



T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA PROGRAMI

GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ BOZULMANIN TESPİTİ İÇİN GENLİK VE
FREKANS DEĞERLENDİRMESİNE DAYALI OLARAK YENİ
YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Şule Nilhan OĞUZALP

Birinci Danışman: Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKKAYA

TOKAT-2025

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Güç sistemlerindeki bozulmanın tespiti için genlik ve frekans değerlendirilmesine dayalı olarak yeni yöntemlerin geliştirilmesi” adlı Doktora tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

28.09.2025

Şule Nilhan OĞUZALP

JÜRİ KABUL VE ONAY

Şule Nilhan OĞUZALP tarafından hazırlanan “**Güç sistemlerindeki bozulmanın tespiti için genlik ve frekans değerlendirilmesine dayalı olarak yeni yöntemlerin geliştirilmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 31/07/2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Çokluğu ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	(Unvanı, Adı Soyadı)	İmza
Üye (Danışman):	Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU	
Üye (Başkan):	Prof. Dr. Sefa TARHAN	
Üye:	Doç. Dr. Bülent TURAN	
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AVŞAR	
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Yusuf DOĞAN	

ONAY

...../...../2025

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Danışmanım Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU ve ikinci danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Sıtkı AKKAYA hocalarıma akademik bilgileriyle bana yol gösterip tezimin daha kaliteli hale gelmesini sağladıkları için teşekkürü bir borç bilirim. Tez İzleme ve Tez Savunma jürilerinde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Sefa TARHAN ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf DOĞAN' a tez savunmamda jüri olarak katılan değerli hocalarım Doç. Dr. Bülent TURAN ve Dr. Öğretim Üyesi Yusuf AVŞAR değerli katkıları için teşekkürlerimi sunuyorum.

Fikirleri ve önerileriyle tezime değer kattıkları ve her zaman beni destekleyerek cesaretlendirerek yol almama yardımcı oldukları için Doç. Dr. Sibel ARSLAN' a, Doç. Dr. Volkan GÖREKE' ye ve Dr. Öğr. Üyesi Emre Öner TARTAN 'a teşekkürü bir borç bilirim. Güç Kalitesi ve harmonikler konusunda çalışma yapmam gerektiğini söyleyen meslektaşım Elektrik Elektronik Mühendisi Ali ÇAŞKURLU 'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim hayatımda bu kademelere kadar gelmemde en önemli görevi üstlenen Sevgili Annem ve aynı zamanda ilkokul öğretmenim Selma YILDIZ'A sonsuz teşekkür ederim. Her zaman bana güvenen beni destekleyen, Sevgili Babam merhum Sırrı YILDIZ 'a verdiğim sözü tuttuğum için çok mutluyum. Canım oğlum Umut ve Sevgili Eşim Tahir'e bu yolda benim motivasyon kaynağım olduğunuz için teşekkür ederim.

Doktoraya başlarken ve doktora sürecinde bana çok yardımcı olan arkadaşlarım Kahraman BOYRAZ 'a ve Gözde KEKE TOP' a teşekkürü borç bilirim. Doktoraya ilk başladığım Fırat Üniversitesinden değerli hocalarım Prof. Dr. Muhsin Tünay GENÇOĞLU, Prof. Dr. Mehmet CEBECİ, Prof. Dr. Mustafa POYRAZ ve Prof. Dr. Hasan KÜRÜM 'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tüm destekleriyle beni cesaretlendiren aileme, hocalarıma ve sevdiklerime teşekkür ederim. Onların sevgisi ve desteği her zaman benim için en büyük motivasyon kaynağı olmuştur.

Şule Nilhan OĞUZALP

TOKAT-2025

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ BOZULMANIN TESPİTİ İÇİN GENLİK VE FREKANS DEĞERLENDİRMESİNE DAYALI OLARAK YENİ YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Oğuzalp, Şule Nilhan

Doktora, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı AKKAYA.

Temmuz 2025, XVI+ 126 Sayfa

Enerji sektöründe rekabetin artması ve kullanıcıların daha kaliteli enerji talep etmesi, elektrik şebekelerinde güç kalitesini öncelikli bir konu haline getirmiştir. Elektrik şebekelerinde kullanılan enerjinin kaliteli olabilmesi için sürekli, belirli bir gerilim seviyesinde sabit frekanslı ve genlikli olması gerekir. Ancak bunlar normalde tam olarak sağlanmaz. Elektrik güç sistemlerinde gerilim-akım karakteristiği doğrusal olmayan elemanlar nedeniyle gerilim ve akım dalga şekli lineerlikten uzaklaşmaktadır. Günümüz modern güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin, güç elektroniği devre elemanlarının ve devrelerinin artmasıyla güç kalitesi problemleri de artmıştır.

Güç kalitesini etkileyen unsurların başında harmonikler gelmektedir. Enerji nakil hatlarında lineer olmayan yükler, doğrultucular, ark fırınları, eviriciler gibi elemanlar harmonik üretirler. Harmoniklerin elektrik güç sistemleri üzerindeki etkileri ise; aşırı ısınmalar, gerilim düşümleri, ek kayıplar, rezonans olayları, dielektrik zorlanmaları, koruma ve kontrol yapan ölçme sistemlerinin hatalı çalışması gibi birçok istenmeyen durum oluşturmaktadır.

Elektrik sisteminde, doğrusal olmayan yüklerin özellikle elektrik ark ocaklarının çalışması nedeniyle, ortak bağlantı noktalarında akım ve gerilim kaynağının tespit edilmesi ve elektrik hatlarına ne kadar bileşen katkısı yapıldığının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle harmoniklerin tespit edilmesi, ölçülmesi, kestirimi ve harmoniklerin bastırılması son derece önemlidir.

Harmoniklerin genlik, frekans ve faz açısından doğru tahmini ve engellenmesi, güç kalitesini ve verimi artırır. Yapay zekâ ve akıllı sistemlerin gelişmesiyle harmoniklerin tahmini için Fourier dönüşümü temelli algoritmaların yanı sıra akıllı yöntemler de kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında harmoniklerin genlik ve faz kestirimi için küçük kareler yöntemi ile birçok meta sezgisel algoritmalarından oluşan hibrit yöntemler denenmiş ve geliştirilmiştir. Harmoniklerin genliği en küçük kareler yöntemiyle hesaplanırken faz açıları birçok optimizasyon algoritması ile tahmin edilmiştir. Önerilen

algoritmalar literatürde önerilen test sinyallerinde ve gerçek veri setinde kullanılarak başarısı test edilmiştir.

Güç sistemlerindeki harmonikler son yıllarda üzerinde sıkça çalışılan bir araştırma alanı olmuştur. Bu tez çalışmasında, literatürdeki harmonikli sinyaller üzerinde PSO (Particle Swarm Optimization) ve Genetik Algoritma ile ilk çalışmalara başlanmış olup, daha sonra birçok optimizasyon yöntemi denenmiştir. EOA (Election Based Optimization), GWO (Grey Wolf Optimizer) ve GOA (Grasshopper Optimization) kullanılarak farklı frekanslarda yöntemler denenmiştir. Sonrasında 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 ile harmonik kestirimleri yapılmıştır. Analizlerde, literatürde sıkça kullanılan birkaç test sinyali üzerinde çalışılmıştır. Bu sinyalin harmonik genlikleri, En Küçük Kareler (Least Squares) yöntemiyle belirlenmiş, faz açıları ise ilgili meta sezgisel algoritmalar kullanılarak tahmin edilmiştir. IEEE 1159.2 Working Group kısmındaki File wave14a.xls gerçek veri seti üzerinde en iyi sonuç veren AO algoritması ile harmonik kestirimi başarı ile sağlanmıştır. Geliştirilen algoritmalar MATLAB yazılımı ortamında denenmiş ve sonuçlar benzer yapılmış çalışmalarla ve geçerlilik analizini yaptığımız tüm algoritmalarla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, incelenen tüm yöntem tahminleri gürültüsüz ve gürültülü koşullarda bile doğru ve güvenilir harmonik tespiti yapıldığını göstermiştir.

Harmoniklerin tespitinde, Aquila Optimizasyon algoritması ile En Küçük yönteminin entegre kullanımı, en doğru ve tutarlı sonuçları sağlamıştır. Önerilen AO-LS yöntemi, farklı test veri setleri üzerinde uygulanarak geçerliliği kanıtlanmıştır. Ayrıca, AO-LS yönteminin Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing- SA) algoritması ile hibrit bir şekilde birleştirilmesiyle, harmonik tespit performansının daha da iyileştirildiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen hibrit yöntem (SALSAO), sadece harmonik bozunumlarının tespitinde değil, aynı zamanda güç sistemlerindeki diğer bozunum türlerinin analizinde de test edilmiş başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yöntemin performansı hem sentetik test verileri hem de gerçek veriler üzerinde değerlendirilmiş ve gürültülü ve gürültüsüz koşullarda dahi yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, SALSAO algoritmasının güç kalitesi problemlerinin çözümünde etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Benzetilmiş Tavlama Algoritması, En Küçük Kareler Yöntemi, Güç kalitesi, Güç sistemlerindeki bozunumlar, Harmonik, Kaya Kartalı Optimizasyonu, Meta sezgisel Yöntemler

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF NEW METHODS FOR DETECTION OF DISTURBANCE IN POWER SYSTEMS BASED ON AMPLITUDE AND FREQUENCY EVALUATION

Oğuzalp, Şule Nilhan

Ph. D. Thesis, Department of Mechatronics Engineering

Advisor: Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU

July 2025, XVI + 126 pages

Increasing competition in the energy sector and users' demand for better quality energy have made power quality a priority issue in electrical networks. It is necessary that the energy used in electrical networks to be of high quality, it must be continuous, at a certain voltage level, with a fixed frequency and amplitude. However, these are not normally provided in full. In electrical power systems, voltage and current waveforms deviate from linearity due to non-linear elements in the voltage-current characteristic. Power quality problems have also increased with the increase in nonlinear loads, power electronic circuit elements and circuits in today's modern power systems.

Harmonics are one of the main factors affecting power quality. Elements such as nonlinear loads, rectifiers, arc furnaces and inverters in power transmission lines produce harmonics. The effects of harmonics on electrical power systems are It creates many undesirable situations such as overheating, voltage drops, additional losses, resonance events, dielectric stress, malfunction of protection and control measurement systems.

In electrical systems, due to the operation of non-linear loads, especially Electric Arc Furnaces, it is of great importance to detect the current and voltage source at common connection points and to determine how many components are contributed to the electrical lines. Therefore, detecting, measuring, estimating and suppressing harmonics is extremely important.

Accurate prediction and prevention of harmonics in terms of amplitude, frequency and phase improves power quality and efficiency. With the development of artificial intelligence and smart systems, smart methods as well as Fourier transform-based algorithms are used for the estimation of harmonics. In this thesis study, hybrid methods consisting of the least squares method and many meta-heuristic algorithms have been tried and developed for the amplitude and phase estimation of harmonics. While the amplitude of harmonics was calculated by the least squares method, phase angles were estimated by many optimization algorithms. The success of the proposed algorithms has been tested using the test signals suggested in the literature and the real data set.

Harmonics in powers have been a frequently studied research area in recent years. This thesis study started with the first screening using PSO and Genetic Algorithm on harmonic signals in the literature, and then many versatile methods were tried. Methods have been tried at different frequencies using EOA (Election Based Optimization), GWO

(Grey Wolf Optimizer) and GOA (Grasshopper Optimization). Afterwards, harmonic estimations were made with AVOA (African Vulture Optimization Algorithm), ARO (Artificial Rabbit Optimization), SWO (Spider Wasp Optimization), MGO (Mountain Gazelle Optimization) and AO (Aquila Optimization) algorithms developed in recent years. In the analyses, several synthetic data samples frequently used in the literature were studied. The harmonic amplitudes of this signal were determined by the Least Squares (LS) method, and the phase angles were estimated using the relevant metaheuristic algorithms. Harmonic estimation has been successfully achieved with the AO algorithm and other metaheuristic algorithms, which give the best results in the synthetic data sample on the real data set File wave14a.xls in the IEEE 1159.2 Working Group. The developed algorithms were tested in the MATLAB software environment and the results were discussed by comparing them in many error metrics with similar studies and all the algorithms that we made validity analysis for. The results obtained showed that all method estimates examined provided accurate and reliable harmonic detection even in noiseless and noisy conditions.

In the detection of harmonics, the hybrid use of the AO algorithm and the LS method provided the most accurate and consistent results. The proposed AO-LS method has been validated by applying it on different test data sets. In addition, it has been observed that the harmonic detection performance is further improved with the SALSAO (SA-LS-AO) method, which is obtained by combining the AO-LS method with the Simulated Annealing (SA) algorithm in a hybrid way.

The hybrid method SALSAO proposed in this thesis was first tested in the detection of harmonic distortions, and after obtaining good results, it was also tested in the analysis of other types of distortions in power systems and successful results were obtained. The performance of the method was evaluated on both synthetic test data and real data and it was found that it provides high accuracy and reliability even in noisy and noiseless conditions. The findings revealed that the SALSAO algorithm is an effective approach in solving power quality problems.

Keywords: Simulated Annealing Algorithm, Least Squares Method, Power quality, Disturbances in power systems, Harmonics, Golden Eagle Optimization, Meta heuristic methods

İÇİNDEKİLER

ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	10
2.1. Güç Kalitesi Tanımı ve Kriterleri	10
2.1.1. Geçici olaylar	15
2.2. Kısa Süreli Değişimler	16
2.2.1. Kesinti	16
2.2.2. Azalma ve salınma	17
2.2.3. Artma	17
2.3. Uzun Süreli Değişimler	18
2.3.1. Gerilim yükselmesi	18
2.3.2. Gerilim düşmesi	19
2.3.3. Sürekli kesinti	19
2.4. Gerilim Dengesizliği	19
2.5. Dalga Biçimi Bozulmaları	20
2.5.1. DC ofset	20
2.5.2. Harmonikler	20
2.5.3. Ara harmonikler	21
2.5.4. Çentik.....	21
2.5.5. Gürültü	22
2.6. Gerilim Dalgalanmaları	22
2.7. Güç Frekansı Değişimleri	23
3. MATERYAL-METHOD	24

3.1.	Materyal	24
3.1.1.	Sentetik harmonikli veri örneği	24
3.1.2.	Sentetik yüksek genlikli harmoniklere sahip veri örneği.....	26
3.1.3.	Kamuya açık gerçek veri örneği	29
3.1.4.	Deneyssel olarak üretilmiş güç kalite bozunumu örnekleri	29
3.2.	Metot.....	30
3.2.1.	En küçük kareler yöntemi	30
3.2.2.	Maliyet fonksiyonları ve hata bulma yöntemleri.....	32
3.3.	Harmonik Tahmini.....	34
3.4.	PSO-PC Algoritması ile Harmonik Tahmini	36
3.4.1.	Tamsayı harmoniklerin tahmini.....	38
3.4.2.	Tümleşik harmonik analizi	39
3.4.3.	Tek frekanslı tahmini	40
4.	META SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ.....	41
4.1.	Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması (AVOA)	43
4.1.1.	En iyi Akbaba seçimi	44
4.1.2.	Akbabaların açlık oranı.....	44
4.1.3.	Keşif aşaması	46
4.1.4.	Sömürü aşaması	46
4.2.	Dağ Ceylanı Optimizasyonu (MGO).....	49
4.2.1.	Bölgesel bekar erkekler	50
4.2.2.	Doğum sürüleri	50
4.2.3.	Bekar erkek sürüleri.....	50
4.2.4.	Yiyecek aramaya geçiş	51
4.3.	Yapay Tavşan Optimizasyon Algoritması (ARO).....	51
4.3.1.	Başlatma aşaması	52
4.3.2.	Dolambaçlı yiyecek arama.....	52
4.3.3.	Rastgele saklanma.....	53
4.3.4.	Enerji küçültme	55
4.4.	Örümcek Eşekarısı Optimizasyonu (SWO).....	55
4.4.1.	Kavramsal temeller	56
4.4.2.	Matematiksel model.....	57
4.5.	Kaya Kartalı Optimizasyon Algoritması (AO).....	57

4.5.1.	Başlatma.....	58
4.5.2.	Genişletilmiş keşif	59
4.5.3.	Daraltılmış keşif.....	59
4.5.4.	Genişletilmiş sömürü	60
4.5.5.	Daraltılmış sömürü	61
4.6.	Benzetilmiş Tavlama Algoritması (SA)	61
5.	ÖNERİLEN HİBRİT YÖNTEM SALSAO	65
5.1.	Matematiksel Model:	65
5.2.	Veri Ön İşleme ve Harmonik Tespiti.....	68
5.3.	Hibrit Optimizasyon Yaklaşımı	68
5.4.	Benzetimli Tavlama Entegrasyonu	69
5.5.	Fitness Fonksiyonu ve Sinyal Yeniden Oluşturma.....	69
5.6.	Performans Değerlendirmesi	69
5.7.	Parametre Optimizasyonu.....	70
5.8.	Güç Bozunumlarının Tespiti İçin Önerilen Hibrit Yöntemin Sözde Kodu	70
6.	SONUÇLAR.....	76
6.1.	Sentetik Harmonikli Veri Örneğine Ait Sonuçlar.....	76
6.2.	MGO ile Temel Frekans ve Katlarında Harmonik Kestirimine Ait Sonuçlar	92
6.3.	SWO ile Simüle Edilmiş LED Lamba Verisine Ait Sonuçlar	96
6.4.	Gerçek Sinyalde AO ile Harmonik Kestirimine Ait Sonuçlar.....	98
6.5.	Deneysel Olarak Üretilmiş Güç Kalite Bozunumu Örneklerine Ait Sonuçlar ...	100
7.	ÖNERİLER.....	120
	KAYNAKLAR	122
	ÖZGEÇMİŞ	126

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Elektrik güç kalitesini belirleyen olayların kategorileri (IEEE,2019).....	14
Tablo 3.2. Farklı harmoniklerin kestiriminde kullanılan MGO için parametreler	27
Tablo 3.3. Farklı ara harmoniklerin tespitinde SWO için kullanılan parametreler	28
Tablo 3.4. Harmonikli gerçek sinyalin AO ile kestirim parametreleri	29
Tablo 3.5. Deneysel olarak üretilmiş güç kalitesi bozunum örneklerine ait model eşitliği ve parametreleri (Akkaya, S. (2023-a))	29
Tablo 5.1. Klasik ve SA destekli yöntemlerde Beklenen Avantajlar	67
Tablo 6.1. Sentetikli harmonikli veri örneğindeki harmoniklerin tahmini için kullanılan algoritma hatalarının karşılaştırılması (Oğuzalp ve ark., 2025)	82
Tablo 6.2. Sentetikli veri seti için klasik GOA ve SA-LS- GOA sonuçları	83
Tablo 6.3. Sentetikli veri seti için klasik GOA ve SA-LS- GOA ortalama sonuçları	84
Tablo 6.4. Sentetikli veri seti için klasik MPA ve SA-MPA sonuçları	84
Tablo 6.5. Sentetikli veri seti için klasik ALO ve SA-ALO sonuçları	86
Tablo 6.6. Sentetikli veri seti için klasik ALO ve SA-ALO karşılaştırmalı analiz	86
Tablo 6.7. Sentetikli veri seti için klasik SWO ve SA-SWO sonuçları.....	87
Tablo 6.8. Sentetikli veri seti için klasik SWO ve SA-SWO karşılaştırmalı analiz	87
Tablo 6.9. Sentetikli harmonikli veride önerilen yöntemin sonuçları	88
Tablo 6.10. Sentetikli veri seti için Klasik AO ve SALS AO performans değerlendirmesi	91
Tablo 6.11. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi.....	933
Tablo 6.12. MGO ile 1.durumda harmonik kestirimi analizi	93
Tablo 6.13. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi.....	95
Tablo 6.14. MGO ile 2.durumda harmonik kestirimi analizi	96
Tablo 6.15. SWO ile temel frekans, ara harmonik ve üst harmoniklerde harmonik kestirimi	97
Tablo 6.16. Kamuya açık gerçek veride klasik AO ve SALS AO sonuçları.....	98
Tablo 6.17. Kamuya açık gerçek veri setinde AO ve SALS AO ile harmonik kestirimi	99
Tablo 6.18. Saf sinyal S1 için sonuçlar;	100
Tablo 6.19. Gerilim düşmesi S2 için sonuçlar;.....	100
Tablo 6.20. Gerilim yükselmesi S3 için sonuçlar;.....	101

Tablo 6.21. Kesinti S4 için sonuçlar;.....	101
Tablo 6.22. Kırpışma S5 için sonuçlar;	101
Tablo 6.23. Geçici olaylar S6 için sonuçlar;.....	101
Tablo 6.24. Harmonikler S7 için sonuçlar;.....	101
Tablo 6.25. Çentik S8 için sonuçlar;.....	102
Tablo 6.26. Ani darbe S9 için sonuçlar;	102
Tablo 6.27. Gerilim düşmesi+ Harmonik S10 için sonuçlar	102
Tablo 6.28. Gerilim Yükselmesi + Harmonik S11 için sonuçlar;	102
Tablo 6.29. Kesinti + Harmonik S12 için sonuçlar;	102
Tablo 6.30. Kırpışma + Harmonik S13 için sonuçlar;.....	103
Tablo 6.31. Gerilim Düşmesi + Harmonik S14 için sonuçlar;	103
Tablo 6.32. Gerilim Yükselmesi + Harmonikler S15 için sonuçlar;	103
Tablo 6.33. En iyi üç sınıf SNR 40 dB için karşılaştırma	119

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Güç sistemlerinde meydana gelen geçici olay (Bütün,2021)	15
Şekil 2.2. Kısa süreli değişimler Gerilim Yükselmesi (Voltage Swell)	16
Şekil 2.3. Geçici olarak meydana gelen kesinti (Bütün,2021).....	16
Şekil 2.4. Gerilim azalması ve salınması (Bütün,2021)	17
Şekil 2.5. Gerilim artışı.....	18
Şekil 2.6. Harmonikli sinyal	20
Şekil 2.7. Ara harmonikli sinyal	21
Şekil 2.8. Çalışmamızda kullandığımız çentik veri setine ait grafikler	21
Şekil 2.9. İlk veri setimize ait 10 dB gürültülü AO algoritması ile harmonik kestirimi. 22	
Şekil 3.1. Basit güç sistemi: yükü besleyen altı darbeli tam dalga köprü doğrultucuya sahip iki veri yolu mimarisi	24
Şekil 3.2. Sentetik harmonikli veri örneği sinyalinin dalga biçimi	25
Şekil 3.3. Sentetik harmonikli veriye ait FFT tabanlı Genlik spektrumu	25
Şekil 4.1. Meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması.....	42
Şekil 6.1. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (MGO)	77
Şekil 6.2. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri	78
Şekil 6.3. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (SWO)	79
Şekil 6.4. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (ARO)	80
Şekil 6.5. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (AO)	81
Şekil 6.6. Sentetikli veri setinde klasik MPA ve SA-MPA zaman domeni karşılaştırması	85
Şekil 6.7. Sentetikli veri setine ait klasik MPA ve SA-MPA gürültülü sinyal spektrumu	85
Şekil 6.8. Sentetikli veri setinde klasik ALO ve SA-ALO zaman domeni karşılaştırması	87

Şekil 6.9. Sentetikli veri setinde klasik SWO ve SA- SWO zaman domenini karşılaştırması	88
Şekil 6.10. Sentetikli veri için Klasik AO ve SALSAO yöntemlerinin karşılaştırılması	89
Şekil 6.11. Sentetikli veri için Klasik AO ve SALSAO yöntemlerine ait grafikler	90
Şekil 6.12. Sentetikli veride Klasik AO ve SALSAO yöntemlerinin karşılaştırma grafikleri.....	91
Şekil 6.13. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi (popülasyon size=50)	94
Şekil 6.14. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi (popülasyon size=100).....	95
Şekil 6.15. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirim	96
Şekil 6.16. SWO ile farklı frekanslarda simüle edilmiş ledin harmonik kestirimi	98
Şekil 6.17. Kamuya açık gerçek veri setinde AO algoritması ile harmonik kestirimi ...	99
Şekil 6.18. S1 saf sinyal 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri	104
Şekil 6.19. S2 Gerilim düşmesi 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	105
Şekil 6.20. S3 Gerilim yükselmesi 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	106
Şekil 6.21. S4 Kesinti 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	107
Şekil 6.22. S5 Kırpışma 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri	108
Şekil 6.23. S6 Geçici olaylar 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	109
Şekil 6.24. S7 Harmonikler 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	110
Şekil 6.25. S8 Çentik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	111
Şekil 6.26. S9 Ani darbe 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri	112
Şekil 6.27. S10 Gerilim düşmesi + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri	113
Şekil 6.28. S11 Gerilim yükselmesi + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	114
Şekil 6.29. S12 Kesinti + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri	115
Şekil 6.30. S13 Kırpışma + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri ..	116
Şekil 6.31. S14 Gerilim düşmesi + Geçici olay 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	117
Şekil 6.32. S15 Gerilim yükselmesi + Geçici olay 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri.....	118

KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
PSO	Particle Swarm Optimization
EOA	Election-based Optimization Algorithm
GWO	Grey Wolf Optimizer
GOA	Grasshopper Optimization Algorithm
AVOA	African Vulture Optimization Algorithm
ARO	Artificial Rabbit Optimization
SWO	Spider Wasp Optimization
MGO	Mountain Gazelle Optimization
AO	Aquila Optimization
LS	En Küçük Kareler (Least Squares)
SA	Benzetimli Tavlama
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
PSOPC	Passif Congregation ile Parçacık Sürüsü
GA	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
BFO	Bakteri Foraging Optimizasyonu
ABC	Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony)
MABC	Modifiye Yapay Arı Kolonisi (Modified Artificial Bee Colony)
WLS-MVO	Hibrit Ağırlıklı En Küçük Kareler Çok Yönlü Optimize Edici
AOA	Arşimet Optimizasyon Algoritması
RLS	Yinelemeli En Küçük Kareler (Recursive Least Squares)
YZ	Yapay Zekâ
YSA	Yapay Sinir Ağları
DD	Dalgacık Dönüşümü
SDD	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
AHD	Ayrık Haar Dönüşümü
CZT	Chirp-z dönüşümü
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)

RMSE	Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error)
AWGN	Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültüsü
SALSAO	Benzetimli Tavlama- En Küçük Kareler- Kaya Kartalı Optimizasyonu Hibrit Yöntemi
THD	Toplam Harmonik Bozunum (Total Harmonic Distortion)
EMI	Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference)
VSI	Gerilim Kaynaklı Evirici (Voltage Source Inverter)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
DSP	Dijital Sinyal İşlemci (Digital Signal Processor)
FPGA	Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi
GUI	Grafik Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface)

1. GİRİŞ

Günümüzde, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve tüketimi süreçlerinde güç kalitesi giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması ve güç elektroniği tabanlı sistemlerin artmasıyla birlikte, şebekelerde harmonik ve ara-harmonik gibi bozucu unsurlar da artış göstermektedir. Bu durum, enerji sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliği üzerinde önemli sorunlara yol açabilmektedir. Elektrik enerjisinin, üretildiği andan tüketildiği ana kadar kontrol altında tutulması ve kalitesinin sağlanması, günümüz teknolojilerinin sorunsuz çalışması için kritik bir gerekliliktir.

