sinyal-gürültü oranına sahip ortamlarda yüksek doğrulukla harmonik genlik tahmini yapabilmesi ve hızlı yakınsama özelliği sayesinde, gerçek zamanlı güç sistemlerinde harmonik izleme uygulamaları için uygun bir çözüm sunmaktadır. Ortalama hesaplama süresinin 0,0068 saniye gibi düşük bir seviyede olması, yöntemin özellikle anlık analiz ve sürekli izleme gerektiren enerji kalite izleme sistemlerinde etkin bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Hatayı en iyi minimize eden yöntemin MGO-LS yöntemi olduğu ortaya konmuştur.

Yapılan analizler, kullanılan kestirim modelinin genel olarak son derece başarılı olduğunu göstermektedir. Model hem frekans hem de zaman domeninde sinyalin temel özelliklerini büyük bir doğrulukla koruyabilmekte, gürültüyü etkili bir şekilde filtreleyerek sinyalin orijinal yapısını ortaya çıkarabilmektedir. Harmonik genlik ve faz kestirimlerindeki yüksek doğruluk, modelin sinyal işleme uygulamalarında güvenilir bir araç olarak kullanılabileceğini desteklemektedir. Elde edilen sonuçlar, modelin pratik uygulamalarda başarıyla kullanılabileceğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır.

Teşekkür

Acknowledgement

Yazarlar, meta sezgisel optimizasyon yöntemleri konusunda değerli bilgilerini paylaşan Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Sibel ARSLAN'a ve makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılarından dolayı editör ve hakemlere teşekkür eder.

Yazar katkısı

Author contribution

Şule Nilhan OĞUZALP; Kaynaklar, araştırma, yöntemlerin belirlenmesi, algoritmaların oluşturulması, analiz edilmesi, sonuçlandırılması, yorumlanması, Yazma/orijinal taslak. Sıtkı AKKAYA: Araştırma konusunun belirlenmesi, yorumların değerlendirilmesi, yazım kontrolü. Ulaş EMİNOĞLU: Biçimsel analiz, yorumların değerlendirilmesi, yazım kontrolü.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Abbassi, R., Saidi, S., Urooj, S., Alhasnawi, B. N., Alawad, M. A., & Premkumar, M. (2023). An accurate metaheuristic mountain gazelle optimizer for parameter estimation of single-and double-diode photovoltaic cell models. *Mathematics*, 11(22), 4565.
- Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Jameel, M., & Abouhawwash, M. (2023). Spider wasp optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm. *Artificial Intelligence Review*, 56(10), 11675-11738.
- Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh, F. S., & Mirjalili, S. (2021). African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107408.
- Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh, F. S., Khodadadi, N., & Mirjalili, S. (2022). Mountain gazelle optimizer: a new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *Advances in Engineering Software*, 174, 103282.
- Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A. A., Al-Qaness, M. A., & Gandomi, A. H. (2021). Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107250.
- Akyol, S. (2021). Global optimizasyon için yeni bir hibrit yöntem: kaya kartalı optimizasyonu-tanjant arama algoritması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 721-733.
- Ali, A., Ahmed, M., Apon, H. J., Rahman, M. S., Ahsan, A., Prapti, S. T., & Ahmed, A. (2023, October). Power System Harmonics Estimation: A new optimization technique-based implementation with African Vulture Optimization Algorithm based Least Square Method. (2023) *First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI)* (pp. 1-7). IEEE.
- Alomoush, W., Houssein, E. H., Alrosan, A., Abd-Alrazaq, A., Alweshah, M., & Alshinwan, M. (2024). Joint opposite selection enhanced Mountain Gazelle Optimizer for brain stroke classification. *Evolutionary Intelligence*, 1-19.
- Apon, H. J., Abid, M. S., Morshed, K. A., Nishat, M. M., & Faisal, F. (2021, October). Power system harmonics estimation using hybrid Archimedes optimization algorithm-based least square method. In *2021 13th international conference on information & communication technology and system (ICTS)* (pp. 312-317). IEEE.
- Aydemir, S. B. (2022). Küresel optimizasyon için gauss kaotik haritası ile kartal optimizasyonu. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 85-104.
- Bakır, H. (2024). Dynamic fitness-distance balance-based artificial rabbits optimization algorithm to solve optimal power flow problem. *Expert Systems with Applications*, 240, 122460.
- Bettayeb, M., & Qidwai, U. (2003). A hybrid least squares- GA-based algorithm for harmonic estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 377-382.
- Biswas, S., Chatterjee, A., & Goswami, S. K. (2013). An artificial bee colony-least square algorithm for solving harmonic estimation problems. *Applied Soft Computing*, 13(5), 2343-2355.
- Bollen, M. H. J., & Hassan, F. (2011). Integration of Distributed Generation in the Power System. Wiley-IEEE Press.