Elektrik enerjisi, insanlığın teknolojik, ekonomik ve sosyal gelişiminde merkezi bir rol oynamaktadır. Modern dünyada, üretim tesislerinden evsel kullanıma kadar her alanda ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi, yaşam kalitesinin artmasında vazgeçilmez bir kaynak haline gelmiştir. Bununla birlikte, enerjiye olan talebin sürekli artması ve enerji sistemlerinin daha karmaşık bir yapıya bürünmesi, güç kalitesinin sağlanmasını giderek daha zor bir hale getirmiştir (Meltem, 2020; Apay, 2008).

Elektrik güç sistemleri, enerji üretiminden son kullanıcıya kadar olan süreçte birçok bileşeni içermekte ve her bir bileşen, sistemin genel performansı üzerinde kritik bir etkiye sahip olmaktadır (Germeç, 2015). Bu süreçte ortaya çıkan güç kalitesi sorunları, yalnızca sistemin verimliliğini değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliği de doğrudan etkilemektedir. Örneğin, endüstriyel tesislerde güç kalitesi sorunları nedeniyle meydana gelen enerji kayıpları ve ekipman arızaları hem üretim sürecini aksatmakta hem de işletme maliyetlerini artırmaktadır (Bollen, 2000).

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.

Elektrik enerjisi sistemlerinde enerji kalitesini olumsuz etkileyen yüklerin ve enerji kaynaklarının doğrusal olmayan yapılarından kaynaklanan harmonik bozulmalar, elektrik sistemlerinde enerji kayıpları, ekipman ömrünün azalması ve sistem performansında ciddi düşüklere yol açabilir. Bu nedenle, harmoniklerin etkili bir şekilde tespiti ve analizi, enerji sistemlerinin sürekli ve verimli çalışması için kritik bir öneme sahiptir.

Harmoniklerin neden olduğu sorunlar, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekelerine entegrasyonu ile daha karmaşık bir hal almıştır. Günümüzde, fotovoltaik paneller ve rüzgâr türbinleri gibi dağıtık enerji kaynaklarının yaygın kullanımı, geleneksel enerji sistemlerinin ötesinde yeni analiz ve kontrol yaklaşımlarını gerekli kılmaktadır. Bu sistemlerdeki harmonik bozulmaların özellikle çok sayıda çevirici ve dönüştürücü cihazlarından kaynaklandığı bilinmektedir.

Literatürde, harmoniklerin tespiti ve analizi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Fourier transformasyonu, dalgacık analizi ve yapay zekâ tabanlı yöntemler gibi çeşitli teknikler, harmoniklerin belirlenmesi ve etkilerinin analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak bu yöntemlerin, karmaşık yapıdaki şebekeler için zaman zaman yetersiz kaldığı görülmüştür. Mevcut yöntemlerin çoğu, hesaplama yükü ve özellikle hızlı değişen şartlara uyum sağlama açısından belirli sınırlılıklara sahiptir.

Güç kalitesini etkileyen faktörler arasında harmonik bozulmalar, gerilim dengesizlikleri, geçici olaylar ve frekans sapmaları yer almaktadır. Özellikle harmonik bozulmalar, doğrusal olmayan yüklerin yaygınlaşmasıyla birlikte modern enerji sistemlerinde en yaygın karşılaşılan problemlerden biri haline gelmiştir. Harmonikler, enerji sistemlerinde ekipman ömrünü kısaltmakta, enerji kayıplarına neden olmakta ve sistemin genel performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Smith, 2013).

Bu bağlamda, güç sistemlerindeki harmoniklerin ve ara harmoniklerin doğru bir şekilde tespit edilmesi ve analiz edilmesi büyük önem taşır. Bu bileşenlerin neden olduğu sorunların belirlenmesi, bu sorunların önüne geçilmesi ve güç sistemlerinin daha verimli hale getirilmesi için gereklidir. Harmoniklerin neden olduğu sorunlar arasında,

ekipmanlarda aşırı ısınma, yalıtım malzemelerinde bozulma, kontrol sistemlerinde hatalar ve yanlış ölçümler sayılabilir. Özellikle doğrusal olmayan yüklerin artmasıyla birlikte harmoniklerin etkileri daha da belirginleşmektedir. Bu nedenle, harmoniklerin kaynağının ve etkilerinin belirlenmesi, güç kalitesini iyileştirmek için temel bir adımdır. Elektrik enerjisi, günümüzde en temel ihtiyaçlardan biri olup, üretiminden tüketimine kadar her aşamasında kalite ve güvenilirlik gerektirmektedir. Bu bağlamda, güç kalitesi kavramı giderek önem kazanmakta, özellikle harmonik ve ara harmonik bozulmalar, enerji sistemlerinin verimliliği ve güvenilirliği açısından önemli sorunlar teşkil etmektedir. Bu nedenle, harmoniklerin doğru bir şekilde ölçülmesi, modellenmesi, kestirimi ve bastırılması büyük önem arz etmektedir.

Literatürdeki çalışmalar genellikle harmoniklerin ölçülmesi, modellenmesi, kestirimi ve etkilerinin analizi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalarda, sistemdeki akım veya gerilim işaretleri örneklenerek, içerdikleri genlik, frekans ve faz gibi bileşenlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

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 ve McQuilkin, 1990; Jain ve Singh, 2011).

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 ve ark., 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 çit etkisi gibi etkiler nedeniyle pratik uygulamalarda sınırlamalar gösterebilmektedir (Bettayeb ve Qidwai, 2003). Bu sınırlamaların aşılması amacıyla, Kalman filtresi gibi sinyal işleme teknikleri ve optimizasyon algoritmalarını birleştiren yöntemler geliştirilmiştir. Ancak, bu yaklaşımlar genellikle sinyal özelliklerine dair geniş bir ön bilgi gerektirir ve yüksek hesaplama yükü oluşturur (Costa ve ark., 2007).

Meta sezgisel optimizasyon yöntemleri, harmonik tespiti alanında geleneksel tekniklerin sınırlarını aşarak güçlü bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Genetik Algoritma, Parçacık Sürüşü Optimizasyonu ve Yapay Arı Kolonisi gibi algoritmalar, yüksek doğruluk ve hesaplama verimliliği sunma potansiyeline sahiptir. Ancak bu yöntemler, erken yakınsama ve yerel minimumlara duyarlılık gibi sorunlarla sınırlanabilmektedir (Shi ve Eberhart, 1998).

Daha yeni yaklaşımlar arasında Afrika Akbaba Optimizasyon Algoritması, Arşimet Optimizasyon Algoritması ve PSOPC gibi hibrit teknikler bulunmaktadır. Bu algoritmalar, harmonik tahmini doğruluğunu artırmak için etkili araçlar olarak öne çıkmıştır. En Küçük Kareler yöntemi gibi geleneksel tekniklerle entegrasyonları, tahmin doğruluğu ve hesaplama verimliliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Ali ve diğerleri, 2023).

Sonuç olarak, güç sistemlerindeki harmoniklerin doğru tespiti, enerji kalitesinin artırılması ve sistem stabilitesinin korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu tez çalışmasında, farklı harmonik tahmin yöntemlerinin doğruluk ve etkinlik açısından değerlendirilmesini ve en etkili yöntemin tespit edilip geliştirilmesini amaç edinmiştir. En etkili yöntemi daha etkili kılmak için yeni bir hibrit yöntem önermek ve bu yöntemin enerji kalitesine katkılarını ele almayı amaçlamaktadır.

Harmonik sinyallerin genlik tahmini genellikle doğrusaldır ve geleneksel En Küçük Kareler 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 tabanlı LS yöntemi (GA-LS) dikkat çekmektedir. Bettayeb ve 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, ZL., 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 PSOPC, genlik tahmini için ise LS yöntemi kullanılmıştır. Bu hibrit yöntem, özellikle düşük hesaplama maliyetleri ile dikkat çekmektedir.

Diğer bir çalışmada, Biswas ve ark., (2013), Yapay Arı Kolonisi 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 Kabalcı, Koçkanat ve Kabalcı (2018), Modifiye ABC (MABC) algoritmasını tanıtarak algoritmanın performansını önemli ölçüde artırmıştır.

Daha yakın zamanda, Haseb ve diğerleri (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 ve diğerkleri (2021), Arşimet Optimizasyon Algoritması 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 da 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.

Harmonik analizi için kullanılan geleneksel yöntemler, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD), Ayırık Fourier Dönüşümü (AFD), ve Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) gibi frekans tabanlı tekniklerdir. HFD, spektral analizi gerçekleştirmede yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmasına rağmen, spektral sızıntı ve örtüşme gibi sorunlara neden olabilir. Ayrıca, HFD' nin zaman bilgisi kaybolduğu için geçici olayları algılamada yetersiz kaldığı belirtilmiştir. AFD ise daha az hesaplama karmaşıklığı ile spektrum analizi yapabilse de bazı durumlarda yetersiz kalabilir. Bu nedenle, daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için farklı yöntemler aranmaktadır.

Parametrik yöntemler, sinyali matematiksel bir modelle ifade etmeyi amaçlar ve bu modeller üzerinden parametreleri tahmin etmeye çalışırlar. Bu kapsamda Prony yöntemi, ESPRIT algoritması, Çoklu İşaret Sınıflandırması (MUSIC) gibi algoritmalar öne çıkmaktadır. Prony yöntemi, sinyal bozulmalarının frekanslarını tahmin etmede etkili olurken, ESPRIT algoritması doğru frekans kestirimi yapabilmekte fakat sayısal kararlılık sorunları yaşayabilmektedir. (Yalçın, N.A., 2021)

Adaptif filtreleme yöntemleri ise, sinyali analiz ederken gürültü ve diğer bozucuları azaltmayı amaçlar. Bu alanda Kalman filtresi, En Küçük Ortalama Kare (EKK) yöntemi, Normalleştirilmiş En Küçük Ortalama Kare (NEKK) yöntemi ve Sızdıran En Küçük Ortalama Kare (Sızdıran-EKK) yöntemi gibi algoritmalar kullanılmaktadır.

Kalman filtresi gürültüye karşı dayanıklı olsa da gürültü ve süreç hakkında ön bilgiye ihtiyaç duyar. EKK, NEKK ve Sızdıran-EKK yöntemleri ise adaptif filtreleme yoluyla işaretin parametrelerini tahmin etmeyi amaçlar.

Yapay Zekâ (YZ) tabanlı yöntemler, özellikle Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Sürü Zekâsı algoritmaları, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerin analizinde giderek artan bir ilgi görmektedir. YSA'lar, özellikle harmoniklerin kestirimi için etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak YSA'ların eğitim zamanı gerektirmesi ve uygun parametrelerin seçilmesi zorunluluğu bazı dezavantajlar oluşturmaktadır. Sürü zekâsı algoritmaları ise, özellikle Yapay Arı Kolonisi algoritması, optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar vermektedir.

Hibrit yöntemler, yukarıda bahsedilen geleneksel, parametrik, adaptif ve YZ tabanlı yaklaşımların güçlü yönlerini bir araya getirerek daha etkin çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Örneğin, Dalgacık Dönüşümü (DD) ve Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) yöntemlerine dayalı işaret parametresi tahmin yöntemleri, harmonikleri ve ara-harmonikleri belirleyebilmektedir.

Yine Ayırık Haar Dönüşümü (AHD) ile Prony yönteminin birleştirilmesiyle daha iyi sonuçlar elde edilebileceği öne sürülmüştür. Son yıllarda, işaret parametrelerinin kestirimi alanında, Ayırık Haar Dönüşümü gibi farklı yaklaşımlar da dikkat çekmektedir. AHD, işaretin toplam ve farklarını kullanarak daha az işlem adımıyla sonuca ulaşmayı sağlamaktadır. Bu dönüşüm, özellikle Prony yöntemi gibi diğer yöntemlerle birleştirilerek daha etkili sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca, Chirp-z dönüşümü (CZT) tabanlı senkronizasyon yöntemlerinde literatürde yer almaktadır. (Yalçın, 2021)

Literatürdeki bu çalışmaların genel amacı, güç sistemlerindeki harmonik ve ara harmonik bozulmaları tespit etmek, bu bozulmaların neden olduğu sorunları analiz etmek ve daha güvenilir, verimli ve kaliteli bir enerji sistemi oluşturmaktır. Bu kapsamda hem geleneksel yöntemlerin iyileştirilmesi hem de yeni yöntemlerin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Harmonik tespiti için kullanılan mevcut algoritmalar doğruluk ve hız açısından çeşitli sınırlamalara sahiptir. Bu durum, güç sistemlerinde daha etkili ve verimli algoritmaların geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında, kullanılan algoritmalar, ilk olarak harmoniklerin daha hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Önerilen yöntemlerin karmaşık şartlar altında bile etkili çalışabilirliği üzerine odaklanılmıştır. Ayrıca önerilen hibrit yöntemin güçlü yanlarını ortaya koymak için güç sistemlerindeki farklı bozunumlar

içinde denenmiştir. Alınan sonuçlar önerilen yöntemin güç sistemlerindeki farklı bozunumlarda dahi en iyi tahminleri en kısa sürede vermesi sebebiyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, güç sistemlerindeki bozunumlar ve özellikle harmonik tespiti için gelişmiş meta sezgisel algoritmaların tasarımı uygulanması ve performans analizleri ele alınmaktadır. Güç sistemlerindeki bozunumların güç kalitesine olumsuz etkileri göz önüne alındığında, önerilen hibrit yöntemle bu problemin çözümü gerçekleştirilmiş olacaktır. Çalışma kapsamında, farklı meta sezgisel algoritmalar karşılaştırılacak, bunların doğruluk, hız ve uygulanabilirlik performansları analiz edilecektir.

Tez çalışmasında, ilk olarak harmonik ve ara-harmonik bileşenlerinin genlik, frekans ve faz değerlerini doğru bir şekilde tespit edebilecek yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bu amaçla, literatürde mevcut olan genlik tahmini için En Küçük Kareler yöntemi ve frekans tahmini içinde; PSO, EOA, GOA, ALO, AO, AVOA, ARO, CSA, MPA, SWO ve MGO optimizasyon yöntemleri incelenecek ve bu yöntemlerin zayıf ve güçlü yönleri belirlenecektir. Bu tez çalışmasında, daha önce kullanılan optimizasyon yöntemlerinden daha hızlı, doğru ve güvenilir sonuçlar verebilecek bir metodoloji sunulacaktır. Harmoniklerin genliklerinin tespitinde EKK yöntemini, frekanslarının tahmininde ise; çalışmamızda en iyi yöntem olarak tespit edilen AO algoritması, Benzetimli Tavlama yöntemi ile hibrit olarak kullanılmış ve en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca geliştirilen SALSAO yönteminin farklı harmonikli sinyallerde kullanılabilirliği gösterilmeye çalışılmıştır.

Tez çalışmasının temel hedefleri şunlardır:

- Güç sistemlerindeki bozunumların tespiti için hibrit bir kestirim yöntemi geliştirmek.
- Önerilen hibrit yöntemin güç sistemlerindeki farklı gürültülerle performansını değerlendirmek.
- Gürültülü ortamlarda ve farklı sinyal türlerinde yöntemlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmek.
- Gerçek saha verisi üzerinde harmonik kestirimi yaparak önerilen yöntemin doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmek.

- Literatürdeki farklı güç bozunumlarında denenerek literatürdeki yöntemlerden daha güçlü hibrit yöntem önermek.
- Güç sistemlerindeki bozunumların ve özellikle harmoniklerin etkili şekilde tespiti için yeni bir hibrit algoritma gerçekleştirmek.
- Mevcut yöntemlerle karşılaştırmalı performans analizi yapmak.
- Algoritmanın güç kalitesi üzerindeki olumlu etkilerini değerlendirmek.

Bu tez çalışması ile literatüre, güç sistemlerindeki bozunumları tespit edecek yeni bir bakış açısı kazandırılması, güç sistemlerinin daha güvenli ve verimli bir şekilde işletilmesine katkı sağlanması ve farklı mühendislik disiplinlerindeki uygulamalara yeni imkanlar sunulması beklenmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Güç Kalitesi Tanımı ve Kriterleri

Güç kalitesi, genel olarak gerilimin sürekli, sabit frekanslı ve dalga şeklinin sinüzoidal olması olarak tanımlanır. İdeal bir güç sisteminde, gerilim ve akım dalgalarının sinüs şeklinde olması beklenir. Ancak, çeşitli nedenlerle bu ideal durumdan sapmalar meydana gelebilir. Bu sapmalar, güç kalitesi problemlerine yol açarak, sistemdeki cihazların performansını olumsuz etkileyebilir. Güç kalitesini etkileyen temel kriterler şunlardır:

- Enerjinin Sürekliliği: Elektrik enerjisinin sürekli olarak sağlanması, herhangi bir kesinti olmamasıdır.
- Gerilim ve Frekansın Sabitliği: Gerilim ve frekans değerlerinin anma değerlerinde sabit kalması gerekmektedir.
- Sinüzoidal Dalga Şekli: Gerilim ve akım dalgalarının ideal sinüs şekline yakın olması arzu edilir.
- Güç Faktörünün Bire Yakınlığı: Güç faktörünün bire yakın olması, sistemin verimli çalışması için önemlidir.
- Faz Gerilimlerinin Dengeli Olması: Üç fazlı sistemlerde, faz gerilimlerinin dengeli olması gerekmektedir.
- Harmoniklerin Sınırlandırılması: Akım ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belirli değerlerde tutulması gerekmektedir.

Güç kalitesi problemleri, yukarıda belirtilen kriterlerde meydana gelen sapmalardan kaynaklanır ve birçok farklı şekilde ortaya çıkabilir. Başlıca güç kalitesi sorunları şunlardır:

- Gerilim Dalgalanmaları: Gerilim genliğinde meydana gelen ani değişiklikler, kesintiler, gerilim darbeleri ve titreşimler (flicker) gibi sorunlardır.
- Frekans Değişimleri: Şebeke frekansının anma değerinden sapmasıdır.
- Harmonikler: Gerilim ve akım dalgalarının sinüs şeklinden sapmasına neden olan ve temel frekansın katları olan bileşenlerdir.
- Gerilim Dengesizliği: Üç fazlı sistemlerde, faz gerilimlerinin eşit olmaması durumudur.

- Geçici Olaylar (Transientler): Yıldırım düşmesi, anahtarlama olayları veya ani yük değişimleri gibi nedenlerle meydana gelen kısa süreli gerilim bozulmalarıdır.
- Kısa Süreli Gerilim Değişimleri: Gerilimde meydana gelen ani düşüşler (çökme) veya yükselmelerdir.
- Düşük Gerilim: Gerilimin belirli bir süre boyunca %10'dan fazla azalmasıdır.
- Sürekli Kesintiler: Gerilimin uzun süre boyunca (1 dakikadan fazla) kesilmesi durumudur.

Güç kalitesi problemleri, çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. Bu nedenlerden bazıları şunlardır:

- Doğrusal Olmayan Yükler: Ark fırınları, deşarj lambaları, güç elektroniği cihazları gibi doğrusal olmayan yükler, şebekeden sinüzoidal olmayan akımlar çeker ve bu da gerilim dalga şeklinin bozulmasına neden olur.
- Ani Yük Değişimleri: Büyük yüklerin devreye girip çıkması, sistemde gerilim dalgalanmalarına yol açabilir.
- Yıldırım Düşmesi: Şebekeye yıldırım düşmesi, geçici aşırı gerilimlere neden olabilir.
- Anahtarlama Olayları: Şalt cihazlarının devreye alınması veya çıkarılması, gerilimde geçici bozulmalara yol açabilir.
- Gevşek Bağlantılar ve Hatalı Topraklama: Elektrik sistemindeki gevşek bağlantılar, hatalı topraklama ve hasarlı iletkenler de güç kalitesi sorunlarına neden olabilir.
- Transformatörlerde Doyma: Transformatörlerde demir nüvenin doyuma gitmesi, manyetizasyon akımının sinüzoidal olmamasına yol açabilir.

Güç kalitesi sorunları hem tüketiciler hem de enerji üretim ve dağıtım şirketleri için önemli ekonomik kayıplara neden olabilir. Bu sorunların etkileri şunlardır: (Ercire, M., ve Ünsal, A.,2021).

Ekipman Arızaları: Gerilim dalgalanmaları, harmonikler ve geçici olaylar, elektrikli cihazların arızalanmasına veya ömrünün kılmasına neden olabilir.

- Üretim Kayıpları: Fabrikalarda, enerji kesintileri veya gerilim dalgalanmaları, üretim süreçlerinin durmasına ve ürün kayıplarına yol açabilir.
- Yanlış Ölçümler: Harmonikler, bazı ölçüm cihazlarının yanlış değerler göstermesine neden olabilir.

- Veri Kaybı: Bilgisayar sistemlerinde meydana gelen ani kesintiler, veri kaybına yol açabilir.
- Isınma Problemleri: Harmonik akımlar, iletkenlerde, transformatörlerde ve diğer ekipmanlarda aşırı ısınmaya neden olabilir.

Güç kalitesi sorunlarının çözümü için çeşitli yöntemler ve teknolojiler kullanılmaktadır.

Başlıca çözüm yöntemleri şunlardır: (Rüstemli ve ark., 2013)

- Pasif ve Aktif Güç Filtreleri: Harmonikleri azaltmak için kullanılır.
- Gerilim Düzenleyicileri: Gerilimdeki dalgalanmaları dengelemek için kullanılır.
- Aşırı Gerilim Koruma Cihazları: Geçici aşırı gerilimlere karşı ekipmanları korur.
- İyi Topraklama Sistemleri: Topraklama sisteminin empedansını düşürerek, geçici gerilimleri azaltır.
- Harmonik Üreten Yüklerin Ayrılması: Hassas yüklerin temiz enerji hattına, harmonik üreten yüklerin ise ayrı bir hatta bağlanmasıdır.
- Kompanzasyon Tesisleri: Güç faktörünü düzeltmek için kullanılan kondansatörler gibi ekipmanlardır.
- Yalıtım Malzemelerinin İyileştirilmesi: Ekipmanların izolasyonunu güçlendirerek gerilim dalgalanmalarına karşı dayanıklılığı artırır.
- Enerji Kalitesi İzleme Sistemleri: Şebekedeki güç kalitesi sorunlarını sürekli olarak izlemek ve analiz etmek için kullanılır.

Elektrik sistemleri, üretim, iletim, dağıtım ve tüketim gibi temel disiplinleri kapsar. Bu disiplinlerin her bir aşamasında, elektrik enerjisinin kalitesini etkileyen çeşitli faktörler devreye girmektedir. Elektrik enerjisinin sürekli olarak enterkonnekte sisteme aktarılması, oluşan gerilim, frekans ve harmoniklerin standartlara uygun bir şekilde değerlendirilmesi, faz-faz veya faz-nötr gerilimlerin dengeli olup olmadığının analiz edilmesi, güç kalitesi çalışmalarının başlıca odak noktalarını oluşturmaktadır. (Apay, 2008)

Güç kalitesinin istenen seviyelerde tutulması, birbirine bağlı çeşitli paydaşların iş birliğini gerektirir. Bu paydaşlar arasında standardizasyon kurumları, araştırma merkezleri, mühendis ve mimarlar, gözlemleme cihazları üreticileri, güç kontrolü ekipmanları üreticileri, danışmanlar ve tüketiciler yer almaktadır (Atasal, 2000). Standardizasyon kurumları, güç kalitesine ilişkin standartların oluşturulmasından sorumludur. Örneğin,

“Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”, “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”, “Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik”, ANSI C84.1, IEEE 519-2014, IEC 61000-3-2:2018 ve IEEE 1159-2019 güç kalitesi ile ilgili belirgin standartlardan bazılarıdır. Üniversiteler gibi araştırma kurumları ise bilimsel yaklaşımlarla literatüre katkı sağlamayı amaçlarken, danışmanlarla birlikte bu çalışmaları yönlendirme görevini üstlenir. Mühendisler ve mimarlar, sistemlerin tasarımından ve işletilmesinden sorumludur. Gözleme ve güç kontrol cihazlarının üreticileri ise geliştirdikleri teknolojilerle mühendislerin işletme süreçlerini destekler. Tüketiciler de kullandıkları cihazlarla enterkonnekte sistemin bir parçasını oluşturur (Bütün, 2021).

Elektrik güç sistemlerinde, güç kalitesini etkileyen kriterler şu şekilde sınıflandırılabilir: geçici olaylar, kısa süreli değişimler, uzun süreli değişimler, gerilim dengesizlikleri, dalga biçimi bozulmaları, gerilim dalgalanmaları ve güç frekansındaki dalgalanmalar. Tablo 2.1’de bu kriterler gösterilmektedir (Kulu, 2020).

Tablo 2.1. Elektrik güç kalitesini belirleyen olayların kategorileri (IEEE,2019)

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

2.1.1. Geçici olaylar

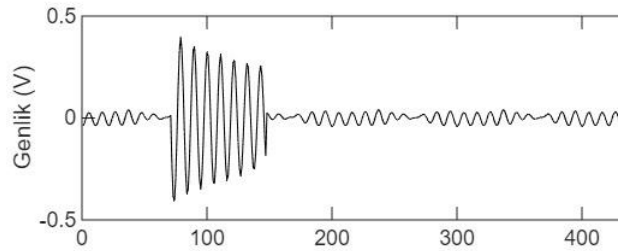
Geçici olaylar, elektrik güç sisteminde akım ve gerilim dalga şekillerinde meydana gelen ani değişimlerdir. Bu olaylar, sistemde ciddi etkiler yaratabilir ve iletim hatları ile yük tarafında geri dönülmesi mümkün olmayan sonuçlara yol açabilir. Örneğin, iletim hatlarındaki kabloların delinmesine veya yük tarafındaki cihazlarda veri kaybı ve bozulmalara neden olabilirler. Geçici olaylar, darbesel ve titreşimli olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır.

Darbeli geçici olaylar

Darbeli geçici olaylar, gerilim, akım veya her ikisinin tek yönlü polarizasyonlu geçici hal durumunda ani değişimleri olarak tanımlanır. Bu olaylar, gecikme ve yükselme süreleri ile karakterize edilir. Yıldırım kaynaklı darbe gerilim ve akımları, ya da bir kondansatörün boşalması sırasında ortaya çıkan eğri, bu duruma örnek olarak gösterilebilir.

Titreşimli geçici olaylar

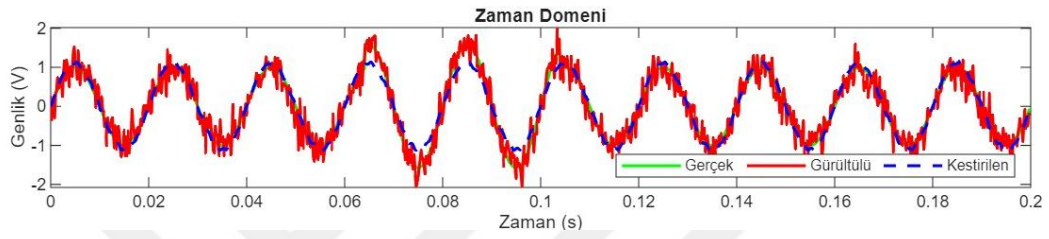
Geçici olayların bir diğer türü ise titreşimli geçici olaylardır. Bu olaylar tek yönlü olmayıp hem negatif hem de pozitif polarizasyonda görülebilir. Darbeli geçici olaylarda olduğu gibi ani değişimlerle ortaya çıkar. Titreşimli geçici davranışlar, akım veya gerilim dalga formlarında gözlemlenebilir. Örneğin, kondansatörlerin anahtarlanarak sırayla devreye alınması, bu tür geçici olayların meydana gelmesine neden olabilir. Şekil 2.1’de Tablo 3.5’teki test sinyalinize ait titreşimli geçici olay verilmiştir.



Şekil 2.1. Test sinyalindeki geçici olay

2.2. Kısa Süreli Değişimler

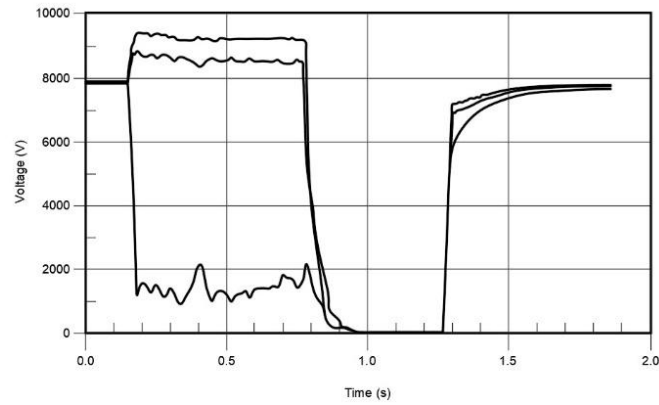
Kısa süreli değişimler, ani, anlık ve geçici şekilde meydana gelen olaylardır. Hata koşullarına bağlı olarak, gerilim ve akım dalga formlarında kesintilere veya artışlara neden olabilirler. Şekil 2.2’de, kısa süreli değişimlerden gerilim yükselmesine ilişkin bir örnek sunulmuştur.



Şekil 2.2. Kısa süreli değişimler Gerilim Yükselmesi (Voltage Swell)

2.2.1. Kesinti

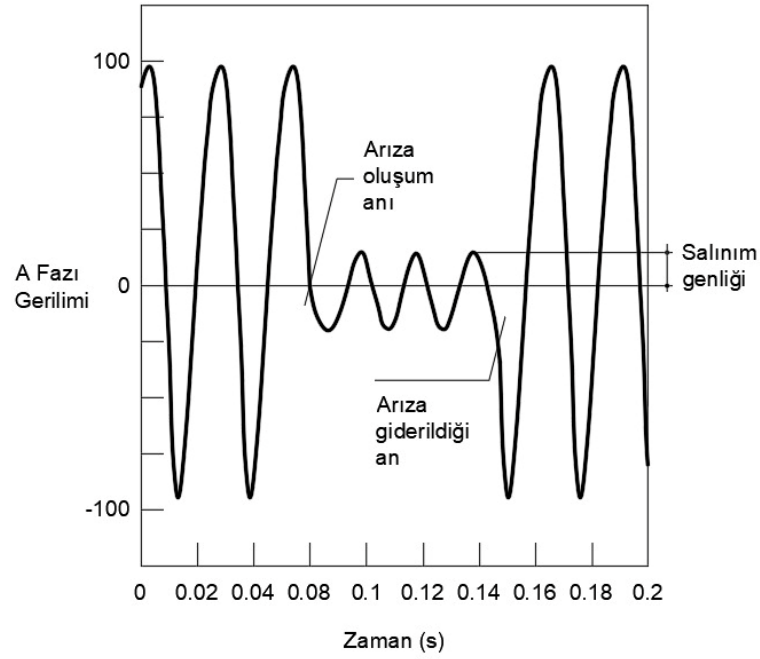
Gerilimin nominal değerinin %10’unun altına düşmesi durumunda oluşan kayıp, kesinti olarak adlandırılır. Bu tür kesintiler, 1 dakikayı aşmayan sürelerde meydana gelir. Kesintiler, ani, anlık veya geçici şekilde ortaya çıkarak ekipmanların hatalı çalışmasına ve kontrol sistemlerinde sorunlara yol açabilir. Şekil 2.3’te geçici bir kesintinin görseli gösterilmiştir (Tartan, 2011; Apay, 2008)



Şekil 2.3. Geçici olarak meydana gelen kesinti (Bütün, 2021)

2.2.2. Azalma ve salınma

Gerilimde, nominal değerin %10 ile %90'ı arasında değişimler meydana gelmesi ve bu değişimlerin 0,5 çevrimden 1 dakikaya kadar sürmesi, azalma ve salınma olarak tanımlanır. Kalkış akımı yüksek olan makinelerin şebekeye bağlanması, bu tür gerilim dalgalanmalarına neden olabilir. Şekil 2.4'te, gerilim azalması ve salınmasına ait bir örnek grafik sunulmuştur (Bütün, 2021).

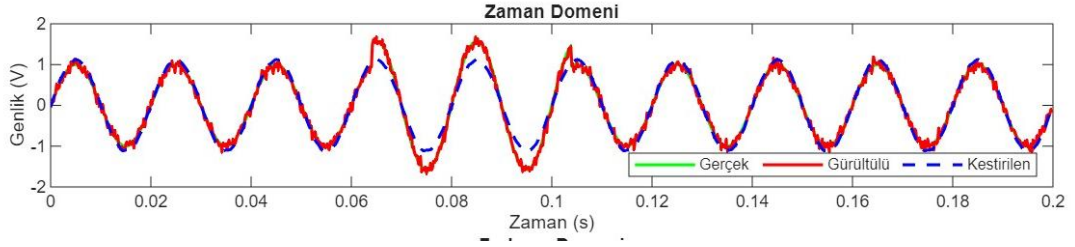


Şekil 2.4. Gerilim azalması ve salınması (Bütün, 2021)

2.2.3. Artma

Nominal gerilimin %110 ile %180 arasında artış göstermesi ve bu artışın 0,5 çevrim ile 1 dakika arasında sürmesi, artma olarak ifade edilir. Gerilim kaynaklarında ani yük artışları ya da dağıtım sisteminde gerilim düzenleme hataları bu duruma yol açabilir.

Örneğin, büyük bir kondansatör grubunun devreye alınması gerilim artışına neden olabilir. Şekil 2.5'te, bir gerilim artışı durumuna ilişkin bir örnek grafik gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Gerilim artışı

2.3. Uzun Süreli Değişimler

Uzun süreli değişimler, güç frekanslarının temel değerlerden sapmasıyla birlikte üretim tarafında gerilimlerin yükselmesi, düşmesi veya sürekli olarak sağlanamaması durumlarıdır.

2.3.1. Gerilim yükselmesi

Bir dakikadan daha uzun süre boyunca nominal gerilimin üzerine çıkması durumu, gerilim yükselmesi olarak tanımlanır. Üretim tarafındaki gerilim regülatörlerinde frekansların doğru ayarlanamaması bu duruma yol açabilir. Nominal gerilimin %110 veya %120'ye yükselmesi, gerilim yükselmesi olarak adlandırılır. Geçici güç frekansı değişimleri, anahtarlama olayları veya yıldırım gerilim yükselmelerine sebep olabilir (Kulu,2020).

2.3.2. Gerilim düşmesi

Kaynak geriliminde, bir dakikadan uzun süre azalma eğilimi gösteren durumlar gerilim düşmesi olarak ifade edilir. Tüketici tarafında yük artışı veya üretim tarafında gerilim arzındaki düşüş, gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Gerilim düşmeleri elektrik sistemlerinin performansını etkileyebilir ve cihazların düzgün çalışmasını engelleyebilir. (Kulu, 2020).

2.3.3. Sürekli kesinti

Gerilimin uzun bir süre boyunca sağlanamaması ve yüke aktarılmaması durumu sürekli kesinti olarak adlandırılır. Sürekli kesintiler sırasında tüketiciler, birkaç çevrimden saatler süren zaman dilimlerinde enerji alamazlar. Bu tür sorunlar genellikle iletim ekiplerinin müdahalesiyle çözülür. (Apay, 2008).

2.4. Gerilim Dengesizliği

Simetrik bileşenler teorisine göre dengeli bir güç sistemi, sıfır, pozitif ve negatif bileşenlerle ifade edilir. Üç fazlı güç sistemlerinde, her fazın gerilim ve akım değerleri eşit büyüklükte olmalı ve faz açıları arasında 120 derecelik bir fark bulunmalıdır. Ancak fazlardan birinin ya da birkaçının gerilim değerinde sapmalar veya faz farklarında bozulmalar olması, sistemi dengesiz hale getirir. Gerilim sapmaları artış veya azalış şeklinde gözlemlenebilir. Genellikle tüketicilerden kaynaklanan bu dengesizlik, ekipmanların yanlış veya dengesiz bağlanması sonucu oluşur. Güç elektroniği devrelerinden biri olan statik VAR kompensatörleri, tüketici yüklerinin çektiği akım ve gerilimleri izleyerek ve kompanzasyon yaparak sistem dengesizliğini önler.

2.5. Dalga Biçimi Bozulmaları

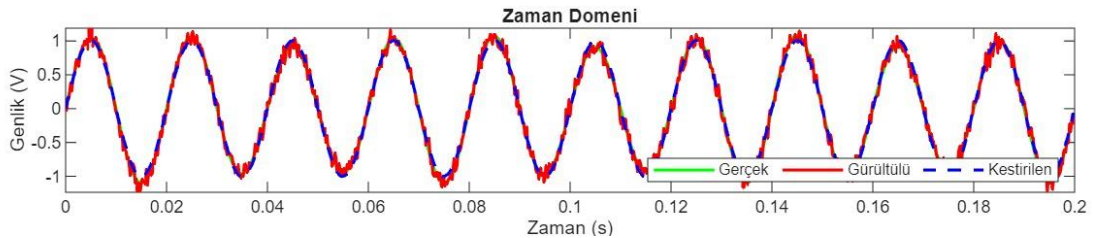
Dalga biçimi bozulmaları, gerilim ve akım sinyallerinde temel frekansın dışındaki etkilerden kaynaklanır ve güç kalitesini olumsuz yönde etkiler.

2.5.1. DC ofset

DC ofset, AC akım veya gerilim içerisinde DC bileşenlerinin bulunması durumudur. Genellikle yarım dalga doğrultucuların kullanımı sonucunda ortaya çıkar. DC ofset, transformatörlerin doyuma girmesine ve aşırı ısınmasına yol açabilir.

2.5.2. Harmonikler

Harmonikler, lineer olmayan yüklerin güç sistemine bağlanmasıyla ortaya çıkar ve temel frekans dışında farklı frekans bileşenlerinin oluşmasına neden olur. Bu durum, akım ve gerilim sinyallerinde bozulmalar yaratır. (Nedimoğlu, E., & Gümüş, B., 2019). Harmonikler, faz açısı ve frekans cinsinden ifade edilir. Şekil 2.6’de harmonikli sinyale ait grafikler verilmiştir.



Şekil 2.6. Harmonikli sinyal

2.5.3. Ara harmonikler

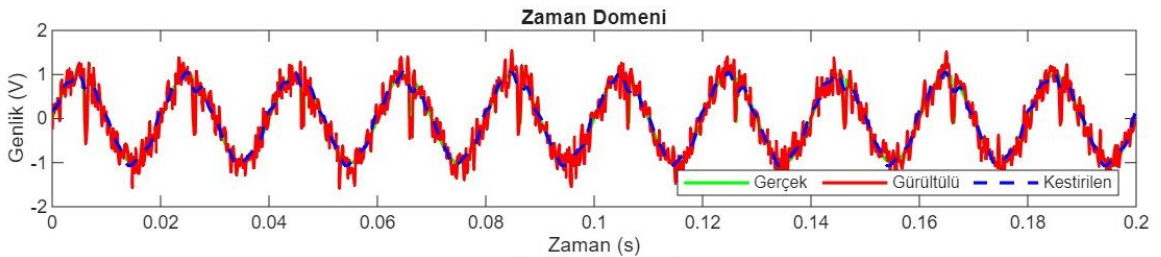
Harmonikler her zaman temel frekansın tam katları olarak oluşmaz. Temel frekansın tam katı olmayan harmoniklere ara harmonikler denir. Örneğin, 50 Hz şebeke frekansında 1,8. harmonik 90 Hz'dir. Frekans çeviriciler, ark fırınları ve çeviriciler, ara harmoniklerin başlıca kaynaklarıdır (Kulu,2020). Şekil 2.7 de ara harmonikli sinyal görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.7. Ara harmonikli sinyal

2.5.4. Çentik

Güç elektroniği çeviricileri, talebe uygun performans sağlamak amacıyla katlı biçimde tasarlanır. Kat sayısının artmasıyla birlikte faz sayısı da artar. Anahtarlama elemanlarının devreye girip çıkması sırasında oluşan kısa süreli çökmeler çentik olarak adlandırılır. Çentikler, gerilim ve akım dalga biçimlerinde bozulmalara neden olur. Şekil 2.8'de, çalışmamızda kullandığımız çentik veri setine ait grafikler verilmiştir.

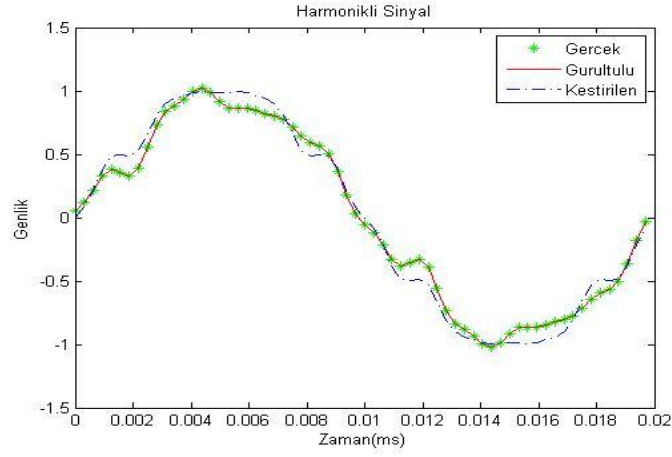


Şekil 2.8. Çalışmamızda kullandığımız çentik veri setine ait grafikler

2.5.5. Gürültü

Gürültü, akım veya gerilim sinyallerinde 200 kHz'den daha düşük frekanslarda meydana gelen istenmeyen işaretlerdir. Güç elektroniği devreleri ve bunlara bağlı kontrol sistemleri, bu tür gürültülerin başlıca kaynağıdır. Gürültü, ekipmanların istenilen şekilde çalışmamasına neden olabilir. Uygun topraklama ve filtreleme yöntemleriyle önlenabilir.

Örnek olarak çalışmamızdaki ilk veri setine ait 10 dB gürültülü sinyale ait görüntü şekil 2.9' da verilmiştir.



Şekil 2.9. İlk veri setimize ait 10 dB gürültülü AO algoritması ile harmonik kestirimi

2.6. Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim dalgalanmaları, rastgele veya düzenli biçimde, nominal gerilimin %90 ile %110'u arasında gerçekleşen değişimlerdir. Özellikle ark fırınları ve kaynak makineleri gibi ani yük değişimi gösteren cihazlar, gerilim dalgalanmalarına neden olur. Bu dalgalanmalar, aydınlatmada titreşim problemini de beraberinde getirir.

2.7. Güç Frekansı Değişimleri

Güç frekansı değişimleri, sistemin temel frekansı olan 50Hz veya 60Hz'den sapma durumudur. Bu sapmalar, genellikle üretim sistemlerindeki jeneratörlerin dönme hızlarına bağlı olarak ortaya çıkar. Ayrıca, yüklerin devreye alınması veya çıkması, kontrol sistemlerinin tepkileri gibi faktörler de frekans kaymalarına neden olabilir. Üretim tesislerinden bir veya daha fazlasının devre dışı kalması ya da önemli miktarda yükün devre dışı çıkması da frekans değişimlerini tetikler (Tartan, 2011)

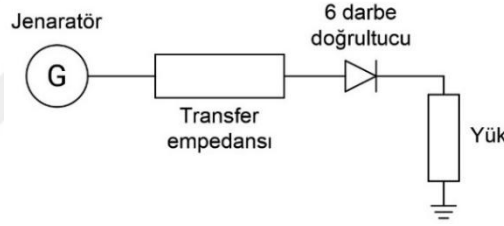


3. MATERYAL-METHOT

3.1. Materyal

3.1.1. Sentetik harmonikli veri örneği

Bu çalışmamızda öncelikle güç sistemlerindeki bozucu etkilerden harmoniklerin genlik ve faz açısı tahmin edilerek tespiti yapılmaktadır. Literatürde en çok atıf alan Z. Lu ve arkadaşlarının (2008) makalesindeki sentetik harmonikli veri örneği kullanılır. Şekil 3.1 yük barasında, tam dalga altı darbeli köprü doğrultucu içeren iki baralı üç fazlı basit bir güç sistemini tanımlar. Sentetik harmonikli veri örneği Şekil 3.1'deki basit güç sistemindeki yük barasının terminalinden örneklenen bozulmuş bir voltaj dalga $v(t)$ olarak adlandırılır.



Şekil 3.1. Basit güç sistemi: yükü besleyen altı darbeli tam dalga köprü doğrultucuya sahip iki veri yolu mimarisi

Şekil 3.1'deki güç sistemindeki yük barasından alınan bozulmuş harmonikli test sinyalinin, harmoniklerinin frekansları ve fazları Tablo 3.1'de listelenir (Z. Lu ve ark., 2008).

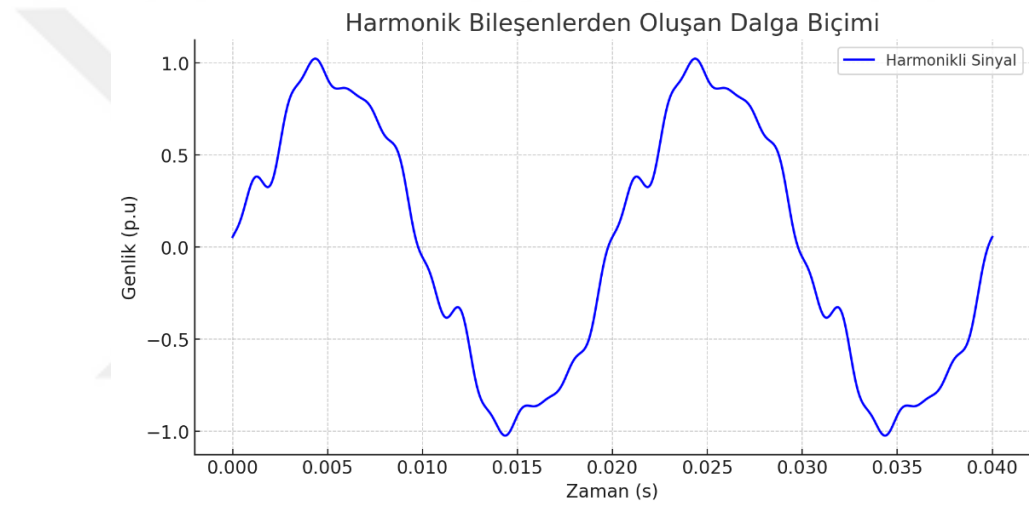
Tablo 3.1. Sentetik harmonikli veri örneği (Z. Lu ve ark., 2008)

Harmonik sayısı	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

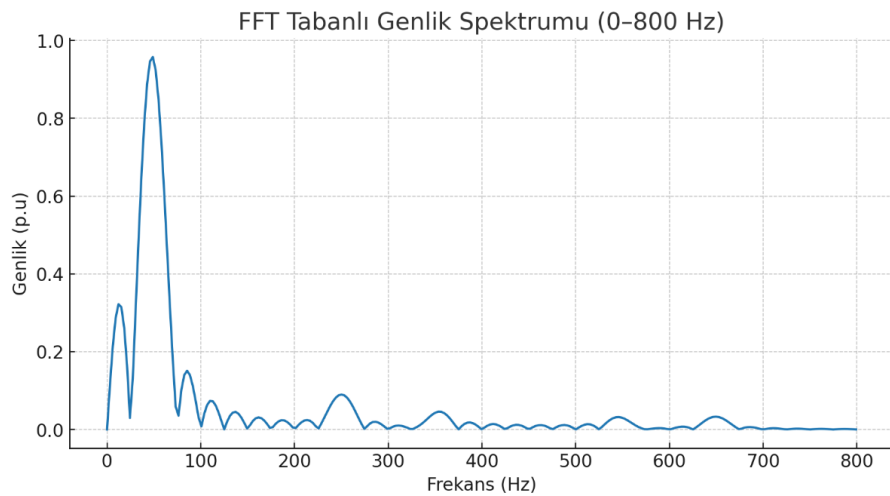
Sentetik harmonikli veri örneği sinyaline ait derece cinsinden matematiksel modeli denklem (3.1) de verilmiştir.

$$v_1(t) = 0.95 \cdot \sin(100\pi t - 2.02^\circ) + 0.09 \cdot \sin(5 \cdot 100\pi t + 82.1^\circ) + 0.043 \cdot \sin(7 \cdot 100\pi t + 7.9^\circ) \\ + 0.03 \cdot \sin(11 \cdot 100\pi t - 147.1^\circ) + 0.033 \cdot \sin(13 \cdot 100\pi t + 162.6^\circ) \quad (3.1)$$

Sentetik harmonikli veri örneği sinyaline ait dalga biçimi ve FFT tabanlı genlik spektrumu Şekil 3.2 verilmiştir. Sinyal dalga biçiminin harmonikler nedeniyle bozunuma uğradığı Şekil 3.2’de açıkça görülmesine rağmen harmoniklerin genlikleri zaman domeninde gözlenememektedir.



Şekil 3.2. Sentetik harmonikli veri örneği sinyalinin dalga biçimi



Şekil 3.3 Sentetik harmonikli veriye ait FFT tabanlı Genlik spektrumu

Şekil 3.3'te ise bu harmoniklere ait genliklerin frekans domeninde detaylı bir şekilde gözlemlendiği açıkça görülmektedir. Bu nedenle FFT frekans spektrumu cevapları için önemli bir araç olup harmonik bileşenleri göstermekte kullanılır.

Bu tez çalışmasında, literatürde sıkça kullanılan Tablo 3.1' deki sentetik harmonikli veri örneğine ait harmonik parametrelerinin tespiti için meta sezgisel yöntemlerden biri olan PSO ile gerçekleştirilecektir. Bu test sinyalindeki harmonik genlikleri, en küçük kareler yöntemiyle belirlenir. Faz açıları ise, ilgili meta sezgisel algoritmalar kullanılarak tahmin edilir. Aynı test sinyalinde daha iyi sonuçlar elde edebilecek yöntemler araştırılarak ve birçok farklı optimizasyon yöntemi denenmiştir.

Test sinyali, 50 Hz'lik bir voltaj dalga formundan döngü başına 64 nokta örneklenerek alınmıştır. Algoritma gürültüsüz ve gürültülü durumlarda test edilir. Simülasyonda Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültüsü (TBGG-AWGN) gürültüsü kullanılır. Her bir gürültü türü için sinyal-gürültü oranları (SNR) sırasıyla 40,20, 10 ve ayrıca gürültüsüz olarak seçilir. 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 simülasyon çalışmasında, kullanılan algoritmalar için popülasyon boyutu 50, maksimum jenerasyon sayısı 100 ve tekrar sayısı 50 olarak seçilmiştir. Optimizasyon işlemleri için, simülasyon çalışmaları, Intel (R) Core (TM) i7 – 10750H CPU 2.60 GHz 16.4 GB RAM 'e sahip bir PC üzerinde gerçekleştirilmiştir. Algoritmaların durdurma kriteri, maksimum jenerasyon sayısına ulaşılmasıdır. Karşılaştırma yapmak için Kök Ortalama Kare Hata (KOKH- RMSE) değerleri hesaplanır.

3.1.2. Sentetik yüksek genlikli harmoniklere sahip veri örneği

Sentetik yüksek genlikli harmonikleri içeren sinyalin LED lambalarda çalışmasını simüle eden matematik modeli denklem (3.2) ile verilmiştir. Buradaki amaç; birinci veri setinde harmonik kestirimini gerçekleştirilen meta sezgisel yöntemleri bu veri setinde deneyip geçerliliğini analiz etmektir. İlk olarak temel frekans 50Hz ve katları şeklindeki frekanslarda denemek için ilgili sentetik sinyal oluşturulmuş ve harmonik bileşenlere ait parametre değerleri için önerilen yöntemlerle kestirim yapılır.

$$v_2(t) = 1.2\sin(2\pi 50t) + 0.8\sin(2\pi 150t) + 0.5\sin(2\pi 250t) \quad (3.2)$$

Sentetik yüksek genlikli ara harmonikleri içeren sinyalin LED lambalarda çalışmasını simüle eden model denklem (3.3)'deki gibi MATLAB ortamında sentetik olarak oluşturulur ve ara harmoniklere ait bileşenlerin önerilen yöntemlerle kestirimi yapılır.

$$v_3(t) = 1.2\sin(2\pi 45t) + 0.8\sin(2\pi 115t) + 0.5\sin(2\pi 245t) \quad (3.3)$$

Farklı optimizasyon yöntemlerinin farklı sinyal tiplerinde başarılı olduğu dolayısıyla tek bir yöntemin her probleme uygun olmaması nedeniyle hibrit optimizasyon yöntemleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle aşağıda farklı sinyal tipleri için farklı optimizasyon yöntemlerinin uygulandığı örnekler kısaca verilmiştir.

MGO ile Harmonik Kestirimi

Sentetik yüksek genlikli simüle edilmiş denklem (3.2)'de verilen sinyal MATLAB ortamında sentetik olarak oluşturulur. Bu sinyale $\sigma=0.2$ varyansa sahip AWGN'nin eklenmesiyle denklem (3.4)'de verilen $v_n(t)$ gürültülü sinyali elde edilmiştir. Sonrasında harmoniklere ait bileşenlerin genlik kestirim önerilen yöntemlerle yapılır.

$$v_n(t) = v(t) + \sigma n(t) \quad (3.4)$$

Kestirim doğruluğu ve yöntemler arası başarımları karşılaştırmak için Kök Ortalama Kare Hata (KOKH- RMSE) değerleri hesaplanır. Bu veri aşağıdaki Tablo 3.2' deki parametreler alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Popülasyon sayıları 50 ve 100 alınarak sonuçlar hesaplanır ve karşılaştırma yapılır.

Tablo 3.2. Farklı harmoniklerin kestiriminde kullanılan MGO için parametreler

	Kullanılan değerler	Alt sınır-üst sınır
	50, 100	
Gazelle popülasyonu		
Maksimum iterasyon sayısı	100	
Toplam boyut (Genlik, Frekans, Faz)	9	
Genlik 1 değeri ve sınırları	1,2	0-2
Genlik 2 değeri ve sınırları	0.8	0-2
Genlik 3 değeri ve sınırları	0.5	0-2
1. Harmoniğin frekansı ve sınırı	50	45-55

Tablo 3.2. (Devamı) Farklı harmoniklerin kestiriminde kullanılan MGO için parametreler

2. Harmoniğin frekansı ve sınırı	150	145-155
3. Harmoniğin frekansı ve sınırı	250	245-255
1. Harmoniğin faz sınırı		$0-2\pi$
2. Harmoniğin faz sınırı		$0-2\pi$
3. Harmoniğin faz sınırı		$0-2\pi$

SWO ile ara harmonik kestirimi

Sentetik yüksek genlikli simüle edilmiş denklem (3.3)'te verilen farklı ara frekanslar içeren sinyal MATLAB ortamında sentetik olarak oluşturulur. Oluşturulan bu sinyale $\sigma=0.2$ varyansa sahip AWGN nin eklenmesiyle denklem (3.4) 'te verilen $v_n(t)$ gürültülü sinyali ara harmonikli olarak elde edilir. Ara harmoniklere ait bileşen kestirimleri önerilen yöntemle yapıldıktan sonra RMSE yardımıyla en başarılı algoritma seçilir ve diğer sinyal tiplerindeki bileşen parametrelerinin kestiriminde kullanılır. Bu sinyal için Tablo 3.3'teki parametreler alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 3.3. Farklı ara harmoniklerin tespitinde SWO için kullanılan parametreler

	Kullanılan değerler	Alt sınır-üst sınır
Gazelle popülasyonu	50	
Maksimum iterasyon sayısı	100	
Toplam boyut (Genlik, Frekans, Faz)	9	
Genlik 1 değeri ve sınırları	1.2	0-2
Genlik 2 değeri ve sınırları	0.8	0-2
Genlik 3 değeri ve sınırları	0.5	0-2
1. Harmoniğin frekansı ve sınırı	45	40-50
2. Harmoniğin frekansı ve sınırı	115	110-120
3. Harmoniğin frekansı ve sınırı	245	240-250
1. Harmoniğin faz sınırı		$0-2\pi$
2. Harmoniğin faz sınırı		$0-2\pi$
3. Harmoniğin faz sınırı		$0-2\pi$

3.1.3. Kamuya açık gerçek veri örneği

IEEE 1159.2 Working Group kamuya açık File wave14a.xls gerçek veri örneğinde diğer veri setlerinde kullanılan meta sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Karşılaştırma yapmak için RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde kullanılan meta sezgisel yöntemlerden en yakın ve en iyi kestirimi yapan AO algoritması olmuştur. İlgili sinyal MATLAB ortamında sentetik olarak oluşturulmuş ve bu sinyaldeki harmoniklere ait bileşenlere ait parametreler Tablo 3.4 için önerilen yöntemlerle kestirim yapılmıştır.