- Costa, F. F., Cardoso, A. J. M., & Fernandes, D. A. (2007, April). Harmonic analysis based on Kalman filtering and Prony's method. In *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* (pp. 696-701). IEEE.
- Ekinci, S., & Izci, D. (2023). Enhancing IIR system identification: Harnessing the synergy of gazelle optimization and simulated annealing algorithms. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 5, 100225.
- Fan, J., Li, Y., & Wang, T. (2021). An improved African vultures optimization algorithm based on tent chaotic mapping and time-varying mechanism. *Plos one*, 16(11), e0260725.
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert systems with applications*, 152, 113377.
- Gaing, ZL (2004). AVR sisteminde PID kontrolörünün optimum tasarımı için bir parçacık sürüsü optimizasyon yaklaşımı. *IEEE enerji dönüşümü işlemleri*, 19 (2), 384-391.
- Gülmez, B. (2023). Stock price prediction with optimized deep LSTM network with artificial rabbits optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 227, 120346.
- Haseeb, A., Waleed, U., Ashraf, M. M., Siddiq, F., Rafiq, M., & Shafique, M. (2023). Hybrid weighted least square multi-verse optimizer (WLS-MVO) framework for real-time estimation of harmonics in non-linear loads. *Energies*, 16(2), 609.
- 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.
- Khodadadi, N., El-Kenawy, E. S. M., De Caso, F., Alharbi, A. H., Khafaga, D. S., & Nanni, A. (2023). The Mountain Gazelle Optimizer for truss structures optimization. *Applied Computing and Intelligence*, 3(2), 116-144.
- Li, Y. F., & Fu, K. (2008). Eliminating the picket fence effect of the fast Fourier transform. *Computer Physics Communications*, 178(7), 486-491. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.11.001>
- 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.
- Ray,P.K., & Subudhi, B. (2012). BFO optimized RLS algorithm for power system harmonic estimation. *Applied Soft Computing*, 12(8), 1965-1977.
- Sarangi, P., & Mohapatra, P. (2023). Evolved opposition-based mountain gazelle optimizer to solve optimization problems. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 35(10), 101812.
- Sasmal, B., Hussien, A. G., Das, A., & Dhal, K. G. (2023). A comprehensive survey on aquila optimizer. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(7), 4449-4476.
- Sasmal, B., Das, A., Dhal, K. G., & Saha, R. (2024). A Comprehensive Survey on African Vulture Optimization Algorithm. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31(3), 1659-1700.
- Subjak, Joseph S., & Jhon S. Mcquilklin. Harmonics causes, effects,measurements, and analysis : an update. *IEEE transactions on industry applications*. 26.6 (1990); 1034-1042.
- Shi, Y., & Eberhart, R. C. (1998). Parameter selection in particle swarm optimization. In *Evolutionary Programming VII: 7th International Conference, EP98 San Diego, California, USA, March 25-27, 1998 Proceedings 7* (pp. 591-600). Springer Berlin Heidelberg
- Turgut, O. E., & Turgut, M. S. (2023). Local search enhanced Aquila optimization algorithm ameliorated with an ensemble of Wavelet mutation strategies for complex optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 206, 302-374.
- Wang, L., Cao, Q., Zhang, Z., Mirjalili, S., & Zhao, W. (2022). Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114, 105082.

- Yang, X. S. (2010). Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications. Wiley.
- Zhang, J., Khayatnezhad, M., & Ghadimi, N. (2022). Optimal model evaluation of the proton-exchange membrane fuel cells based on deep learning and modified African Vulture Optimization Algorithm. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(1), 287-305.
- Zhang, Y. J., Yan, Y. X., Zhao, J., & Gao, Z. M. (2022). AOAAO: The hybrid algorithm of arithmetic optimization algorithm with aquila optimizer. *IEEE Access*, 10, 10907-10933.
- Zhao, B., Guo, C. X., & Cao, Y. J. (2014). "A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch." *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 1070–1078.