Tablo 3.4 Harmonikli gerçek sinyalin AO ile kestirim parametreleri

Harmonikli gerçek sinyalin AO ile kestirim parametreleri	
Popülasyon size	50
Maksimum iterasyon	100
Run size	50

3.1.4. Deneysel olarak üretilmiş güç kalite bozunumu örnekleri

Güç sistemlerinde önemli parametreler temel frekans ve genliktir. Güç sistemlerinde, 50 Hz frekansında ve normal bir genliğe sahip temel bir sinüzoidal sinyal ile örneklenen, S1 Sınıfı olarak adlandırılan saf bir sinüzoidal sinyal elde edilir. Türkiye'de kullanılan temel frekans 50 Hz ve genlik ise 220 V olmalıdır. Ancak, bu parametreler, en yaygın karşılaşılan bozulmalar olan fliker, harmonikler, gerilim düşüşü (sag), gerilim yükselmesi (swell), kesinti (interruption), çentik (notch), darbe (spike) ve geçici olaylar (transient) gibi bazı güç kalitesi bozulmaları nedeniyle değişiklik gösterebilmektedir. (Akkaya, S. (2023-b)).

IEEE 1159 standardında tanımlandığı üzere, güç kalitesi bozulmaları, farklı aralıklarda genlik, frekans ve zaman karakteristiklerine sahip tipik matematiksel modellere sahiptir. Bu bozulmalar, fliker, harmonikler, gerilim düşüşü, yükselmesi, kesinti, çentik, darbe, geçici olay vb. şekillerde tekil veya çoklu olarak ortaya çıkabilmektedir. Bölüm 2 de anlatılan güç kalitesi bozunumlarına ek olarak aşağıdaki tabloda görüldüğü üzere bu bozunumlarından bazıları ikili kombinasyonlar şeklinde oluşturulmuştur. Tablo 3.5'te

deneysel olarak üretilmiş güç kalitesi bozunum örneklerine ait model eşitliği ve parametreleri verilmiştir. Bunlardan bazılarının modelleri ve zaman serisi görüntüleri tanımlanmış olup, saf sinyal göz ardı edilmiştir (Akkaya, S. (2023-a)).



Tablo 3.5. Deneysel olarak üretilmiş güç kalitesi bozunum örneklerine ait model eşitliği ve parametreleri (Akkaya, S. (2023-a))

Sınıf	Tip	Model Eşitliği	Parametre
S1	Saf sinyal	$v(t) = \sin(2\pi f_0 t)$	$f_0 = 50 \text{ Hz}$
S2	Gerilim Düşmesi	$v_1(t) = [1 - \alpha_{\text{sag}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(2\pi f_0 t)$	$0,1 \leq \alpha_{\text{sag}} \leq 0,9$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$ $T_0 = 1/f_0$ u : unit step function
S3	Gerilim Yükselmesi	$v_2(t) = [1 + \alpha_{\text{swell}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(2\pi f_0 t)$	$0,1 \leq \alpha_{\text{swell}} \leq 0,8$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$
S4	Kesinti	$v_3(t) = [1 - \alpha_{\text{interruption}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(2\pi f_0 t)$	$0,9 \leq \alpha_{\text{interruption}} \leq 1$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$
S5	Kırpışma	$v_4(t) = [1 + \alpha_{\text{flicker}} \sin(2\pi f_{\text{flicker}} t)] \sin(2\pi f_0 t)$	$0,05 \leq \alpha_{\text{flicker}} \leq 0,2794$ $1 \text{ Hz} \leq f_{\text{flicker}} \leq 25 \text{ Hz}$
S6	Geçici olaylar	$v_5(t) = \sin(2\pi f_0 t) + \alpha_{\text{transient}} e^{-\frac{(t-t_3)}{\tau}} (u(t - t_3) - u(t - t_4)) \sin(2\pi f_{\text{transient}} t)$	$0,1 \leq \alpha_{\text{transient}} \leq 0,8$ $0,5T_0 \leq t_4 - t_3 \leq 3T_0$ $300 \text{ Hz} \leq f_{\text{transient}} \leq 900 \text{ Hz}$ $8 \text{ ms} \leq \tau \leq 40 \text{ ms}$
S7	Harmonikler	$v_6(t) = \sin(2\pi f_0 t) + \alpha_3 \sin(2\pi 3f_0 t) + \alpha_5 \sin(2\pi 5f_0 t) + \alpha_7 \sin(2\pi 7f_0 t)$	$0,05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0,5$
S8	Çentik	$v_7(t) = \sin(2\pi f_0 t) - \text{sign}(\sin(2\pi f_0 t)) \left\{ \sum_{n=0}^9 \alpha_{\text{notch}} [u(t - (t_5 + 0,02n)) - u(t - (t_6 + 0,02n))] \right\}$	$0,2 \leq \alpha_{\text{notch}} \leq 0,4$ $0 \leq t_5, t_6 \leq 0,5T_0$ $0,01T_0 \leq t_6 - t_5 \leq 0,05T_0$ sign : signum function
S9	Ani darbe	$v_8(t) = \sin(2\pi f_0 t) + \text{sign}(\sin(2\pi f_0 t)) \left\{ \sum_{n=0}^9 \alpha_{\text{spike}} [u(t - (t_5 + 0,02n)) - u(t - (t_6 + 0,02n))] \right\}$	$0,2 \leq \alpha_{\text{spike}} \leq 0,4$ $0 \leq t_5, t_6 \leq 0,5T_0$ $0,01T_0 \leq t_6 - t_5 \leq 0,05T_0$
S10	Gerilim Düşmesi + Harmonik	$v_9(t) = [1 - \alpha_{\text{sag}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] v_6(t)$	$0,1 \leq \alpha_{\text{sag}} \leq 0,9$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$ $T_0 = 1/f_0$
S11	Gerilim Yükselmesi + Harmonik	$v_{10}(t) = [1 + \alpha_{\text{swell}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] v_6(t)$	$0,1 \leq \alpha_{\text{swell}} \leq 0,8$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$
S12	Kesinti + Harmonik	$v_{11}(t) = [1 - \alpha_{\text{interruption}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] v_6(t)$	$0,9 \leq \alpha_{\text{interruption}} \leq 1$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$
S13	Kırpışma+ Harmonik	$v_{12}(t) = [1 + \alpha_{\text{flicker}} \sin(2\pi f_{\text{flicker}} t)] \sin(2\pi f_0 t) + \alpha_3 \sin(2\pi 3f_0 t) + \alpha_5 \sin(2\pi 5f_0 t) + \alpha_7 \sin(2\pi 7f_0 t)$	$0,05 \leq \alpha_{\text{flicker}} \leq 0,2794$ $1 \text{ Hz} \leq f_{\text{flicker}} \leq 25 \text{ Hz}$ $0,05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0,5$
S14	Gerilim Düşmesi + Geçici olay	$v_{13}(t) = [1 - \alpha_{\text{sag}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(2\pi f_0 t) + \alpha_{\text{transient}} e^{-\frac{(t-t_3)}{\tau}} (u(t - t_3) - u(t - t_4)) \sin(2\pi f_{\text{transient}} t)$	$0,1 \leq \alpha_{\text{sag}} \leq 0,9$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$ $0,1 \leq \alpha_{\text{transient}} \leq 0,8$ $0,5T_0 \leq t_4 - t_3 \leq 3T_0$ $300 \text{ Hz} \leq f_{\text{transient}} \leq 900 \text{ Hz}$ $8 \text{ ms} \leq \tau \leq 40$
S15	Gerilim Yükselmesi + Geçici olay	$v_{14}(t) = [1 + \alpha_{\text{swell}}(u(t - t_1) - u(t - t_2))] \sin(2\pi f_0 t) + \alpha_{\text{transient}} e^{-\frac{(t-t_3)}{\tau}} (u(t - t_3) - u(t - t_4)) \sin(2\pi f_{\text{transient}} t)$	$0,1 \leq \alpha_{\text{swell}} \leq 0,8$ $T_0 \leq t_2 - t_1 \leq 9T_0$ $0,1 \leq \alpha_{\text{transient}} \leq 0,8$ $0,5T_0 \leq t_4 - t_3 \leq 3T_0$

3.2. Metot

3.2.1. En küçük kareler yöntemi

Bu yöntem, Carl Friedrich Gauss tarafından, düzgün bir dağılım göstermeyen veri kümeleri için parametre tahmini yapmak amacıyla geliştirilmiştir. Yöntemin temel prensibi, mevcut veri noktalarına bir eğri (veya model) uydurmaktır. Söz konusu eğrinin formu, girdi değişkenlerinin doğrusal bir kombinasyonu şeklinde olduğunda, bu işlem doğrusal bir modelin uydurulması olarak tanımlanır. Optimizasyon sürecinin nihai hedefi, tüm gözlemlenen veri noktalarının, tahmini edilen bu doğrudan olan dikey uzaklıklarının karelerinin toplamını minimize etmektir. Başka bir deyişle, modelin hatasını temsil eden bu uzaklıkların kareleri toplamının en küçük olması amaçlanmaktadır. (Haseeb ve ark., 2023)

Gözlemlenen veri noktaları, tahmini edilen regresyon doğrusunun hem üstünde hem de altında konumlanabilir. Bu durum, bu değerlerin işaretlerinin pozitif veya negatif olmasıyla sonuçlanır. Söz konusu bu değerleri toplamak, pozitif ve negatif değerlerin birbirini götürme (telafi etme) ihtimali nedeniyle toplam hatayı yanıltıcı bir şekilde sıfıra yakın gösterebilir. Bu sakıncayı bertaraf etmek için, her bir noktanın doğruya olan uzaklığını temsil eden hata terimlerinin mutlak değerleri yerine kareleri alınarak toplanması daha uygundur. Optimizasyon sürecinin nihai amacı, bu hata kareleri toplamını minimize edecek parametre değerlerini belirlemektir. (Yükselen, 2021).

Düzgün şekilde dağılmayan veriler (x_m, y_m) olarak tanımlansın. Burada $m=1, 2, \dots, N$ olacaktır. Uydurulacak eğri aşağıda verilmiştir.

$$y(x)=a_0+a_1x \quad (3.5)$$

Denklem 3.2’de elde edilen hatalar verilmiştir.

$$e_m=y_m-x_m y \quad (3.6)$$

Hataların kareleri denklem 3.3’te verilmiştir.

$$e_m^2=(y_m-x_m y)^2=(y_m-a_0-a_1x_m)^2 \quad (3.7)$$

Hataların kareleri toplamı denklem 3.8’ de verilmiştir.

$$E = \sum_{m=1}^N (y_m - a_0 - a_1 x_m)^2 \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de E değerin minimum olması istenir. Bu nedenle a_0 ve a_1 katsayılarının en uygun şekilde belirlenmesi gerekir. Denklem 3.9 ve 3.10 hesaplatılarak en uygun a_0 ve a_1 katsayıları bulunur.

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = \sum_{m=1}^N 2(y_m - a_0 - a_1 x_m)(-1) = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = \sum_{m=1}^N 2(y_m - a_0 - a_1 x_m)(-x_m) = 0 \quad (3.10)$$

Harmonikli bir sinyalde harmoniklerin genlikleri en küçük kareler yöntemi ile rahatça bulunabilmektedir. Denklem 3.11’de örnek bir sinyal verilmiştir.

$$z(t) = h_1(t)A_1 + h_2(t)A_2 + \dots + h_n(t)A_n = \varphi^T(t)A \quad (3.11)$$

Burada $z(t)$ sistem matrisi, A genlik değerlerinden oluşan matristir. Genlik değerlerinden oluşan A matrisi bu yöntemle tahmin edilmeye çalışılacaktır.

Ae ’nin bulunabilmesi için maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi gerekir. Maliyet fonksiyonu denklem 3.12’de verilmiştir.

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (z(k) - H^T(k)A)^2 \quad (3.12)$$

İlgili optimizasyon algoritması uygulandıktan sonra maliyet fonksiyonu minimize edilir ve EKKY ile aşağıdaki eşitlikler kullanılarak Ae hesaplanır.

$$J = \frac{1}{N} (Z - HA_e)^T (Z - HA_e) = \frac{1}{N} (Z^T Z - Z^T H A_e - A_e^T H^T Z + A_e^T H^T H A_e) \quad (3.13)$$

$$(Z^T H A_e)^T = A_e H^T Z = Z^T H A_e \quad (3.14)$$

$$J = \frac{1}{N} (Z^T Z - A_e^T H^T Z - A_e H^T Z + A_e^T H^T H A_e) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial J}{\partial A_e} = -2H^T Z + 2H^T H A_e = 0 \quad (3.16)$$

$$H^T Z = H^T H A_e \quad (3.17)$$

$$A_e = (H^T H)^{-1} H^T Z \quad (3.18)$$

3.2.2. Maliyet fonksiyonları ve hata bulma yöntemleri

Optimizasyon yöntemlerinde, amaca uygun şekilde tanımlanmış bir maliyet fonksiyonunun seçimi oluşturmaktadır. Söz konusu denklem yapısına bağlı olarak bu fonksiyon, bir minimizasyon veya maksimizasyon problemi şeklinde formüle edilmektedir. Harmonik kestirim problemlerinde, literatürde bu amaca yönelik çeşitli maliyet fonksiyonu yaklaşımları mevcuttur. Optimizasyon algoritmalarında genellikle, belirli ve önceden bilinen bir başlangıç değeri ile tahmin edilmesi gereken bir parametre değeri vardır. Bu iki değer arasındaki fark, bir hata terimi olarak ifade edilir. Literatürde, söz konusu hatanın hesaplanmasına ilişkin farklı metodolojiler bulunmaktadır. Bahsi geçen bu yöntemlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

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

Ortalama hata

Bilinen değerlerle oluşturulan veya tahmin edilen $X(k)$ ile tahmin edilen $Xe(k)$ arasındaki ortalama hatadır.

$$e_i = X(k) - Xe(k) \text{ için} \quad (3.19)$$

$$OH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (3.20)$$

Ortalama yüzdesel hata

Ortalama Yüzdesel Hata, $X(k)$ ve $Xe(k)$ arasındaki farkın ortalama yüzdesi olarak verilmektedir. İki değer arasındaki fark pozitif ya da negatif olabilir. Bu durumda hatalar birbirlerini yok edebilirler. $X(k)$ değerinin sıfır olması hali hata olarak tanımlanmamıştır.

$$OYH = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n e_i / X_i(k) \quad (3.21)$$

Ortalama mutlak hata

Ortalama Mutlak Hata, $X(k)$ ve $Xe(k)$ arasındaki farkın mutlak değeri içerisinde ortalamasının alınmasıyla elde edilir. Eğriler arasındaki farkın tam ortalarından çizgi çekildiği düşünülecek olursa mutlak değeri sayesinde birbirlerini yok etme durumları ortadan kalkmış olur.

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (3.22)$$

Ortalama karesel hata

$X(k)$ 'nin $Xe(k)$ 'ye ne kadar yakın olduğunu belirtir. Değerin sıfıra yakın olması istenmektedir. Bu özelliğinden dolayı minimizasyon problemlerinde kullanılabilir.

$$OKH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.23)$$

Kök ortalama karesel hata

Tahmin sonucu elde edilen hataların standart sapması olarak ifade edilir. Kök ortalama

$$KOKH = \sqrt{OKH} \quad (3.24)$$

Ortalama mutlak yüzdesel hata

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

$$OMYH = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| / |X_i(k)| \quad (3.25)$$

3.3. Harmonik Tahmini

Güç sistemlerindeki bozunumlardan biri olan harmoniklerin parametrelerini tahmin etmek için; EKK yöntemi ve meta sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılır. Tahmin edilecek elektrik sinyalinin temel tanımı Denklem (3.26)'de verilmiştir:

$$Z(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t + \phi_n) + v(t) \quad (3.26)$$

Bu denklemde, $n = 1, 2, \dots, N$ harmonik sırasını ifade eder. A_n , ϕ_n ve ω_n sırasıyla n 'inci harmoniğin genliği, faz açısı ve açısal frekansdır. Açısal frekans $\omega_n = 2\pi f_n$ ve $v(t)$ ise ölçülen sinyale eklenen gürültüdür. Her bir harmoniğin A_n , ϕ_n ve ω_n değerlerini tahmin etmek için Denklem (3.27) kullanılır.

$$\hat{Z}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{A}_n \sin(\hat{\omega}_n t + \hat{\phi}_n) \quad (3.27)$$

Burada $\hat{A}_n$, $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ sırasıyla A_n , ϕ_n ve ω_n tahminlerini ifade etmektedir. Bu durumda ana sinyal Denklem (3.28) ile ifade edilir.

$$Z(t) = \hat{Z}(t) + r(t) = \sum_{n=1}^N \hat{A}_n \sin(\hat{\omega}_n t + \hat{\phi}_n) + r(t) \quad (3.28)$$

Burada $r(t)$; gerçek sinyal $Z(t)$ ile ilgili algoritma ile tahmin edilen sinyal $\hat{Z}(t)$ arasındaki farktır.

$\hat{\phi}_n$, $\hat{\omega}_n$ Ve $\hat{A}_n$ değerlerini tahmin etmenin amacı, N ' in belirlediği durumlarda $r(t)$ farkının en küçük olmasını sağlamaktır. Tahmin edilecek harmoniklerin fazları doğrusal olmadığı ve $[0, 2\pi)$ ile sınırlı olduğundan $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ değerlerini tahmin etmek için yinelenmeli bir optimizasyon algoritması kullanılır. İlgili optimizasyon algoritması ile her iterasyonda fazlar ve frekanslar tahmin edildikten sonra, genlik $\hat{A}_n$, standart EKK yöntemi ile bulunur. $Z(t)$ Sinyali K örneklemele örneklendiğinde, ayrık doğrusal model Denklem (3.29) verilir.

$$Z(k) = H(k) \cdot A + v(k), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3.29)$$

$$H(k) = \begin{bmatrix} \sin(\omega_{n_1}t_1 + \phi_1) & \dots & \sin(\omega_{n_N}t_1 + \phi_N) \\ \sin(\omega_{n_1}t_2 + \phi_1) & \dots & \sin(\omega_{n_N}t_2 + \phi_N) \\ \vdots & & \vdots \\ \sin(\omega_{n_1}t_k + \phi_1) & \dots & \sin(\omega_{n_N}t_k + \phi_N) \\ \vdots & & \vdots \\ \sin(\omega_{n_1}t_K + \phi_1) & \dots & \sin(\omega_{n_N}t_K + \phi_N) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Burada $Z(k)$, eklenen gürültü $v(k)$ ile ölçülen değerin k . örneğidir. Tahmin edilmesi gereken genlik vektörü $A = [A_1, A_2, \dots, A_N]^T$ dir.

Denklem (3.30) da verilen $H(k)$, sistem yapısı matrisidir. Daha önce belirtildiği gibi, amaç asıl sinyal olan $Z(k)$ ile, tahmin edilen sinyal $\hat{Z}(k) = \hat{H}(k)\hat{A}$ arasındaki farkı en aza indiren en iyi tahmin edilen $\hat{A}_n$, $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ değerini bulmaktır. $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ değerleri belirli bir optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplandıktan sonra $\hat{H}(k)$ bu değerlere bağlı olarak hesaplanır. $\hat{H}(k)$ 'nın tam sıra bir matris olduğu varsayıldığında $\hat{A}$ 'nın tahmini için standart EKK yöntemi kullanılarak Denklem (3.31) olarak güncellenir.

$$\hat{A} = [\hat{H}^T(k) \cdot \hat{H}(k)]^{-1} \hat{H}^T(k) Z(k) \quad (3.31)$$

Bu sinyalin tahmin edilmiş hali Denklem (3.32) ile gerçekleştirilir.

$$\hat{Z}(k) = \hat{H}(k)\hat{A} \quad (3.32)$$

En iyi tahmin koşulunda $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ en iyi sonucu sağlaması gerekir. Ancak $\hat{\phi}_n$ ve $\hat{\omega}_n$ değerleri her zaman en iyi çözüm olmayabilir ve bu değerlerin 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 (3.33)'deki gibi güncellenir.

Bu işlem nihai yakınsama koşuluna ulaşıncaya kadar tekrarlanır.

$$J = \sum_{k=1}^K (Z(k) - \hat{Z}(k))^2 \quad (3.34)$$

3.4. PSO-PC Algoritması ile Harmonik Tahmini

PSO, Kennedy ve Eberhart tarafından önerilmiş popülasyon tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algortmada popülasyon bir sürü olarak adlandırılır. Popülasyondaki her birey bir parçacık olarak adlandırılır. k. iterasyondaki i. parçacık aşağıdaki iki özelliğe sahiptir:

- Birinci özellik: N boyutlu arama uzayındaki mevcut pozisyon

$$X_i^k = (x_{i,1}^k, \dots, x_{i,n}^k, \dots, x_{i,N}^k) \quad (3.35)$$

Burada $x_{i,n}^k \in [l_n, u_n]$ ve $1 \leq n \leq N$

l_n ; n. boyutun alt sınırı

u_n ; n. boyutun üst sınırlarıdır.

- İkinci özellik: N boyutlu mevcut hız vektörü

$$V_i^k = (v_{i,1}^k, v_{i,2}^k, \dots, v_{i,N}^k)$$

Burada hız $V_{\max}^k (v_{\max,1}^k, \dots, v_{\max,N}^k)$ ve minimum hız $V_{\min}^k (v_{\min,1}^k, \dots, v_{\min,N}^k)$ ile sınırlıdır.

PSO' nun her bir iterasyonunda, sürü aşağıdaki denklemler kullanılarak güncellenir:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) \quad (3.36)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.37)$$

Burada P_i , i. parçacığın en iyi önceki pozisyonunu (pbest) ifade eder. P_g ise , sürüdeki tüm parçacıklar arasında en iyi pozisyonu (gbest) temsil eder. r_1 ve r_2 değerleri, (0,1) aralığında iki farklı uniform rastgele diziden türetilmiş elemanlardır:

$$r_1 \sim U(0,1), \quad r_2 \sim U(0,1)$$

ω ise bir atalet ağırlığıdır ve genellikle [0,1] aralığında başlatılır. Daha büyük bir atalet ağırlığı, küresel keşfi kolaylaştırırken, daha küçük bir atalet ağırlığı yerel aramayı destekler.

Atalet ağırlığı, mevcut arama alanını daha hassas ayarlamak için küresel keşfi kolaylaştırır. C1 ve C2, hızlanma katsayıları olarak görev yapar ve bir parçacığın her iterasyonda nasıl hareket edeceğini belirler.

PSO' da pasif yığılma, bireylerin yalnızca komşularından değil, aynı zamanda kendi bilgilerini kullanarak gerekli verileri alabilecekleri özel bir biyolojik mekanizmaya dayanır. Bu mekanizma, sürüdeki bireylerin yanlış algılamalarını azaltma şansını artırır. Standart PSO' u basit ve etkili tutmak için, PSOPC aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) + c_3 r_3 (R_i^k - X_i^k) \quad (3.38)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.39)$$

Burada:

- R_i , sürüden rastgele seçilmiş bir parçacıktır,
- c_3 , pasif yığılma katsayısını ifade eder,
- r_3 , (0,1) aralığında rastgele bir dizidir ve $r_3 \sim U(0,1)$ olarak tanımlanır.

Önerilen PSOPC algoritmasında, her bir harmonik için başlangıçta rastgele faz veya frekans değerleri atanır. Daha sonra, EKK yöntemi kullanılarak genlikler tahmin edilir. Bu aşamada faz, genlik ve frekans değerleri ile parçacığın uygunluk değeri hesaplanır:

- $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]$, fazlar vektörünü temsil eder.
- $F = [f_1, f_2, \dots, f_N]$, her armoniğin frekanslarını temsil eder.

Bir parçacık $X_i = [\Phi \ F]$ ile gösterilir. Önerilen algoritmanın sözde kodu Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. PSO-PC Algoritmasının Sözde Kodu

k: = 1 ayarla

Tüm parçacıkların pozisyonlarını ve hızlarını rastgele başlat, $X_i = [\Phi \ F]$;

WHILE (sonlandırma koşulları karşılanmadığında)

FOR (sürüdeki her bir parçacık i için)

Tablo 3.6. (Devamı) PSO-PC Algoritmasının Sözde Kodu

Genlikleri hesapla: Her bir harmonik genliklerini EKK yöntemi ile denklem (3.26) kullanarak hesapla:

$$\hat{A} = [\hat{A}_1, \dots, \hat{A}_N]^T$$

Uygunluk değerini hesapla: Mevcut parçacığın uygunluk değerini $J(X_i)$ kullanarak hesapla denklem (3.28)

pbest'i güncelle: pbest'in uygunluk değerini $J(X_i)$ ile karşılaştır. Eğer $J(X_i)$, pbest'in uygunluk değerinden daha iyi ise, pbest'i mevcut pozisyon X_i olarak ayarla.

gbest'i güncelle: Sürünün en iyi global pozisyonunu bul.

Eğer $J(X_i)$, gbest'in uygunluk değerinden daha iyi ise, gbest'i mevcut parçacık X_i 'nin pozisyonu olarak ayarla.

R_i'yi güncelle: Sürüden rastgele bir parçacık seç ve bunu R_i olarak ata.

Hızları güncelle: Hızları (3.32) denkleminde göre hesapla.

Eğer $V_i > V_{max}$ ise ; V_i 'yi V_{max} değerine eşitle.

Eğer $V_i < V_{min}$ ise; $V_i = V_{min}$ olarak al.

Pozisyonları güncelle : Pozisyonları (3.33) denkleminde göre hesapla.

END FOR

$k := k + 1$ olarak ayarla

END WHILE

3.4.1. Tamsayı harmoniklerin tahmini

Tamsayı harmoniklerinin tahmininde, harmoniklerin frekansları, matris ω_n olarak ifade edilmiş olup önceden tanımlanmıştır ve temel frekansı temsil eden f_0 ile $2\pi n f_0$ değerlerine sahiptir. Bu nedenle, ω_n 'yi tahmin etmeye gerek yoktur. Önerilen algoritmada optimizasyon yöntemi olarak PSOPC kullanılmıştır.

Algoritmayı uygulamak için birkaç parametrenin başlatılması gerekmektedir. Bunlar:

- Tahmin edilecek fazların sayısı olarak N ,

- PSOPC' de kullanılan sürü büyüklüğü olarak P ,
- Maksimum nesil sayısını belirten, önceden tanımlanmış iterasyon sayısı M ,
- Ve maliyet fonksiyonunun eşik değeri olarak ϵ .

İlk iterasyonda, $\hat{\Phi}_n^1$ ($n = 1, 2, \dots, N$) değerleri rastgele seçilir. Sonuç olarak, $\hat{H}(k)$ değeri (3.25) denklemine göre hesaplanır. Daha sonra, genlik $\hat{A}^1$, (3.26) denklemine göre tahmin edilir. Son olarak $\hat{Z}^1(k)$ sinyali $\hat{\Phi}_n^1$ ve $\hat{A}^1$ ile yeniden oluşturulur. $\hat{Z}^1(k)$ ile $Z(k)$ arasındaki hata, bir sonraki iterasyondaki aramayı yönlendirmek için (3.34) denklemine göre maliyet fonksiyonuyla hesaplanır. m . İterasyonda, i . parçacığın konumu şu şekilde ifade edilir:

$$X_i^m = (\hat{\Phi}_{i1}^m, \hat{\Phi}_{i2}^m, \dots, \hat{\Phi}_{iN}^m) \quad (3.40)$$

($m+1$).iterasyonda, X_i^{m+1} parçacığı $\hat{\Phi}_n^m$ ve $\hat{A}^m$ 'e göre güncellenir. Bu işlem, maksimum iterasyon sayısı M 'ye ulaşılan veya $J < \epsilon$ koşulu sağlanana kadar tekrar eder.

3.4.2. Tümleşik harmonik analizi

Karşılaştırma amacıyla, Tablo 3.1'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 3.1'de listelenmiştir.

Test sinyali, 50 Hz'lik bir voltaj dalga formundan döngü başına 64 nokta örneklenerek alınmıştır. Algoritma hem gürültüsüz hem de gürültülü durumlarda çalıştırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında iki tür gürültü Gauss gürültüsü kullanılmıştır. Gürültü türü için sinyal gürültü oranları (SNR) sırasıyla 40 dB, 20 dB, 10 dB ve gürültüsüz olarak seçilmiştir. Bu nedenle, bu gürültüler orijinal sinyale eklenerek üç farklı sinyal üretilmiştir. Orijinal test sinyali dahil olmak üzere, her bir gürültülü durumda dört sinyal algoritma tarafından ayrı ayrı işlenmiştir.

Bu simülasyon çalışmasında, PSOPC algoritması için popülasyon boyutu ve maksimum jenerasyon sayısı sırasıyla 50 ve 100 olarak seçilmiştir. Algoritmaların durdurma kriteri,

maksimum jenerasyon sayısına ulaşılmasıdır. PSOPC gerçekleştirildiğinde, hızlanma sabitleri c_1 ve c_2 her ikisi de 0,5 olarak ayarlanmış, ataletsel ağırlık $w = 0,8$ olarak benimsenmiş ve pasif topluluk katsayısı c_3 0,6 'da sabitlenmiştir.

Bu PSOPC parametrelerinin değerleri deneylere dayalı olarak seçilmiş ve her bir deneyde yalnızca bir parametre değişken yapılırken diğerleri sabit tutulmuştur. Örneğin, pasif topluluk katsayısı c_3 , 0,0 ile 1,0 arasında on adımda seçilmiştir. $c_3 = 0.6$ olduğunda, PSOPC en iyi sonuçları üretmiştir. Sonuç olarak, c_3 0,6 olarak seçilmiştir.

3.4.3. Tek frekanslı tahmini

Simülasyon, temel frekans bileşeninin genlik ve fazını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Matris $H(k)$ şu şekilde ifade edilir:

$$H(k) = \begin{bmatrix} \sin(w_1 t_1 + \phi_1) \\ \sin(w_1 t_2 + \phi_1) \\ \vdots \\ \sin(w_1 t_k + \phi_1) \\ \vdots \\ \sin(w_1 t_K + \phi_1) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Elde edilen sonuçlar, orijinal sinyalde sunulan gerçek temel frekans bileşeniyle karşılaştırılabilir bir sinyal oluşturmak için yeniden yapılandırılmıştır. Gerçek ve tahmin edilen sinyaller, oldukça gürültülü bir durumda bile temelde aynıdır.

Performansı değerlendirmek için farklı optimizasyon yaklaşımlarının, özellikle PSOPC'nin değerlendirilmesinde yüzde hata (ϵ) bir indeks olarak alınmıştır. ϵ , şu şekilde hesaplanır:

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=1}^K (S(k) - \hat{Z}(k))^2}{\sum_{k=1}^K S(k)^2} \times 100 \quad (3.42)$$

Burada $S(k)$, orijinal sinyaldeki gerçek temel frekans bileşeninin değeridir.

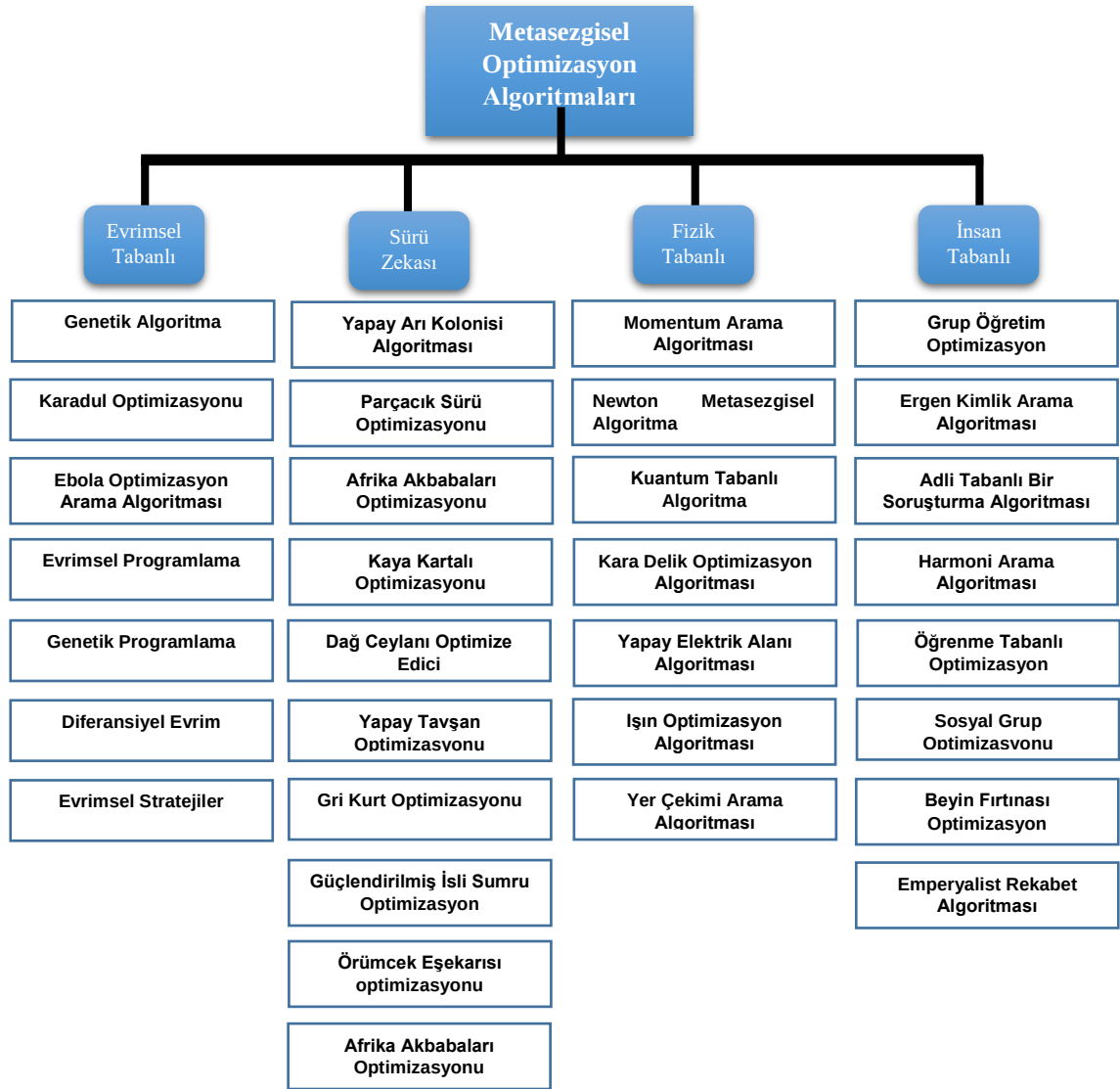
4. META SEZGİSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Optimizasyon, oluşturulmuş bir problemin belirli koşullar altında incelenerek var olan çözümler içinden en iyisini seçme işlemidir (Gökay ve Taşkın, 2002) Optimizasyon problemlerinin çözümünde matematiksel ve klasik sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Karmaşık sistemler ve problemlerde matematiksel modelin oluşturulması oldukça zor olması ve ayrıca çözüm uzayının geniş olduğu problemlerde matematiksel yöntemler maliyet açısından dezavantajlı oldukları için tercih edilmezler.

Klasik optimizasyon yöntemleri ise sürekli ve türevlenebilir amaç fonksiyonlarının optimum çözümünü bulmakta daha çok kullanılmaktadır. Değişken sayısı arttıkça problemlerin klasik optimizasyon yöntemleri ile çözümü karmaşık bir hal alarak zorlaşmakta veya bu çözümlerin sonuçlarını bulmak çok uzun süreler almaktadır (Melanie ve Forrest, 1994). Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan matematiksel ve klasik sezgisel yöntemlerin yerine günümüzde çok daha başarılı sonuçlar veren meta sezgisel optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir.

Meta sezgisel optimizasyon algoritmaları doğa olayları, canlı türlerinin sosyal davranışları ve evrimsel kavramlardan esinlenerek oluşturulmuştur (Öznur ve Korukoğlu, 2003). Bu algoritmalar çözüme ulaşmak için; Keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) mekanizmalarını kullanır. Keşif aşaması çözüme dair arama sürecini ifade ederken; sömürü aşaması ise keşif ile elde edilen alanda daha doğru bir arama sürecini ifade eder. Meta sezgisel bir optimizasyon algoritmasında keşif aşamasının yeteneği yerel optimum noktasından kurtulmasını ve farklı çözümler bulmasını sağlarken; sömürü aşamasının yeteneği ise çözümlerin optimuma yakınlığını sağlamaktadır. Bu nedenle meta sezgisel optimizasyon algoritmalarında iki aşamanın dengeli olması gerekmektedir (Albadr ve ark., 2020) Bu algoritmalar; ekonomi, ticaret, finans, enerji, çizelgeleme, görüntü işleme, optimal kontrol ve mühendislik tasarım uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Karaboğa ve Baştürk, 2007).

Meta sezgisel optimizasyon algoritmaları temel olarak 4 kategoride ele alınır: Evrimsel optimizasyon algoritmaları, sürü zekasına dayalı optimizasyon algoritmaları, fizik tabanlı optimizasyon algoritmaları ve insan tabanlı optimizasyon algoritmaları olarak sınıflandırılabilir (Özdemir, 2012). Şekil 4.1' de gösterilmiştir (Jia ve ark., 2023)



Şekil 4.1. Meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması

Bu bölümde son zamanlarda ortaya çıkmış 10 farklı meta sezgisel optimizasyon algoritması ayrıntılı olarak ele alınmış ve çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu meta sezgisel algoritmaların seçilen gerçek dünya problemleri karşısındaki performansları da bu çalışma ile ortaya çıkarılmıştır. Çalışmanın temel katkıları aşağıda sıralanmıştır:

- Literatür taramasına göre bu çalışmada kullanılan algoritmalarından dört tanesi güç sistemlerindeki bozulmalardan biri olan harmoniklerin tespitinde kullanılmıştır.
- Algoritmaların performansı çeşitli işlevler üzerinde test edilmiştir.

- Deneysel çalışmalara göre en iyi performans gösteren ve bu zamana kadar kullanılmamış meta sezgisel algoritmalar değerlendirilmiştir.

4.1. Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması (AVOA)

AVOA, Afrika akbabalarının yiyecek arama davranışları ve sosyal etkileşim davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş doğa tabanlı bir meta sezgisel yöntemdir (Abdollahzadeh ve ark., 2021). Bu algoritma, Afrika akbabalarının söz konusu davranışlarının matematiksel olarak modellenmesine dayanmakta olup, temel prensipler aşağıdaki unsurlara göre şekillendirilmiştir (Fan ve ark., 2021).

AVOA' nın matematiksel modeli aşağıdaki temel adımlara dayanmaktadır:

- **Popülasyon Büyüklüğü:** Problemle ilişkili olarak belirlenen akbaba sayısı (N), popülasyon büyüklüğünü ifade eder.
- **Akbabaların Kategorizasyonu:** Akbabalar, fiziksel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Bu ayrım yapılmadan önce, her bir akbabanın uygunluk değeri hesaplanır. En yüksek uygunluk değerine sahip akbaba en iyi bireyi temsil ederken, ikinci en yüksek uygunluk değerine sahip akbaba ise ikinci en iyi bireyi temsil eder. Her iterasyonda, bu iki en iyi akbabadan biri diğer akbabalarla değiştirilir veya yer değiştirir (Sasmal ve ark., 2024).
- **Yiyecek Arama Davranışı:** Akbabaların yiyecek arama davranışı, popülasyonun ortak hareketine dayanır. Bu, popülasyondaki bireylerin yiyecek bulma ve yakalama becerilerinin farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır (Fan ve ark., 2021).
- **Grup Üyelerinin Hareketi:** AVOA' da grup üyeleri, uygunluk değerlerine göre davranış sergiler. Daha yüksek uygunluk değerine sahip olan akbabaya yaklaşırken, uygunluk değeri en düşük olan akbabadan uzaklaşma eğilimindedirler (Fan ve ark., 2021).

AVOA' nın matematiksel modeli aşağıdaki adımlar ile açıklanmıştır.

4.1.1. En iyi Akbaba seçimi

AVOA da önce başlangıç popülasyonu oluşturulur. Sonra akbabaların uygunluk değeri hesaplanır. En yüksek uygunluk değerine sahip akbaba, birinci grubun en iyi akbabası; ikinci en yüksek uygunluk değerine sahip akbaba ise, ikinci grubun en iyi akbabası olarak seçilir. Her bir adımda bu seçim aşağıdaki gibi tekrarlanır. Bu durum Denklem 4.1 ile gösterilmiştir (Abdollahzadeh ve ark., 2021)

$$R(i) = \begin{cases} \text{En iyi akbaba}_1 & \text{eğer } p_i = L_1 \\ \text{En iyi akbaba}_2 & \text{eğer } p_i = L_2 \end{cases} \quad (4.1)$$

L_1 0-1 arasındaki parametre

L_2 , 0-1 arasındaki parametre ve

$L_1 + L_2 = 1$ dir.

Denklem 4.2 kullanılarak her grup için en iyi çözümlerin seçilme olasılığı, rulet çarkı yöntemi kullanılarak hesaplanır. Bu yöntem, her bir çözümün seçilme olasılığını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır.

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (4.2)$$

F_i ; i . akbabanın uygunluk değeri

n ; toplam akbaba sayısı

4.1.2. Akbabaların açıklık oranı

Akbabalar, yüksek enerji seviyesine sahip olduklarında genellikle yiyecek arama davranışı sergilerler. Bu durum, onların daha uzun mesafelerde yiyecek aramalarını mümkün kılmaktadır. Ancak, enerji seviyeleri düşük olduğunda uzun mesafelere gidemezler. Enerjileri yetersiz olan akbabaların, kendilerinden daha güçlü olan akbabaları takip etmeleri durumu, Denklem 4.3 ile aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Abdollahzadeh ve ark., 2021)

$$F = (2 \times \text{rand}_1 + 1) \times z \times \left(1 - \frac{\text{iterasyon}_i}{\text{maksimum}_{\text{iterasyon}}}\right) + t \quad (4.3)$$

F akbaların doyduğunu, iteration i , geçerli yinelemeyi, $\text{max}_{\text{iterasyon}}$ ve z yinelemeyi değiştiren -1 ile +1 arasındaki rastgele bir değerdir. Rand ise 0 ile 1 arasındaki rastgele bir sayıdır.

Denklem 4.4' te yer alan t aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$t = h \times \left(\sin^w \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\text{iterasyon}_i}{\text{maksimum}_{\text{iterasyon}}} \right) + \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\text{iterasyon}_i}{\text{maksimum}_{\text{iterasyon}}} \right) - 1 \right) \quad (4.4)$$

h , -2 ile +2 arasındaki rastgele bir sayı.

w , sabit bir sayı

w , keşif ve operasyon aşamalarında bilgi veren bir parametredir. w değeri arttıkça keşif aşamasına girme olasılığı artarken; azalması durumunda ise arama aşamasına girme olasılığı azalır. (Ali, A. ve ark., 2023)

$$t = h \times \left(\sin^w \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\text{iterasyon}_i}{\text{maksimum}_{\text{iterasyon}}} \right) + \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\text{iterasyon}_i}{\text{maksimum}_{\text{iterasyon}}} \right) - 1 \right) \quad (4.5)$$

h , -2 ile +2 arasındaki rastgele bir sayıdır. w , sabit bir sayı olup keşif ve operasyon aşamaları hakkında bilgi veren bir parametredir. w değeri arttıkça keşif aşamasına girme olasılığı artarken; azalması durumunda ise arama aşamasına girme olasılığı azalır.

4.1.3. Keşif aşaması

Denklem 4.3 ile hesaplanan F değerinin 1'den büyük olduğu durumlarda, akbabalar keşif aşamasında bulunur. Bu aşamada akbabalar, yiyecek tespit etme ve ölmekte olan hayvanları fark etme konularında oldukça yeteneklidir. Ayrıca, uzun süre yiyecek bulamadıklarında uzun mesafeler kat edebilirler. Algoritmanın başlatılmasının ardından keşif aşamasında, alan taraması yapmak için öncelikle p_1 parametresi, 0 ile 1 arasında bir değer alacak şekilde belirlenir. Daha sonra, kullanılacak iki farklı keşif yönteminden birini seçmek amacıyla, yine $[0,1]$ aralığında bir değer olan $rand_{p_1}$ rastgele seçilir (Zhang ve ark., 2022). Keşif yöntemini belirlemek için kullanılan denklemler şu şekildedir (Abdollahzadeh ve ark., 2021)

$$P(i + 1) = \begin{cases} \text{Denklem(2.57) eğer } P_1 \geq rand_{p_1} \\ \text{Denklem(2.59) eğer } P_1 < rand_{p_1} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$P(i + 1) = R(i) - D(i) \times F \quad (4.7)$$

$$D(i) = |X \times R(i) - P(i)| \quad (4.8)$$

$$P(i + 1) = R(i) - F + rand_2 \times ((ub - lb) \times rand_3 + lb) \quad (4.9)$$

Bu ifadelerde $P(i+1)$, bir sonraki iterasyondaki konum vektörünü ifade eder. F , akbabaların doyma oranını temsil ederken, $R(i)$ seçilen en iyi akbabalardan birini belirtir. X , akbabaların yiyeceklerini diğer akbabalardan korumak için hareket ettikleri konumu ifade etmektedir. $ub - lb$ sırasıyla üst ve alt sınırları tanımlar. $D(i)$ ise, mevcut akbabanın en iyi akbabayla arasındaki konumunu ifade eder. Ayrıca, $rand_1$, $rand_2$ ve $rand_3$, rastgele oluşturulan sayıları temsil eder.

4.1.4. Sömürü aşaması

Denklem (4.3)'de hesaplanan F değerinin 1' den küçük olduğu durumda, akbabalar sömürü aşamasına geçer. AVOA' daki sömürü aşaması, iki alt aşamadan oluştur ve her

bir aşamada farklı stratejiler uygulanır (Sasmal ve ark., 2024). Bu stratejilerin seçiminde p_2 ve p_3 parametreleri kullanılır, birinci aşamadaki strateji seçiminde, p_3 ise ikinci aşamadaki strateji seçiminde rol oynar. F değeri 1 ile 0,5 arasında olduğunda, sömürü sürecinin ilk aşama gerçekleşir. Bu aşamada, akbabalar dönüşümlü uçuş ve kuşatma savaşı stratejilerini uygular. p_2 parametresinin değeri bu aşama öncesinde tanımlanır ve ardından $rand_2$ rastgele bir değer olarak üretilir. Dönüşümlü uçuş veya kuşatma stratejileri, Denklem 4.10 ile belirlenir.

$$P(i + 1) = \begin{cases} \text{Denklem (2.61) eğer } P_2 \geq rand_{p_2} \\ \text{Denklem (2.65) eğer } P_2 < rand_{p_2} \end{cases} \quad (4.10)$$

F , değerinin 1 – 0,5 arasında olduğu durumlarda, akbabalar tok ve yeterli enerjiye sahiptir. Bu enerji seviyesi, akbabaların bir besin kaynağına yönelirken kendi aralarında çatışmalara yol açmasına neden olur. Bu davranış, matematiksel olarak Denklem 4.11 ifade edilmiştir.

$$P(i + 1) = D(i) \times (F + rand_4) - d(t) \quad (4.11)$$

$$d(t) = R(i) - P(i) \quad (4.12)$$

$rand_4$, rastgele katsayısını artırmak için kullanılan 0 ve 1 arasındaki rastgele bir sayıdır.

Akbabalar dönel uçuş stratejileri ile dönme hareketini gerçekleştirirler. Bu hareket spiral modelle ifade edilmiştir. Bu yöntemde tüm akbabalar ile en iyi iki akbabadan biri arasında sarmal bir denklem oluşturulur. Bu denklemler aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$S_1 = R(i) \times \left(\frac{rand_5 \times P(i)}{2\pi} \right) \times \cos(P(i)) \quad (4.13)$$

$$S_2 = R(i) \times \left(\frac{rand_6 \times P(i)}{2\pi} \right) \times \sin(P(i)) \quad (4.14)$$

$$P(i + 1) = R(i) - (S_1 - S_2) \quad (4.15)$$

Sin ve *cos* parametreleri sinüs ve kosinüs fonksiyonlarını temsil eder. $rand_5$ ve $rand_6$ 0 ve 1 arasında rastgele değerler alan parametre olarak seçilir. Akbabaların konumu denklem 4.16 ile tekrar güncellenir.

F değerinin 0,5' ten daha küçük olduğu durumlarda sömürünün ikinci aşaması gerçekleştirilir. Bu aşamada, iki akbabanın hareketleri diğer akbabaların yiyecek kaynağı üzerinde birikmelerine sebep olur ve bu durum rekabetin yanında yiyecek arama çatışmalarına yol açar. Bu aşama öncesinde $rand_{p_3}$ olarak tanımlanan 0 ve 1 arasında değer alan parametre üretilir.

Eğer $rand_{p_3}$, p_3 değerinden büyük veya ona eşit ise; besin kaynağı etrafında akbabalar toplanır.

Eğer üretilen değer p_3 parametresinden küçük ise; agresif kuşatma savaşı uygulaması yapılması gerekir. Denklem 4.28 ile gösterilmiştir.

$$P(i + 1) = \begin{cases} \text{eğer } P_3 \geq rand_{p_3} \\ \text{eğer } P_3 < rand_{p_3} \end{cases} \quad (4.16)$$

Akbabaların beslenme kaynağındaki tüm hareketleri gözlemlenir. Akbabaların yiyecek bulmada zorluk çektiği zamanlarda, akbabalar arasında besin kaynağı için yoğun bir rekabet oluşur ve bu durum farklı akbaba türlerinin bile aynı besin kaynağında toplanması ile sonuçlanır. Bu durum aşağıdaki denklemlerle gösterilmiştir.

$$A_1 = \text{En iyi akbaba}_1(i) - \frac{\text{En iyi akbaba}_1(i) \times P(i)}{\text{En iyi akbaba}_1(i) - P(i)^2} \times F \quad (4.17)$$

$$A_2 = \text{En iyi akbaba}_2(i) - \frac{\text{En iyi akbaba}_2(i) \times P(i)}{\text{En iyi akbaba}_2(i) - P(i)^2} \times F \quad (4.18)$$

En iyi akbaba₁(*i*), mevcut tekrarlardaki birinci gruptaki en uygun 1. akbabayı, En iyi akbaba₂(*i*) ise ikinci gruptaki en uygun 1. Akbabayı temsil eder. *P*(*i*) akbabanın mevcut durumdaki pozisyonunu tanımlar. Tüm akbabaları birleştirme işlemi aşağıdaki gibidir.

$$P(i + 1) = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (4.19)$$

Gruplardaki baş akbabaların yeterli beslenmeleri sonucunda diğer akbabalar zayıf düşerler ve yiyecek arayan akbabalarla mücadele için yeterince enerjiye sahip olamazlar. Diğer akbabalar da beslenemediklerinden saldırganlaşırlar. Bu durum Denklem 4.20 ile tanımlanmıştır.

$$P(i + 1) = R(i) - |d(t)| \times F \times \text{Levy}(d) \quad (4.20)$$

d(*t*), akbabanın gruplardaki en iyi akbabaya olan mesafeyi tanımlar. Levy ise Denklem 4.21 ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$LF(x) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}, \sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma(1 + \beta/2) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.21)$$

d problem boyutunu, *u* ve *v* 0 ve 1 arasında değer alabilen rastgele değişkenlerdir. *β* ise değeri 1,5 olan bir sabittir.

4.2. Dağ Ceylanı Optimizasyonu (MGO)

Dağ Ceylanı Optimizasyonu, dağ ceylanlarının sosyal yaşamlarından ve aralarındaki hiyerarşik düzenlerinden ilham alınarak geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, ceylanların yaşam döngüsündeki dört temel davranış

biçimini temel alır: bekar erkek sürüleri, doğum sürüleri, bölgesel bekar erkekler ve yiyecek bulma amacıyla gerçekleştirilen göç davranışı. (Abbassi ve ark., 2023)

Algoritmada her bir ceylan X_i , bekar erkek sürüsünün, doğum sürüsünün veya bölgesel erkek sürüsünün bir üyesi olarak temsil edilebilir. MGO' nun matematiksel modeli, bu davranış biçimlerini sistematik olarak modellemek ve çözüm alanını etkili bir şekilde keşfetmek için geliştirilmiştir. Algoritma, ceylanların bireysel ve grup düzeyindeki etkileşimlerini simüle ederek, çözüm uzayında güçlü bir keşif ve sömürü dengesine ulaşmayı hedefler. (Khodadadi ve ark., 2023)

4.2.1. Bölgesel bekar erkekler

Erkek dağ ceylanları, yetişkinlik dönemine ulaşp yeterli güce eriştiklerinde kendilerine ait bir bölge oluştururlar. Bu bölgeler, genellikle birbirinden oldukça uzak mesafelerde yer alır ve bu şekilde erkek ceylanlar bölgesel bir yaşam sürerler. Erkek ceylanlar, dişiler üzerinde hakimiyet kurmak ve bölgelerini savunmak amacıyla sıkça rekabet ederler. Genç erkek ceylanlar, bir bölge işgal etmek veya dişiler üzerinde hakimiyet kurmak istediklerinde, yetişkin erkek ceylanların koruma içgüdüsüne dayalı agresif davranışlarıyla karşılaşır. (Alomoush ve ark., 2024)

4.2.2. Doğum sürüleri

Dağ ceylanları, erkek yavrular üretmek için doğum sürülerine bağımlı olan bir ceylan türüdür. Erkek ceylanlar, dişi elde etmeye çalışan genç erkeklerle yardımlarının yanında, dişi ceylanların doğumuna da yardımcı olabilirler. (Sarangi, P. & Mohapatra, P., 2023).

4.2.3. Bekar erkek sürüleri

Erkek ceylanlar olgunlaştıkça yeni bölge üretme ve dişi ceylanlar üzerinde kontrolü ele geçirme eğilimindedir. Bu noktada genç erkek ceylanlar dişiler üzerinde hâkimiyet kurmak için yetişkin erkeklerle mücadele etmeye başlar ve aralarında şiddet ortaya çıkabilir.

4.2.4. Yiyecek aramaya geçiş

Dağ ceylanları, otlamak ve yiyecek kaynağı bulabilmek için sürekli uzun yolculuklar yaparlar. Bu yolculuklarını, yüksek hızlı koşma ve atlama becerileri yardımıyla gerçekleştirirler. Dağ ceylanlarının bu davranışı aşağıdaki gibi gösterilir.

$$MSF = (ub - lb) \times r_7 + lb \quad (4.22)$$

ub ; üst sınır

lb ; alt sınır

r_7 ; 0 ve 1 arasındaki rastgele bir sayıdır.

Yeni nesil dağ ceylanlarının oluşturulması için yukarıda tanımlanan dört mekanizma, popülasyonun tüm bireylerine uygulanır. Bu süreçte, popülasyona yeni bir nesil dahil edilir ve her nesil, önceki neslin bir kopyası olarak değerlendirilir. Her nesilde, ceylanlar çözüm kalitelerine göre sıralanır. Daha iyi çözüm kalitesine ve düşük maliyete sahip olan en iyi bireyler, toplam popülasyonda korunur. Buna karşın, yaşlı ya da zayıf olarak değerlendirilen bireyler, popülasyondan çıkarılır. En iyi çözümü temsil eden ceylan, aynı zamanda bölgenin sahibi olan yetişkin erkek ceylan olarak kabul edilir (Gülmez, B., 2023)

4.3. Yapay Tavşan Optimizasyon Algoritması (ARO)

2022 yılında önerilen Yapay Tavşan Optimizasyon Algoritması ARO; tavşanların yiyecek arama, rastgele saklanma ve enerji küçültme stratejilerini taklit eden bir meta sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Optimizasyon algoritmalarının temeli olan keşif aşaması ARO ‘da yiyecek arama davranışına, sömürü aşaması ise rastgele saklanma aşamasına karşılık gelir. ARO’ da keşif aşamasından sömürü aşamasına geçiş, enerji küçültme stratejisi ile gerçekleştirilmektedir. (Bakır, H., 2024)

4.3.1. Başlatma aşaması

ARO' da ilk adım, aday çözümlerin(tavşan) rastgele olarak konumlandırılarak uygunluk değerleri hesaplanır. Aşağıda aday çözümlerin rastgele konumlandırılması ile ilgili ise aday çözümlerin uygunluk değeri hesaplanması ile ilgilidir. (Turgut ve ark., 2022)

$$\vec{x}_{i,d} = lb_d + \text{rand} \times (ub_d - lb_d) \quad i = (1, 2, \dots, N) \text{ ve } d = (1, 2, \dots, D) \quad (4.23)$$

$\vec{x}_{i,d}$ i . tavşanın konum vektörü,

N ; tavşan sayısı

D ; problem boyutu,

tasarım parametreleri; ub_d ve lb_d d . boyutun alt ve üst sınırlarıdır.

$$P \equiv \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,D} \end{bmatrix}_{N \times D} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (4.24)$$

P tavşan popülasyonunu, f uygunluk değerini ifade eder.

4.3.2. Dolambaçlı yiyecek arama

ARO ile dolambaçlı yiyecek aramada popülasyondaki her bir tavşan başlatma aşaması ile rastgele olarak konumlandırılmıştır. Her bir konumdaki tavşanın yiyecek ve saklanma için tek yuvaya sahip olduğu varsayılmaktadır. Tavşanlar, yiyecek arama işlemlerini kendi bulundukları konumda değil de komşu tavşanların konumlarında yaparlar. Tavşanların bu şekilde yiyecek arama hareketine dolambaçlı yiyecek arama (keşif) denir. Bu davranış modeli aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. (Wang ve ark., 2022)

$$\vec{v}_i(t+1) = \vec{x}_j(t) + R \cdot (\vec{x}_i(t) - \vec{x}_j(t)) + \text{round}(0.5 \cdot (0.05 + r_1)) \cdot n_1 \quad (4.25)$$

$i, j = 1, \dots, n$ ve $j \neq i$

$$R = L \cdot c \quad (4.26)$$

$$L = \left(e - e^{\left(\frac{t-1}{T}\right)^2} \right) \cdot \sin(2\pi r_2) \quad (4.27)$$

$$c(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } k == g(l) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad k = 1, \dots, d \text{ and } l = 1, \dots, [r_3 \cdot d] \quad (4.28)$$

$$g = rand_{perm}(d) \quad (4.29)$$

$$n_1 \sim N(0,1) \quad (4.30)$$

$\vec{v}_i(t+1)$, $t+1$. anındaki i . tavşan konumunu, $\vec{x}_i(t)$, t anındaki tavşan konumunu, N popülasyon büyüklüğünü, t o anki iterasyonu, T max iterasyon sayısını ifade eder. $rand_{perm}$ 1' den d ' ye kadarki tam sayıların geriye döndürüldüğü bir permütasyon değeridir. r_1, r_2 ve r_3 0 ile 1 arasındaki rastgele bir sayıdır. L modeldeki hareket hızını temsil eden koşu uzunluğudur. n_1 ise standart normal bir dağılımdır.

4.3.3. Rastgele saklanma

ARO' da her bir yinelemede her bir tavşan kendi çevresinde rastgele yuva oluştururlar. Tehditlere karşı korunmak için tavşanlar saklanmak amacıyla kendi yuvaları yerine komşu tavşanların oluşturmuş olduğu yuvalardan birini rastgele seçerler. Denklem 4.31 ile bir tavşanın çevresinde oluşturmuş olduğu yuvalar gösterilmiştir. Diğer denklemler (2.84-2.86) bu denklemin hesaplanması için kullanılmaktadır.

$$\vec{b}_{i,j}(t) = \vec{x}_i(t) + H \cdot g \cdot \vec{x}_i(t), i = 1, \dots, n \text{ and } j = 1, \dots, d \quad (4.31)$$

$$H = \frac{T - t + 1}{T} \cdot r_4 \quad (4.32)$$

$$n_2 \sim N(0,1) \quad (4.33)$$

$$g(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } k == j_k = 1, \dots, d \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4.34)$$

H , gizleme parametresidir ve doğrusal olarak yinelemeler boyunca 1' den $1/T$ 'ye düşer. $\vec{b}_{i,j}$, i . tavşanın j . yuvasıdır. n_2 ise standart normal bir dağılımdır.

Tehditlere karşı tavşanlar rastgele olarak komşu tavşanların yapmış oldukları yuvalardan birini rastgele seçerler. Bu seçme işlemi aşağıda gösterilmiştir.

$$\vec{v}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + R \cdot (r_4 \cdot \vec{b}_{i,r}(t) - \vec{x}_i(t)), i = 1, \dots, n \quad (4.35)$$

$$g_r(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } k == \lceil r_5 \cdot d \rceil \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad k = 1, \dots, d \quad (4.36)$$

$$\vec{b}_{i,r}(t) = \vec{x}_i(t) + H \cdot g_r \cdot \vec{x}_i(t) \quad (4.37)$$

$\vec{b}_{i,r}$, i . tavşan tarafında rastgele seçilmiş yuvayı, r_4 ve r_5 0 ile 1 arasındaki rastgele bir sayıdır.

AROA' da dolambaçlı yiyecek arama ve rastgele saklanma gerçekleştikten sonra konum güncellemesi yapılır. Konum güncelleme denklemi Denklem 4.38 ile ortaya çıkarılmaktadır.

$$\vec{x}_i(t+1) = \begin{cases} \vec{x}_i(t) & f(\vec{x}_i(t)) \leq f(\vec{v}_i(t+1)) \\ \vec{v}_i(t+1) & f(\vec{x}_i(t)) > f(\vec{v}_i(t+1)) \end{cases} \quad (4.38)$$

Denklem 2.90 ile mevcut konum uygunluk değeri aday çözüme ait uygunluk değerinden daha iyiyse yer değiştirme yapılmaz, iyi değilse yer değiştirme yapılır.

4.3.4. Enerji küçültme

ARO' da enerji seviyesine göre tavşanlar ilerlemeler arttıkça keşif aşamasından sömürü aşamasına geçerler.

$$A(t) = 4 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \ln \frac{1}{r} \quad (4.39)$$

r değeri 0 ile 1 arasında rastgele bir değerdir. $A(t) > 1$ ise, Tavşanlar yiyecek arama yani keşif aşamasında; $A(t) < 1$ olduğunda ise rastgele saklanma yani sömürü aşamasındadırlar.

4.4. Örümcek Eşekarısı Optimizasyonu (SWO)

SWO, örümcek eşek arılarının (dişiler) doğada avlanırken, yuva yaparken ve çiftleşirken yaptıklarını taklit eden yeni önerilen bir sürü optimizasyon algoritmasıdır; 2023 yılında Faramarzi ve arkga., (2020) tarafından önerilmiştir. Dişi örümcek eşekarıları, kendilerine uygun avı (örümcek) ve yuvaları bulmak ve beslenmek ve yumurtalarını bırakmak için kullandıkları benzersiz avlanma ve yuvalama davranışlarına sahiptir.

İlk olarak, arama davranışı sergiler. Sonrasında larval evrim için uygun örümceği elde etmek için optimizasyon adımlarının başında yiyecek/avı hedefler. Üçüncüsü, yuvalama tutumu, avı yumurta ve av için uygun büyüklükteki yuvalara çekme yöntemini taklit eder. Dördüncüsü, çiftleşme davranışı, erkek ve dişi eşek arıları arasındaki tekdüze çaprazlama operatörünü kullanarak yumurtanın çatlatılmasıyla oluşturulan yavruların özelliklerini, çaprazlama oranı (CR) olarak adlandırılan belirgin bir olasılıkla taklit eder. (Abdel-Basset, M., ve ark., 2023)

SWO algoritması, örümcek yaban arılarının avlanma, yuvalama ve çiftleşme davranışlarından esinlenerek tasarlanmış yeni bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma, çözüm uzayında arama, avın takibi ve felç edilerek yuvaya taşınmasını içeren süreçleri simüle eder. İlk olarak, örümcek yaban arıları, rastgele bir başlangıç popülasyonu olarak çözüm uzayında dağıtılır. Arama davranışı, en uygun çözümleri bulmak için optimizasyon sürecinin başlangıcında gerçekleştirilir.

Daha sonra, avın kaçma girişimlerine karşı yuva hazırlığı ve saldırı süreçleri simüle edilir. Çiftleşme davranışları ise, çözüm çeşitliliğini artırmak için çaprazlama işlemiyle temsil edilir. Optimizasyon sürecinde, daha güçlü çözümler korunurken zayıf çözümler popülasyondan çıkarılır. Ayrıca, popülasyon azaltma mekanizması sayesinde, algoritma optimum çözüme yakınsama hızını artırır.

Algoritmanın zaman karmaşıklığı, popülasyon büyüklüğü, boyut sayısı ve maksimum değerlendirme sayısı gibi faktörlere bağlıdır. SWO, avlanma, yuvalama ve çiftleşme davranışlarının büyüme oranlarına dayanarak, büyük-O notasyonunda zaman karmaşıklığını optimize eder. Bu süreçler, algoritmanın çeşitli optimizasyon problemlerinde etkili şekilde kullanılmasını sağlar.

4.4.1. Kavramsal temeller

SWO algoritması, doğada örümcek arılarının şu davranışlarını matematiksel olarak modellemiştir:

1. Avlanma ve Av Etkileşimi: Örümcek arıları, avlarının hareketlerini ve tepkilerini dikkatlice gözlemler ve saldırı stratejilerini buna göre şekillendirir. Bu davranış, algorithmada çözüm alanını keşfetmek için kullanılır.
2. Yuva İnşa Stratejileri: Örümcek arıları, yuva kurmak için ideal bölgeleri belirler. Bu davranış, çözümlerin optimize edilmesi için sömürü stratejilerine yansıtılır.
3. Enerji Yönetimi: Arılar, enerji tüketimlerini optimize ederek avlanma ve yuva kurma süreçlerinde en uygun stratejileri uygular. Bu, algoritmanın adaptif davranışlarını destekler.

SWO algoritması çeşitli mühendislik optimizasyon problemleri, enerji yönetimi, rota planlaması ve makine öğrenimi gibi alanlarda başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Özellikle, çözüm kalitesini artırmak ve yerel optimal sorunlarından kaçınmak için alternatif meta-sezgisellerle karşılaştırıldığında, etkili bir performans sergilemiştir.

SWO algoritması hem parametre gereksinimlerinin düşük olması hem de basit bir yapıya sahip olması nedeniyle kullanımı kolaydır. Bununla birlikte, büyük boyutlu problemler veya karmaşık çözüm alanlarında, çözüm çeşitliliği sorunları ortaya çıkabilir. Bu

sınırlamaları aşmak için algoritmanın kaotik haritalama, adaptif öğrenme stratejileri ve hibrit yaklaşımlarla geliştirilmiş versiyonları önerilmektedir.

SWO algoritması, biyolojik davranışların optimizasyon süreçlerine uyarlanması konusunda yenilikçi bir yaklaşımı temsil etmekte ve farklı problem alanlarında önemli sonuçlar sunmaktadır. Detaylı uygulamalar ve karşılaştırmalı analizler için algoritmanın literatürdeki açıklamalarına başvurulabilir.

4.4.2. Matematiksel model

SWO algoritması, başlangıç popülasyonunu (örümcekler ve avlar) rastgele bir şekilde çözüm alanında başlatır. Algoritmanın iteratif süreçlerinde, bireyler (örümcekler) çözüm alanını keşfeder ve avlarına (çözümlere) odaklanarak bu çözümleri iyileştirir. Keşif aşamasında, bireyler çözüm uzayının geniş bir alanını tarar ve farklı potansiyel çözümleri araştırır. Sömürü aşamasında ise mevcut en iyi çözümlere odaklanarak yerel iyileştirmeler yapılır.

4.5. Kaya Kartalı Optimizasyon Algoritması (AO)

Kaya Kartalı Optimizasyon Algoritması AO, kaya kartallarının avlanma ve avlarını yakalama becerilerinden ilham alan popülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemidir. Bu algorithma Kaya kartalları tarafından kullanılan avlanma ve av yakalama yöntemleri şu şekildedir:

- Birinci yöntem, dikey eğimli yüksek uçuş,
- İkinci yöntem, kısa süzülme saldırısıyla kontur uçuşu
- Üçüncü yöntem, yavaş alçalma saldırısı ile alçak uçuş,
- Dördüncü yöntem, Kaya kartalının yürüyerek avını yakalaması olarak ifade edilir.

Birinci yöntemde kaya kartallarının yükseklerde uçuşu sırasındaki avlanmalarından esinlenilmiştir. Kaya kartalı, av bulduklarında, ava doğru dikey bir dalış gerçekleştirir. İkinci yöntem, kaya kartallarının yerden düşük bir seviyedeki uçuşu esnasındaki avlanma yöntemidir kısa süzülme saldırısıyla kontur uçuşu şeklindedir. En sık olarak tercih edilen avlanma yöntemidir. Orman tavuğu, yer sincapları ve deniz kuşları avı için bu yöntem

özellikle tercih edilmektedir. Üçüncü yöntemde ise, kaya kartallarının yere inerek ve sonrasında avına saldırarak avlanması şeklindedir. Kaya kartalları bu yöntem ile avını boynundan ve sırtından yakalayarak avlar. Daha çok yavaş hareket eden avlar için kullanılan bir yöntemdir. Son yöntemimiz Dördüncü yöntem ise, Kaya kartalının yürüyerek avını yakalamasıdır. Kaya kartalları av için yere inerek avı yakalar. Bu yöntem daha çok büyük avların yavrularını avlamak için tercih edilir. (Abualigah, L., ve ark., 2021)

4.5.1. Başlatma

AOA, Denklem 4.40' da gösterildiği gibi rastgele oluşturulan bir aday çözüm havuzu ile başlatılır.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,D-1} & x_{1,D} \\ x_{2,1} & \ddots & \cdots & \ddots & x_{2,D} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ x_{N-1,1} & \ddots & \cdots & \ddots & x_{N-1,D} \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \cdots & x_{N,D-1} & x_{N,D} \end{bmatrix}_{N \times D} \quad (4.40)$$

X her bir bireyi,

N aday çözüm sayısını,

D ise problem boyutunu ifade etmektedir.

Denklem 4,40'da her bir aday çözüm aşağıda yer alan Denklem 4.41 ile hesaplanır.

$$X_{ij} = \text{rand} * (UB_j - LB_j) + LB_j, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, D \quad (4.41)$$

X_i i . çözümün değerini, LB_j j . alt sınırı, UB_j j . üst sınırı ve rand ise rastgele bir sayıyı tanımlar.

4.5.2. Genişletilmiş keşif

Kaya kartalları, en iyi avlanma alanını seçerken yüksekte uçarak av bölgesini tanır. Bu av bölgesinde geniş çapta keşifler yapılır. Av bulunduğu zaman av bölgesine dikey bir dalış gerçekleştirir. Bu hareket Denklem 4.42 ile gösterilmiştir. Akyol, S. (2021).

$$X_1(t + 1) = X_{\text{en iyi}}(t) \times \left(\frac{1 - t}{T}\right) + (X_M(t) - X_{\text{en iyi}}(t) \times \text{rand}) \quad (4.42)$$

$X_1(t + 1)$; t 'den bir sonraki adım zm

X_1 ; ilk aday zm,

$X_{\text{en iyi}}(t)$; t . adımdaki en iyi aday zm,

$\left(\frac{1-t}{T}\right)$ ise keşif kontrolü tanımlar.

$X_M(t)$; t . adımdaki üzümlerin ortalamasını hesaplar.

Rand ; 0 ile 1 arasındaki rastgele bir sayı seçilir.

4.5.3. Daraltılmış keşif

Kaya kartalları yüksek uçuş ile av bölgesini belirler. Daha sonra kaya kartalı, hedefin üzerinde daireler çizerek inmeye hazırlanır ve iniş gerçekleştirdiği anda avına saldırır. Bu kaya kartallarının kısa süzülme saldırısıyla kontur uçuşuna 2.avlanma yöntemi denmiştir. Bu davranış Denklem 4.43 ile gösterilmiştir (Aydemir, S. B.,2022).

$$X_2(t + 1) = X_{\text{en iyi}}(t) * \text{Levy}(D) + X_R(t) + (y - x) * \text{rand} \quad (4.43)$$

$X_2(t + 1)$, $t + 1$.adımındaki üzümdür. $X_R(t)$, t . iterasyonundaki $[1 \text{ N}]$ aralığındaki rastgele bir üzümdür. $\text{Levy}(D)$ levy flight dağılım fonksiyonudur ve Denklem 4.44 ile hesaplanmaktadır. (Sasmal ve ark., 2024).

$$\text{Levy}(D) = s \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (4.44)$$

s değeri 0,01 olarak kabul edilir . u ve v , 0 ve 1 arasındaki rastgele değerlerdir. σ parametresi ise Denklem 4.45 ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right) \quad (4.45)$$

β değeri 1,5 olan bir sabittir. x ve y aramadaki spiral şekli ifade ederler. x ve y Denklem 4.7 ile aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} y &= r \times \cos(\theta) \text{ ve } x = r \times \sin(\theta), \\ r &= r_1 + U \times D_1 \text{ ve } \theta = -\omega \times D_1 + \theta_1, \theta_1 = \frac{3\pi}{2} \end{aligned} \quad (4.46)$$

r_1 , 1 ile 20 arasındaki arama döngü sayısı olup sabit bir sayıdır. U , 0,00565 değerine eşittir. D_1 , 1 ile arama uzayının boyutu (D) arasındaki bir tam sayıdır ve ω sayısı 0,005'e eşittir.

4.5.4. Genişletilmiş sömürü

Kaya kartalları, av alanını belirledikten sonra saldırıya geçmek için hazırlık yaparlar. Bu, bir ön saldırı aşamasıdır ve saldırı sırasında avın tepkisi ölçülür. Kaya kartalları, bu süreçte yavaş alçalma saldırısı ile alçak uçuş yöntemini kullanarak ava daha da yaklaşırlar. Kaya kartallarının bu davranışı, Denklem 4.47 ile matematiksel olarak ifade edilmiştir. (Turgut ve ark.,2023)

$$X_3(t + 1) = (X_{\text{en iyi}}(t) - X_M(t)) \times \alpha - r_4 + ((UB - LB) \times r_5 + LB) \times \delta \quad (4.47)$$

$X_3(t + 1)$, $t + 1$. iterasyondaki çözümü, α ve δ 0,1 değerlerine sahip parametrelerdir.

4.5.5. Daraltılmış sömürü

Kaya kartallarının, avın konumuna en yakın olduğu anda gerçekleştirmiş olduğu saldırı türü daraltılmış sömürüdür. Bu saldırı karada gerçekleşir ve yürüyerek avın yakalanması yöntemi uygulanır. Bu davranış Denklem 4.48 ile aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$X_4(t+1) = QF \times X_{\text{en iyi}}(t) - (G_1 \times X(t) \times \text{rand}) - G_2 \times \text{Levy}(D) + \text{rand} \times G_1 \quad (4.48)$$

$$QF(t) = t^{\frac{2 \times \text{rand}() - 1}{(1-T)^2}} \quad (4.49)$$

$$G_1 = 2 \times \text{rand} - 1 \quad (4.50)$$

$$G_2 = 2 \times \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (4.51)$$

$X_4(t+1)$, $t+1$. iterasyondaki çözümü,

QF keşif yöntemlerini dengeleyen kalite fonksiyonu

G_1 ; $[-1, +1]$ aralığındaki kaçma sırasında avı takip için,

G_2 ; 2'den 0' doğru azalan, kaçma sırasında avı takip için kullanılan eğim parametreleridir. $X(t)$, t . adımdaki çözümdür. r_6, r_7 ve r_8 0 ve 1 arasında rastgele bir değer alan parametrelerdir.

4.6. Benzetilmiş Tavlama Algoritması (SA)

Benzetilmiş Tavlama (SA) algoritması Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi tarafından önerilmiştir. Benzetilmiş Tavlama algoritması olasılık tabanlı sezgisel bir algoritmadır. Bu algoritma kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü ile katıların fiziksel tavlama işlemi arasındaki benzerlik üzerine dayalıdır.

Tavlama işlemi, katının ergime noktasına kadar ısıtılması ile sonrasında mükemmel kafes yapılı durumda olacak şekilde kristalize olana kadar yavaşça soğutulması işlemidir.

Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin atomları yüksek enerji seviyelerindedir. Malzemelerin atomları düzgün yerleştirilmiş şekildeki durumlarda daha fazla hareket serbestliğine sahiptirler. Düzgün yapıli bir kristal elde edildiğinde sistem minimum enerjiye sahiptir. Sıcaklık azalma durumunda atomik enerji düşer. Bundan dolayı soğutma işlemi yavaş yavaş yapılmalıdır. Aksi takdirde soğutma çok hızlı yapılırsa kristal yapıda bozulmalar ve düzensizlikler olacaktır. Bu nedenle tavlama işleminde soğutmanın dikkatlice yapılması gerekmektedir. (Kalınlı, 2002).

Fiziksel tavlama işlemi Monte Carlo tekniğı kullanılarak Metropolis ve arkadaşları tarafından modellenmiştir. Sistem bir T sıcaklığında durum enerjilerinin olasılık dağılımı aşağıdaki denklem 4.52 verilen termodinamik kanunu ile belirlenir:

$$P(E) = e^{-E/(kT)} \quad (4.52)$$

E ; sistem enerjisi

k ; Boltzmann sabiti

Sistem durumunda küçük bir karışıklık yaşandığında ve değışiklik olması halinde Metropolis algoritmasına göre yeniden sistemin enerjisi hesaplanır. Eğer burada enerji azalmış ise, sistem bu yeni duruma adapte olur. Eğer enerji artmış ise, sistem yeni durumun kabul edilip edilmemesine göre, Denklem (6.1) de verilen olasılık formülü ile karar verilir:

Düzgün dağılımdan [0,1] aralığında rasgele bir δ sayısı üretilir. Denklem (4.52)' te verilen şart sağlanırsa sistem bu durumu, yeni durum olarak kabul eder. Şart sağlanmaz ise, mevcut durum değıştirilmez.

$$\delta \leq e^{\Delta E / T} \quad (4.53)$$

Denklem 4.53'te, ΔE , iki durumun enerji seviyeleri arasındaki farkı verir. 4.53' de verilen bu kabul kriteri ΔE Metropolis kriteri olarak bilinir. Denklem (4.51)' e göre, tüm enerji durumları için yüksek sıcaklıklarda $P(E)$, 1'e yakınsar. Sistemin yüksek enerji seviyesine sahip olması düşük sıcaklıklarda bile küçük bir olasılıkla görülebilir. Bu nedenle enerjilerin istatistiksel dağılımı sistemin bir bölgesel enerji minimumundan çıkmasına

izin verir. Kombinatorial optimizasyon problemi ile tavlama işlemi arasındaki benzerlikte, katının durumları optimizasyon probleminin muhtemel çözümlerini temsil eder ve bu durumların enerjileri, çözümler için hesaplanan amaç fonksiyon değerlerine karşılık gelir. Minimum enerji durumu problem için optimal çözümü ifade eder.

SA iteratif bir algoritmadır, yani algoritma çözüm uzayında sayıların vektörü formunda ifade edilen bir çözümü sürekli olarak geliştirmeye çalışır. Standart bir SA algoritmasının adımları Şekil 1’ de verilmiştir. SA algoritmasının bir probleme uygulanması aşamasında karar verilmesi gereken önemli kavramları iki grupta toplamak mümkündür;

a) Probleme özgü seçimler: Problem, muhtemel tüm çözümleri içerecek şekilde formüle edilmelidir. Çözümlerin temsili yapılmalı, minimize edilecek bir amaç fonksiyonu ile komşuluk üretim mekanizması tanımlanmalı ve bir başlangıç çözümü üretilmelidir.

b) Soğutma planına ait seçimler: Sıcaklık parametresi T ’ nin başlangıç değerine, soğutma oranı ve güncelleme kuralına, her bir sıcaklıkta icra edilecek iterasyon sayısına karar verilmelidir. SA algoritmasının performansı büyük oranda seçilen soğutma planına bağlıdır.

Literatürde çeşitli soğutma planları önerilmiştir (Ekinci, S., & Izci, D., 2023). Önerilen en eski plan Kirckpatrick ve arkadaşlarının fiziksel tavlama ile olan benzerliğe dayanarak ileri sürdükleri plandır. Bu tavlama planına göre, maddenin sıvı safhaya ulaştığında tüm parçacıkların rasgele düzenlenmesini taklit etmek için, T sıcaklık parametresinin başlangıç değeri denenen tüm hareketler kabul edilecek kadar yüksek seçilmiştir. Sıcaklık parametresinin değerini azaltmak için ise, $T(t+1) = r \cdot T(t)$ bağıntısı kullanılmıştır. Burada, r değeri 1’ den küçük fakat 1’e yakın bir sabittir ve genellikle değeri 0.8 ile 0.99 arasında seçilir. Bu sıcaklık fonksiyonu ile sıcaklık parametresinin değeri sıfıra yaklaştıkça daha da yavaş azalmaktadır. Sıcaklık parametresinin her değerinde gerçekleştirilecek iterasyon sayısı sabit bir üst sınıra göre belirlenerek problemin fiziksel tavlamadaki ısı dengeye karşılık gelen bir denge durumuna ulaşması amaçlanmaktadır. Bu tavlama planında, sıcaklık parametresinin her değerinde elde edilen çözüm belirli sayıda ardışık sıcaklık değişimleri boyunca aynı kalırsa SA algoritması durdurulmaktadır. Buna göre elde edilen son durum fiziksel tavlamadaki donma durumuna (frozen state) karşılık gelmektedir.

Tablo 4.1. Benzetimli Tavlama (SA) algoritmasının temel adımları

Adım 1. Bir başlangıç çözümü üret, S .

Adım 2. Bir $S' \in N(S)$ çözümü seç ve amaç fonksiyon değerlerindeki farkı hesapla.

$$\Delta = C(S) - C(S')$$

Adım 3. **Eğer**,

(i) S' , S den daha iyi ($\Delta > 0$), **yada** (ii) $\delta \leq e^{\Delta E / T}$ **ise**,

S' nü yeni çözüm olarak tayin et ($S \leftarrow S'$)

Aksi takdirde, mevcut çözümü tut.

Adım 4. Sıcaklığı güncelle.

Adım 5. **Eğer** Durdurma kriteri sağlanıyor **ise** dur,

Aksi takdirde Adım 2' ye git.

5. ÖNERİLEN HİBRİT YÖNTEM SALSAAO

Bu çalışma, harmonik sinyal yeniden yapılanma problemini ve güç bozunumlarının tespitini ele almaktadır. Temel amaç, gürültülü bir sinyal içerisinde belirli harmonik bileşenleri tespit ederek, orijinal temiz sinyali yeniden oluşturmaktır.

Meta sezgisel algoritmalar (AO, GOA, PSO, GA, MPA, CSA, vb.) genellikle arama uzayında optimum çözümü bulmak amacıyla tasarlanmış güçlü araçlardır. Ancak birçok algoritma;

- Lokal minimuma sıkışma (local stagnation),
- Çeşitliliğin erken azalması (premature convergence),
- Arama ve sömürü (exploration vs. exploitation) dengesizliği gibi yapısal zayıflıklara sahiptir.

Bu sınırlamaları aşmak için meta sezgisel algoritmaların iyileştirilmesi gereksinimi doğar. Bu nedenle yeni bir kabul kriteri katmanı olarak Benzetimli Tavlama Algoritması (SA) ekleyerek hibrit bir yeni yöntem önerilmiştir. Önerilen bu yöntemle, her yeni çözüm adımında yalnızca daha iyi değil, istatistiksel olarak daha iyi sonuçlar elde edilir.

5.1. Matematiksel Model:

SA Tabanlı Kabul Mekanizmasında, Benzetimli Tavlama Kabul Kriteri olarak; verilen bir çözüm x_i , yeni bir çözüm x_{new} ile karşılaştırılır. Bu iki çözümün uygunluk (fitness) değerleri sırasıyla:

- $f_i = f(x_i)$
- $f_{new} = f(x_{new})$

ise, kabul kuralı şöyle tanımlanır:

$$P(\text{accept}) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } f_{new} < f_i \text{ (daha iyi çözüm)} \end{cases}$$

$$P(\text{accept}) = \begin{cases} \exp(-(f_{new} - f_i)/T), & \text{aksi halde} \end{cases}$$

Burada:

T: Sıcaklık parametresi — iterasyonla birlikte azalan bir katsayıdır. (örn. $T_g = T_0 \cdot \alpha^g$)

$\alpha \in (0,1)$: soğuma oranı — genelde 0.90-0.99 aralığında seçilir.

$\text{Exp}(-\Delta f/T)$: Metropolis kriteri — kötü çözümlerin kabul olasılığıdır.

Aşağıda, herhangi bir meta-sezgisel algoritmaya uygulanabilecek genel SA destekli kabul mantığı verilmektedir:

For each agent i:

Generate new solution x_{new} using algorithm specific rule

Evaluate fitness $f_{\text{new}} = f(x_{\text{new}})$

If $f_{\text{new}} < f(x_i)$: // klasik kriter

Accept $x_{\text{new}} \rightarrow x_i$

Else:

Generate random number $r \sim U(0,1)$

If $r < \exp(-(f_{\text{new}} - f(x_i)) / T)$:

Accept $x_{\text{new}} \rightarrow x_i$ (probabilistically)

Else:

Reject $x_{\text{new}} \rightarrow x_i$ remains

Bu strateji, algoritmaya özgü konum güncelleme kurallarıyla birlikte çalışır. Aşağıda bazı algoritmalar için entegrasyon örnekleri sunulmuştur:

PSO

Yeni hız ve konum güncellenir:

$$v_i^{g+1} = w v_i^g + c_1 r_1 (p_i - x_i^g) + c_2 r_2 (g - x_i^g)$$

$$x_{\text{new}} = x_i^g + v_i^{g+1}$$

Bu yeni konumun kabulü SA kriterine göre yapılabilir.

GOA (Grasshopper Optimization Algorithm):

Klasik konum güncellemesi:

$$x_{\text{new}} = c \cdot S_i + gbest$$

Bu yeni konumun kabulü yine SA kriterine bağlanabilir.

GA (Genetic Algorithm):

Kromozomlar çaprazlandıktan ve mutasyona uğradıktan sonra:

- Yeni birey x_{new} mevcut popülasyondaki bireyle karşılaştırılır.
- Daha kötüyse bile SA kriterine göre kabul edilebilir.

MPA (Marine Predators Algorithm):

MPA'da hareket modeli temelidir:

$$x_{\text{new}} = x_i^0 + \text{Levy veya Brownian hareket}$$

Bu yeni çözüm de klasik kabul yerine SA ile değerlendirilir.

ABC (Artificial Bee Colony):

Yeni besin kaynağı:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj})$$

Yeni kaynak değeri v daha kötüyse bile SA kriteri ile kabul edilebilir.

Tablo 5.1. Klasik ve SA destekli yöntemlerde beklenen avantajlar

Kriter	Klasik Yöntemler	SA Destekli Yöntemler (Hybrid)
Erken yakınsama riski	Yüksek	Düşük
Arama alanı çeşitliliği	Hızlı kaybolur	Kontrollü azalır
Kötü çözümleri kabul etme	Yok	Var (istatistiksel)
Konverjans kalitesi	Lokal optimal	Global optimal olasılığı artar
Uygulama esnekliği	Sınırlı	Geniş (algoritma bağımsız)

Bu genel SA tabanlı kabul stratejisi:

- Parametre tahmini, sinyal işleme, fonksiyon optimizasyonu ve mühendislik uygulamaları gibi birçok alanda uygulanabilir.
- Hangi algoritma olursa olsun, yalnızca konum güncelleme mekanizmasıyla birlikte SA kabul katmanını eklenerek daha dengeli ve güçlü bir optimizasyon elde edilir. Önerilen hibrit yöntemle ait sözde kod Tablo 5.1 de verilmiştir. Algoritmayla ilgili açıklamalar aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

5.2. Veri Ön İşleme ve Harmonik Tespiti

Bu algoritma, harmonik sinyal rekonstrüksiyonu için otomatik harmonik tespit yaklaşımı kullanmaktadır. İlk aşamada, hedef sinyalin Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) hesaplanarak frekans domenindeki enerji dağılımı analiz edilir. Temel frekansın (50 Hz) katları olan harmonik frekanslar belirlenir ve her harmonik için enerji seviyeleri hesaplanır. En yüksek enerjiye sahip harmonikler seçilerek boyut azaltması yapılır, bu da hem hesaplama karmaşıklığını azaltır hem de en önemli frekans bileşenlerine odaklanmayı sağlar.

5.3. Hibrit Optimizasyon Yaklaşımı

Algoritmanın temel yeniliği, Kaya Kartalı Optimizasyonu ile Benzetimli Tavlama yöntemlerinin hibrit bir şekilde birleştirilmesidir. Klasik Kaya Kartalı Optimizasyonu algoritması, kartal avlama davranışlarından esinlenen meta-sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma, keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) fazlarını dengeli bir şekilde yönetir. Keşif fazında, popülasyon ortalaması ve mevcut en iyi çözüm kullanılarak yeni aday çözümler üretilir. Lévy uçuş paterni kullanılarak uzun mesafeli atlama hareketleri gerçekleştirilir. Sömürü fazında ise, mevcut en iyi çözüm etrafında yerel arama yapılarak ince ayar optimizasyonu sağlanır.

5.4. Benzetimli Tavlama Entegrasyonu

Hibrit versiyonda, Benzetimli Tavlama 'nın kabul kriterine göre kötü çözümlerin belirli bir olasılıkla kabul edilmesi özelliği entegre edilmiştir. Bu yaklaşım, algoritmanın yerel optimumlara takılma riskini azaltır ve global optimuma ulaşma şansını artırır. Sıcaklık parametresi (T) zamanla üstel olarak azalır ($T = T_0 \times \alpha^{(g-1)}$), bu da optimizasyon sürecinin başında daha fazla keşif, sonuna doğru daha fazla sömürü yapılmasını sağlar. Başlangıç sıcaklığı ($T_0 = 8$) ve soğuma faktörü ($\alpha = 0.985$) parametreleri, yavaş ve kontrollü bir soğuma süreci sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

5.5. Fitness Fonksiyonu ve Sinyal Yeniden Oluşturma

Fitness fonksiyonu, harmonik sinyal rekonstrüksiyonunun kalitesini değerlendirmek için Ortalama Kare Hata metriğini kullanır. Her aday çözüm için faz vektörü kullanılarak harmonik matris oluşturulur, ardından en küçük kareler yöntemiyle genlik katsayıları hesaplanır. Bu yaklaşım hem faz hem de genlik optimizasyonunu etkili bir şekilde gerçekleştirir. Yeniden oluşturularak elde edilen sinyal ile orijinal sinyal arasındaki fark minimize edilmeye çalışılır.

5.6. Performans Değerlendirmesi

Algoritmanın performansı üç farklı metrik kullanılarak değerlendirilir: Ortalama Kare Hata, Ortalama Mutlak Hata ve Determinasyon Katsayısı. Bu metrikler, yeniden oluşturma kalitesinin farklı açılardan analiz edilmesini sağlar. MSE metriği, hata değerlerini kare aldığından dolayı, büyük genlikli hataların toplam hata skoruna katkısını küçük hatalarinkine göre orantısız şekilde artırır. MAE genel hata büyüklüğünü gösterir, R^2 ise modelin açıklama gücünü belirtir. Klasik AO ve hibrit SALSAO yöntemlerinin performansları karşılaştırılarak, SA entegrasyonunun etkisi objektif olarak değerlendirilir.

5.7. Parametre Optimizasyonu

Algoritma parametreleri deneysel olarak optimize edilmiştir. Popülasyon büyüklüğü ($N_p = 70$) ve jenerasyon sayısı ($G = 150$) arasındaki uyum hem hesaplama maliyeti hem de çözüm kalitesi açısından optimal değerler olacak şekilde seçilmiştir. Lévy uçuş parametresi ($\beta = 3/2$) ve adım büyüklüğü (0.02) faktörleri, keşif kapasitesini artıracak şekilde ayarlanmıştır. SNR değerleri (40dB, 30dB, 20dB, 10dB) gerçekçi gürültü koşullarını simüle etmek için seçilmiştir.

5.8. Güç Bozunumlarının Tespiti İçin Önerilen Hibrit Yöntemin Sözde Kodu

ALGORITHM: Hybrid SALS AO Harmonic Signal Reconstruction

INPUT:

- sample_dataset: Sinyal veri seti
- sınıf_no: Hedef sinyal sınıfı
- max_harmonics: Maksimum harmonik sayısı
- top_k: Seçilecek harmonik sayısı
- N_p : Popülasyon büyüklüğü
- G : Maksimum jenerasyon sayısı
- SNR_dB: Sinyal-gürültü oranı

OUTPUT:

- Optimized harmonic reconstruction signals
- Performance metrics (MSE, MAE, R^2)

BEGIN

1. INITIALIZE PARAMETERS

SET class_no $\leftarrow$ 9, max_harmonics $\leftarrow$ 15, top_k $\leftarrow$ 8
SET $N_p \leftarrow$ 70, $G \leftarrow$ 150, SNR_dB $\leftarrow$ 30
SET $f \leftarrow$ 50 Hz, $T_s \leftarrow$ 1/5000, $T_0 \leftarrow$ 8, $\alpha \leftarrow$ 0.985

2. DATA LOADING AND PREPROCESSING

```

LOAD sample_dataset from 'sample_dataset.mat'
EXTRACT signals  $\leftarrow$  sample_dataset[:, 1:end-1]
EXTRACT labels  $\leftarrow$  sample_dataset[:, end]
FIND idx WHERE labels == class_no
SET Target_clean  $\leftarrow$  signals[idx, :]
SET Target  $\leftarrow$  AWGN(Target_clean, SNR_dB)

```

3. AUTOMATIC HARMONIC DETECTION

```

COMPUTE FFT of Target_clean
CALCULATE frequency axis f_axis
FOR each harmonic h = 1 to max_harmonics:
    COMPUTE harmonic_frequency  $\leftarrow$   $f \times h$ 
    FIND closest frequency bin in f_axis
    EXTRACT harmonic_energy from FFT magnitude
END FOR
SORT harmonics by energy (descending)
SELECT top_k strongest harmonics
COMPUTE orders  $\leftarrow$   $\omega_1 \times$  selected_harmonics

```

4. CONSTRUCT HARMONIC MATRIX

```

SET HH  $\leftarrow$   $t \times$  orders (time-frequency matrix)
SET dim  $\leftarrow$  length(orders)

```

5. DEFINE FITNESS FUNCTION

```

FUNCTION computeFitness(phaseVec, HH, Target):
    He  $\leftarrow$  sin (HH + repmat(phaseVec))
    Ae  $\leftarrow$   $(He' \times He)^{-1} \times (He' \times Target)$ 
    Z  $\leftarrow$  He  $\times$  Ae
    RETURN mean((Target - Z)2)
END FUNCTION

```

6. INITIALIZE POPULATION

```

SET bounds:  $LB \leftarrow -\pi$ ,  $UB \leftarrow \pi$ 
FOR  $i = 1$  to  $N_p$ :
     $X[i] \leftarrow \text{random\_uniform}(LB, UB, \text{dim})$ 
     $\text{fitness}[i] \leftarrow \text{computeFitness}(X[i])$ 
END FOR
FIND  $g_{\text{best}} \leftarrow \text{argmin}(\text{fitness})$ 

```

7. OPTIMIZATION METHODS COMPARISON

```

FOR each method in {'classic', 'sa'}:

```

```

    COPY initial population and fitness

```

```

    FOR generation  $g = 1$  to  $G$ :

```

```

        SET  $a \leftarrow 2 \times \cos(\text{rand}) \times (1 - g/G)$ 

```

```

        SET  $T \leftarrow T_0 \times \alpha^{(g-1)}$  // SA temperature

```

```

        FOR individual  $i = 1$  to  $N_p$ :

```

```

            IF  $\text{rand} < 0.5$ : // Exploration phase

```

```

                 $r_1, r_2, r_3, r_4 \leftarrow \text{random\_values}$ 

```

```

                IF  $r_1 \geq 0.5$ :

```

```

                     $X_{\text{new}} \leftarrow g_{\text{best}} + (\text{mean}(X) - r_2 \times X[i]) \times r_3$ 

```

```

                ELSE:

```

```

                     $X_{\text{new}} \leftarrow g_{\text{best}} - (\text{mean}(X) - r_2 \times X[i]) \times r_3$ 

```

```

                END IF

```

```

            IF  $r_4 < 0.5$ :

```

```

                 $X_{\text{new}} \leftarrow X_{\text{new}} + a \times (2 \times \text{rand} - 1) \times (UB - LB)$ 

```

```

            ELSE:

```

```

                 $X_{\text{new}} \leftarrow X_{\text{new}} + a \times \text{levy\_flight}(\text{dim}) \times (UB - LB)$ 

```

```

            END IF

```

```

ELSE: // Exploitation phase
    IF rand  $\geq$  0.5:
        X_new  $\leftarrow$  gbest + (rand $\times$ 0.1- 0.05)  $\times$  (UB- LB)
    ELSE:
        Step  $\leftarrow$  levy_flight_step(dim)
        X_new  $\leftarrow$  gbest + 0.02  $\times$  step  $\times$  (UB- LB)
    END IF
END IF

APPLY boundary constraints to X_new
COMPUTE f_new  $\leftarrow$  computeFitness(X_new)

IF method == 'classic':
    accept  $\leftarrow$  (f_new < fitness[i])
ELSE: // SA method
    IF f_new < fitness[i]:
        accept  $\leftarrow$  TRUE
    ELSE:
         $\Delta \leftarrow$  f_new - fitness[i]
        accept  $\leftarrow$  (rand < exp(- $\Delta$ /T))
    END IF
END IF

IF accept:
    X[i]  $\leftarrow$  X_new
    fitness[i]  $\leftarrow$  f_new
    IF f_new < best_fitness:
        UPDATE global_best
    END IF
END IF
END FOR

```

```

        IF g mod 20 == 0:
            PRINT progress information
        END IF
    END FOR

    RECONSTRUCT final signal using optimal phases
    COMPUTE performance metrics (MSE, MAE, R2)
    STORE results
END FOR

8. PERFORMANCE EVALUATION
FOR each method:
    DISPLAY MSE, MAE, R2 values
END FOR

END

```

```

FUNCTION levy_flight(d):
     $\beta \leftarrow 3/2$ 
     $\sigma \leftarrow (\Gamma(1+\beta) \times \sin(\pi\beta/2) / (\Gamma((1+\beta)/2) \times \beta \times 2^{((\beta-1)/2)}))^{1/\beta}$ 
     $u \leftarrow \text{randn}(1,d) \times \sigma$ 
     $v \leftarrow \text{randn}(1,d)$ 
     $\text{step} \leftarrow u / |v|^{1/\beta}$ 
    RETURN  $0.02 \times \text{step}$ 
END FUNCTION

```

5.7.1 Önerilen SALSAO Algoritma karmaşıklığı analizi

Zaman Karmaşıklığı: $O(G \times N_p \times (N_s \times K + K^3))$

- G: Jenerasyon sayısı
- N_p : Popülasyon boyutu
- N_s : Sinyal uzunluğu

- K: Harmonik sayısı
- K^3 : Matris inversiyonu için

Uzay Karmaşıklığı: $O(N_p \times K + N_s \times K)$

Kritik Tasarım Kararları

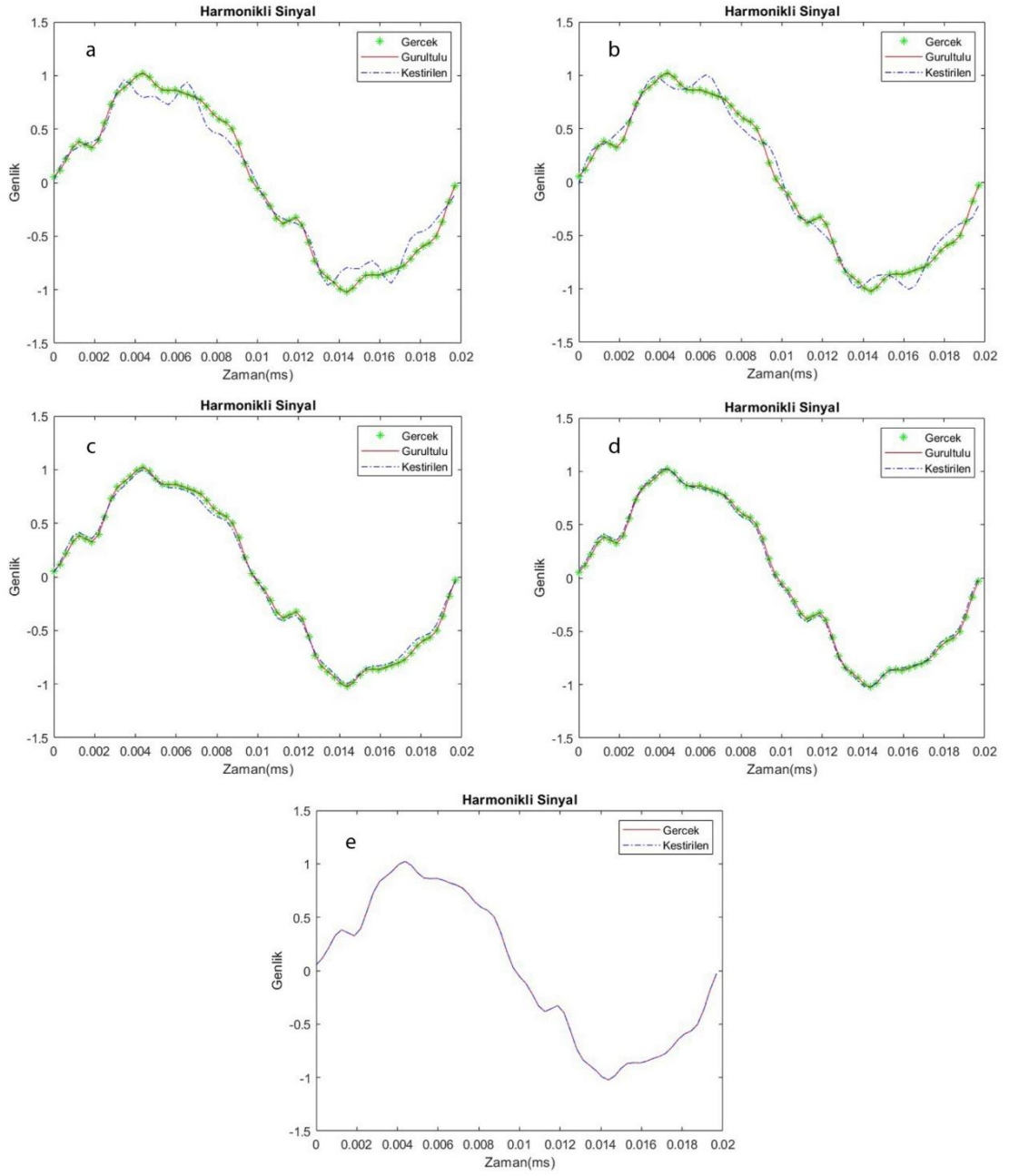
1. Faz-sadece optimizasyonu: Genlikler analitik olarak hesaplanır
2. Adaptif arama: 4 farklı arama stratejisi probabilistik seçim
3. Hibrit kabul: SA ile yerel optimumlardan kaçınma
4. Otomatik harmonik seçimi: FFT tabanlı enerji analizi



6. SONUÇLAR

6.1. Sentetik Harmonikli Veri Örneğine Ait Sonuçlar

Sentetikli harmonikli veri örneği Tablo 3.1’deki bulunan beş harmonik dikkate alınmıştır. 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 tüm sonuçlar Şekil 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5’te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, yeniden yapılandırılmış sinyal, sinyal-gürültü oranının (SNR) yüksek olduğu durumda orijinal sinyalle neredeyse aynıdır. Gürültü koşulları kötüleştikçe, tahmin sonucundaki hatalar artmasına rağmen sinyal yine de tatmin edici bir doğruluğu korur. (Oğuzalp ve ark., 2025)



Şekil 6.1. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (MGO)

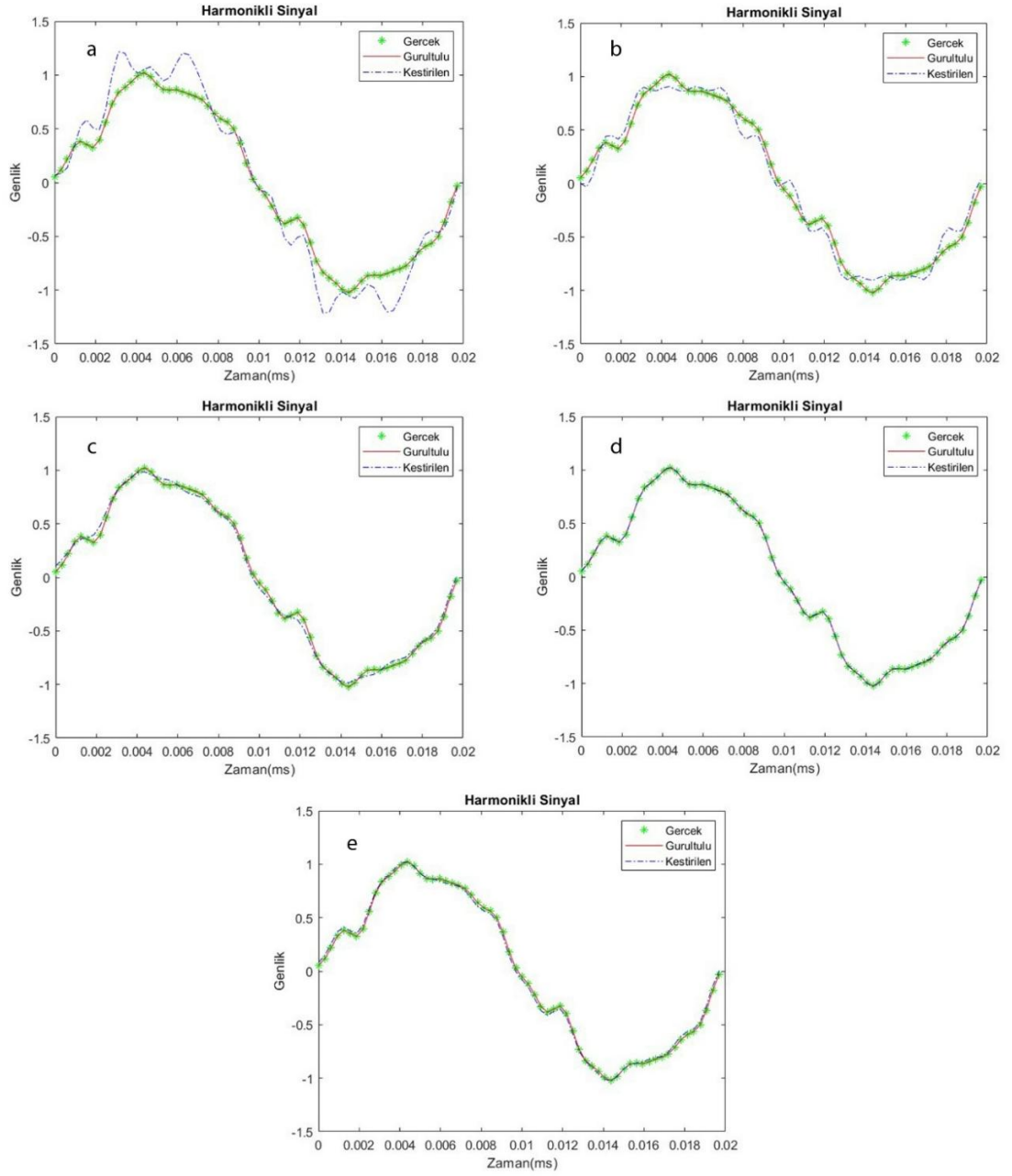
a) 0dB’de MGO

b) 10dB’de MGO

c) 20dB’de MGO

d) 40dB’de MGO

e) Gürültüsüz ortamda MGO



Şekil 6.2. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri

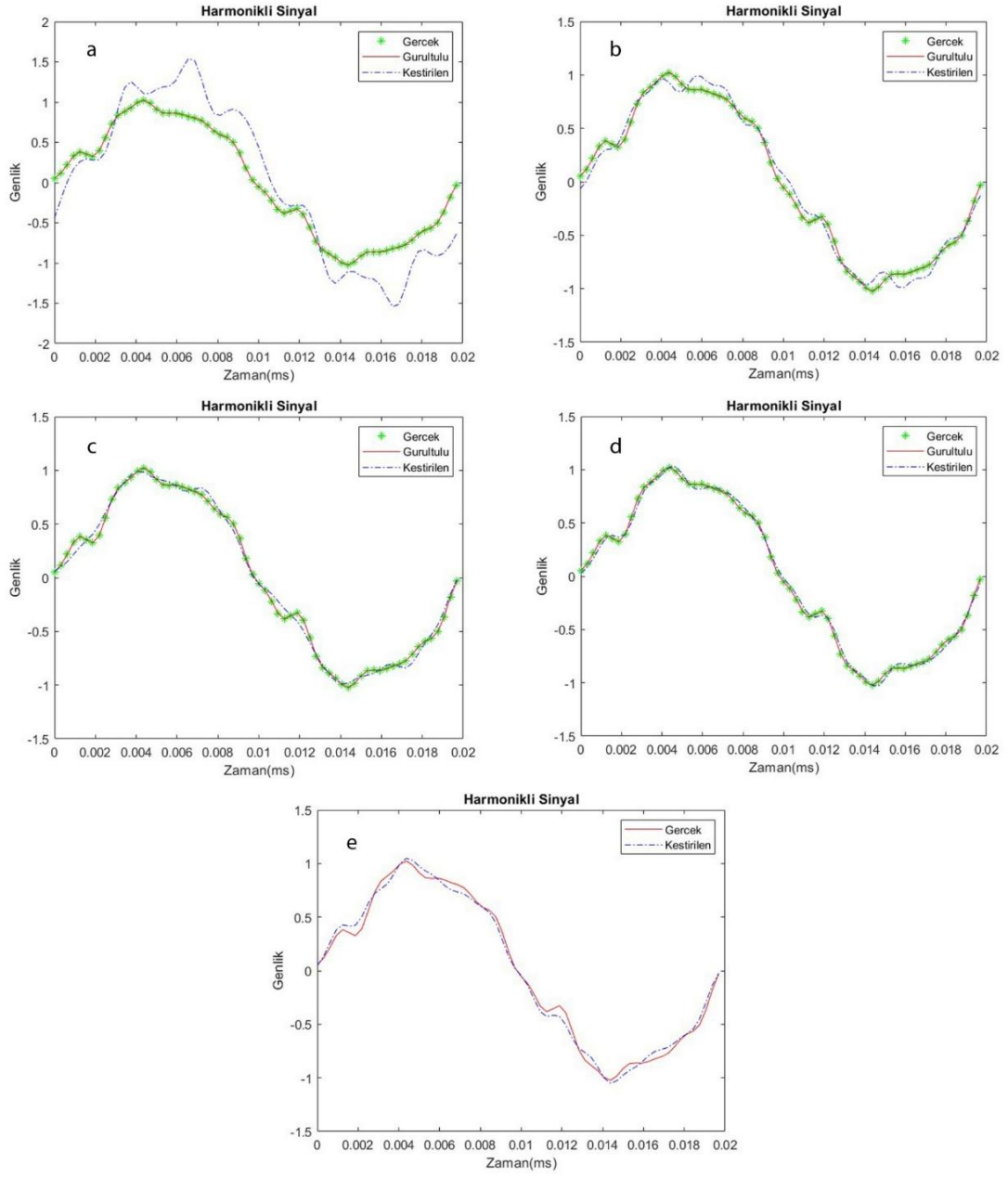
a) 0dB'de AVOA

b) 10dB'de AVOA

c) 20dB'de AVOA

d) 40dB'de AVOA

e) Gürültüsüz ortamda AVOA

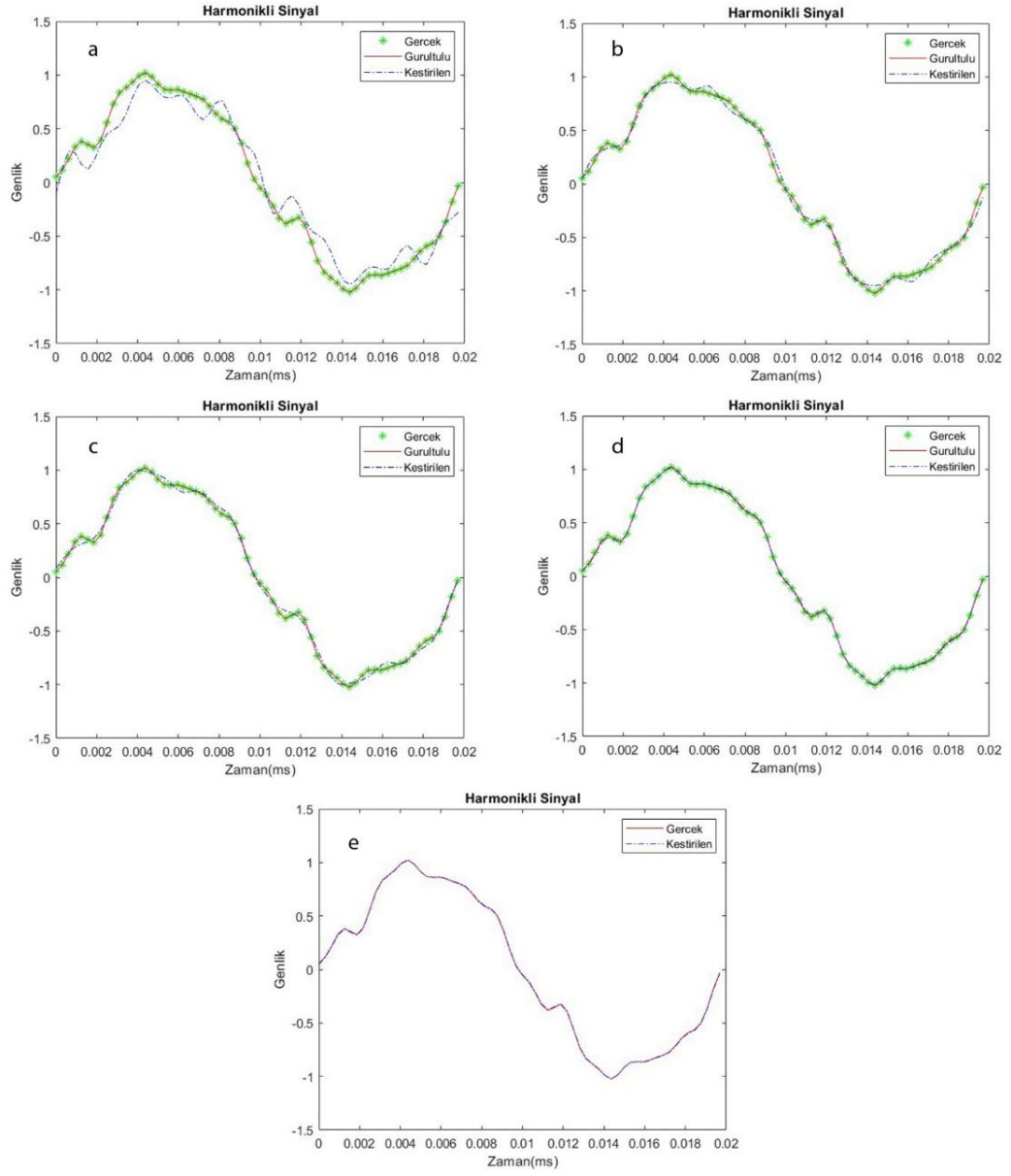


Şekil 6.3.. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (SWO)

a) 0dB'de SWO
d) 40dB'de SWO

b) 10dB'de SWO
e) Gürültüsüz ortamda SWO

c) 20dB'de SWO



Şekil 6.4. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (ARO)

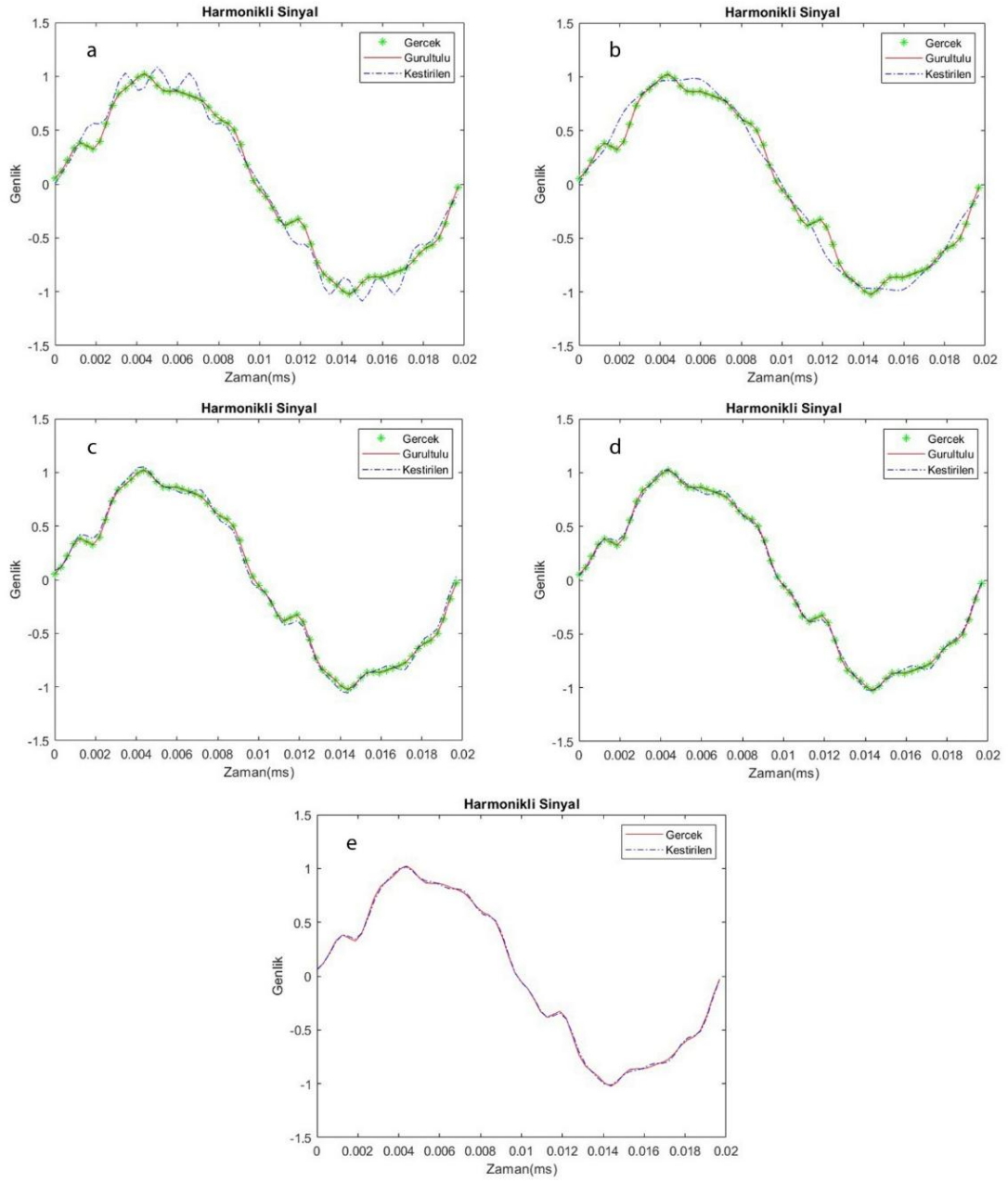
a) 0dB'de ARO

b) 10dB'de ARO

c) 20dB'de ARO

d) 40dB'de ARO

e) Gürültüsüz ortamda ARO



Şekil 6.5. Sentetikli harmonikli veri örneği için gerçek ve tahmini dalga biçimleri (AO)

- a) 0dB'de AO b) 10dB'de AO c) 20dB'de AO
d) 40dB'de AO e) Gürültüsüz ortamda AO

Simülasyon çalışmalarında, performans indeksi ϵ , şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=1}^K (Z(k) - \hat{Z}(k))^2}{\sum_{k=1}^K Z(k)^2} \times 100 \quad (6.1)$$

Tablo 6.1. Önerilen algoritmaların ilgili tahmin sonuçları

Sentetikli harmonikli veri örneğindeki harmoniklerin tahmini için kullanılan algoritma hatalarının karşılaştırılması (Oğuzalp ve ark., 2025)

		% ϵ				
Test Ortamı	SNR	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
	40 dB	0.0417	0.0854	0.4404	3.4095	0.0734
Gürültüsüz Ortam	-	0.0331	0.0439	0.4495	3.2362	0.0808

Önerilen algoritmaların ilgili tahmin sonuçları denklem (6.1)'de hesaplanan sonuçlar Tablo 6.1'de verilmiştir.

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 $\epsilon = 0,0331$ ile en düşük hatayı veren MGO-LS, 0 dB'de $\epsilon = 8,3413$ 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, sentetikli harmonikli veri örneğinde MGO'nun

adaptif “kaçış–takip” mekanizmasıyla erken iterasyonlarda hatayı hızla 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 1–5’teki 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. 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.

Yapılan analizler, hatayı en iyi minimize eden yöntemin MGO-LS yöntemi olduğu ortaya konmuştur. Bu 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.

Tablo 6.2.. Sentetik veri seti için klasik GOA ve SA-LS- GOA sonuçları

KLASİK GOA										
MSE	0.000386	0.000479	0.000642	0.000536	0.000456	0.000540	0.000421	0.000404	0.000309	0.000663
MAE	0.015606	0.018895	0.019287	0.017837	0.018418	0.018840	0.017087	0.016573	0.014804	0.021957
R2	0.999155	0.998953	0.998596	0.998827	0.999003	0.998820	0.999080	0.999117	0.999325	0.998550
SA-LS- GOA										
MSE	0.000293	0.000731	0.000099	0.000475	0.000111	0.000600	0.000593	0.000286	0.000623	0.000472
MAE	0.014418	0.021953	0.007658	0.016880	0.008242	0.020830	0.020851	0.014619	0.020226	0.016766
R2	0.999359	0.998402	0.999784	0.998960	0.999757	0.998689	0.998702	0.999374	0.998638	0.998967

Tablo 6.2 'de KLASİK GOA ve SA-LS-GOA yöntemlerinin 10 farklı deneme üzerinden MSE, MAE ve R^2 performans metrikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.3. Sentetikli veri seti için klasik GOA ve SA-LS- GOA ortalama sonuçları

Metrik	KLASİK GOA (Ort.)	SA-LS-GOA (Ort.)	Değişim
MSE	0.0004846	0.0004283	%11,61 azalma
MAE	0.0181303	0.0163041	%10,07 azalma
R^2	0.9989445	0.9990632	%0,012 artış

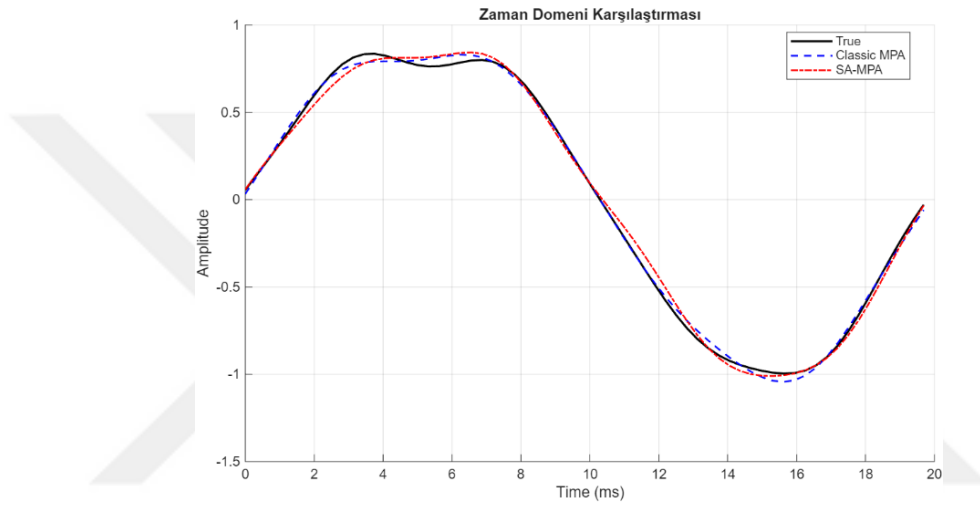
Tablo 6.3 'te SA-LS-GOA, ortalama olarak tüm metriklerde KLASİK GOA' dan daha iyi performans göstermiştir. SA-LS-GOA, en iyi performansı (MSE = 0.000099, R^2 = 0.999784) sergilerken, en kötü performansta (MSE = 0.000731) KLASİK GOA' dan daha başarısız olabilmektedir. Bu durum, yerel arama ve benzetimli tavlama bileşenlerinin çözüm uzayında daha fazla keşif yapabildiğini, ancak bazı durumlarda yerel minimumlarda takılabildiğini göstermektedir. SA-LS-GOA, 3. ve 5. denemelerde çok düşük MSE (sırasıyla 0.000099 ve 0.000111) ve yüksek R^2 ($\approx$ 0.99978) ile üstün başarı sergilemiştir. Ancak 2.denemede MSE = 0.000731 ile KLASİK GOA'nın tüm denemelerinden daha yüksek hata üretmiştir. Bu davranış, SA-LS-GOA'nın başlangıç çözümüne ve parametre ayarlarına daha duyarlı olduğunu düşündürmektedir.

Tablo 6.4. Sentetikli veri seti için klasik MPA ve SA-MPA sonuçları

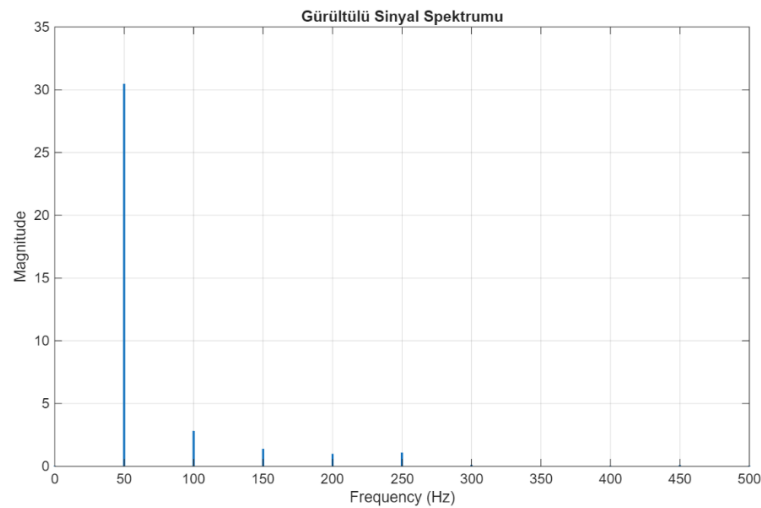
Monte Carlo yöntemi ile Ortalama Performans (30 Tekrar)		
	Klasik MPA	SA-MPA
MSE	0.001648	0.001421
MAE	0.032947	0.030212
R^2	0.996395	0.996891

Tablo 6.4'te MPA 'ya SA eklenerek hibrit yöntem önerilmiştir. SA bileşeninin eklenmesi, MPA' nın yerel minimumlardan kaçış kabiliyetini artırmıştır. MSE' de %13,77'lik iyileşme, SA' nın global arama yeteneği sayesinde daha kaliteli çözümler bulunduğunu

göstermektedir. MAE' de %8,30'luk azalma, modelin tutarlı şekilde daha isabetli tahminler yaptığını kanıtlamaktadır. Her iki algoritma da 0.996 seviyelerinde R^2 değeri üretmiştir ki bu, her ikisinin de mükemmel yakın uyum sergilediğini gösterir. SA-MPA'nın 0.996891 değeri, modele eklenen SA bileşeninin açıklayıcılığı marjinal olarak artırdığını işaret etmektedir. 30 tekrarlı Monte Carlo simülasyonu, sonuçların istatistiksel güvenilirliğini sağlamaktadır.



Şekil 6.6. Sentetikli veri setinde klasik MPA ve SA-MPA zaman domeni karşılaştırması



Şekil 6.7.. Sentetikli veri setine ait klasik MPA ve SA-MPA gürültülü sinyal spektrumu

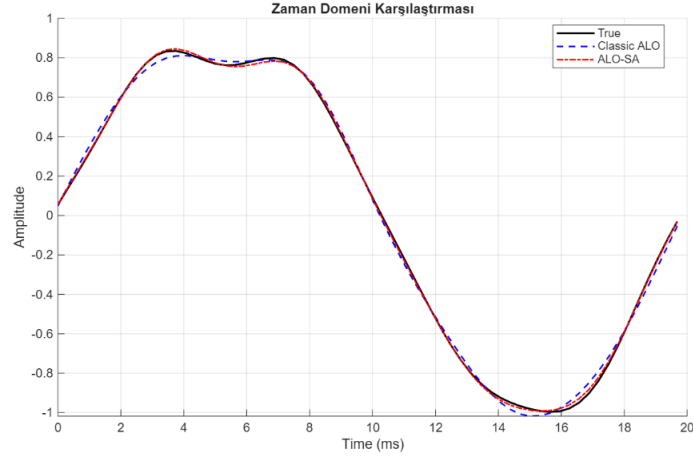
Tablo 6.5. Sentetikli veri seti için klasik ALO ve SA-ALO sonuçları

Monte Carlo yöntemi ile Ortalama Performans (30 Tekrar)		
	Klasik ALO	SA-ALO
MSE	0.000296	0.000245
MAE	0.013194	0.011912
R ²	0.999352	0.999464

Tablo 6.6.. Sentetikli veri seti için klasik ALO ve SA-ALO karşılaştırmalı analiz

Metrik	Klasik ALO	SA-ALO	Değişim Oranı (%)	Anlamı
MSE	0.000296	0.000245	%17,23 azalma	Belirgin iyileşme
MAE	0.013194	0.011912	%9,71 azalma	Tutarlı iyileşme
R ²	0.999352	0.999464	%0,011 artış	Anlamli iyileşme

MSE' de %17,23'lük azalma, SA bileşeninin ALO'nun yerel minimumlardan kaçış kabiliyetini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. MAE' de %9,71'lik iyileşme, algoritmanın tutarlı şekilde daha doğru tahminler ürettiğini kanıtlamaktadır. Elde edilen R² değerindeki artış, modelin açıklayıcılık gücünün istatistiksel olarak anlamlı düzeyde arttığını göstermektedir



Şekil 6.8. Sentetikli veri setinde klasik ALO ve SA-ALO zaman domeni karşılaştırması

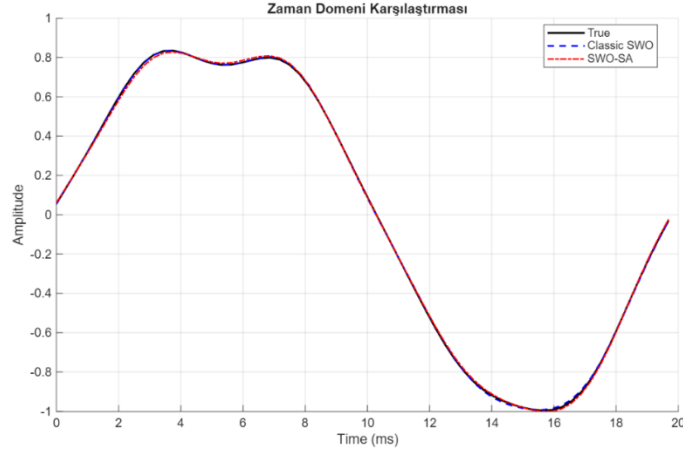
Tablo 6.7. Sentetikli veri seti için klasik SWO ve SA-SWO sonuçları

Monte Carlo yöntemi ile Ortalama Performans (30 Tekrar)		
	Klasik SWO	SA- SWO
MSE	0.000065	0.000060
MAE	0.005013	0.005855
R ²	0.999858	0.999869

Tablo 6.8. Sentetikli veri seti için klasik SWO ve SA-SWO karşılaştırmalı analiz

Metrik	Klasik SWO	SA-SWO	Değişim Oranı (%)	Anlamı
MSE	0.000065	0.000060	%7,69 azalma	Marjinal iyileşme
MAE	0.005013	0.005855	%16,80 artış	Beklenmedik bozulma
R ²	0.999858	0.999869	%0,0011 artış	Çok marjinal iyileşme

MSE' de %7,69'luk azalma, SA entegrasyonunun ortalama karesel hatada küçük ama ölçülebilir bir iyileşme sağladığını göstermektedir. R²'deki 0.000011'lik artış, model uyumunda istatistiksel olarak anlamlı olabilecek kadar küçük bir iyileşmeye işaret etmektedir. Bu iyileşmeler, SA'nın global arama kabiliyetinin SWO'nun performansını marjinal olarak artırabildiğini göstermektedir.



Şekil 6.9.. Sentetikli veri setinde klasik SWO ve SA- SWO zaman domeni karşılaştırması

Tablo 6.9. Sentetikli harmonikli veride önerilen yöntemin sonuçları

SNR (dB)	10			20			30			40		
Hata Metrikleri	MSE	MAE	R ²	MSE	MAE	R ²	MSE	MAE	R ²	MSE	MAE	R ²
Klasik AO (%)	1.911	9.391	97.03	1.795	8.934	97.211	1.793	8.921	97.213	1.816	9.027	97.178
SALSAO (%)	1.876	9.291	97.08	1.780	8.945	97.233	1.778	8.886	97.237	1.776	8.901	97.239

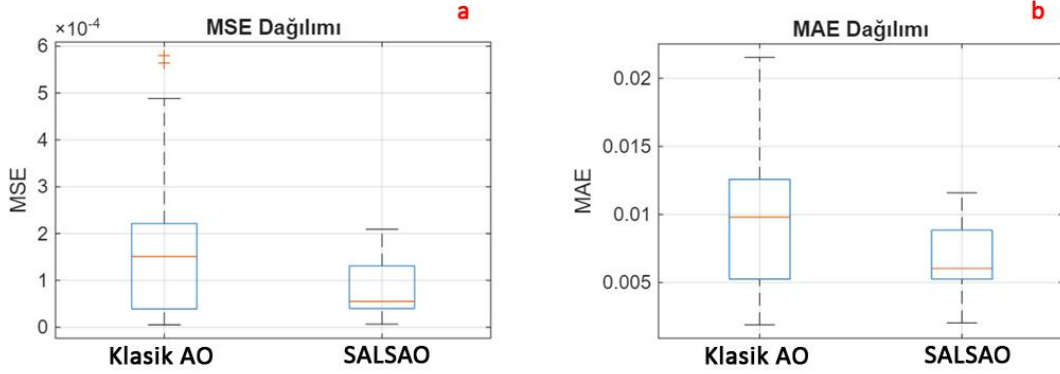
Tablo 6.9'daki veriler sentetikli harmonikli veri örneğine sırasıyla; 10-20-30-40 dB gürültü uygulandığında;

MSE metriğiyle hesaplanan hata değerlerinde SALSAO yöntemi, hata miktarında küçük ama tutarlı bir azalma sağladığı hatta en yüksek SNR'da dahi klasik AO yönteminden daha iyi sonuçlar sağladığı gözlemlenmiştir.

MAE metriğiyle hesaplanan hata değerlerinde SALSAO yöntemi, daha düşük ortalama mutlak hata ile daha düşük başarılı sonuçlar verdiği en yüksek SNR'da dahi klasik AO yönteminden daha iyi sonuçlar sağladığı gözlemlenmiştir.

R² metriğiyle hesaplanan hata değerlerinde SALSAO yöntemi diğer metriklerde olduğu gibi klasik AO yöntemine göre belirgin şekilde üstünlük sağladığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak sentetikli harmonikli veri örneğinde SALSAO yöntemi, tüm metriklerde klasik AO'ya göre daha iyi sonuçlar vermiştir.



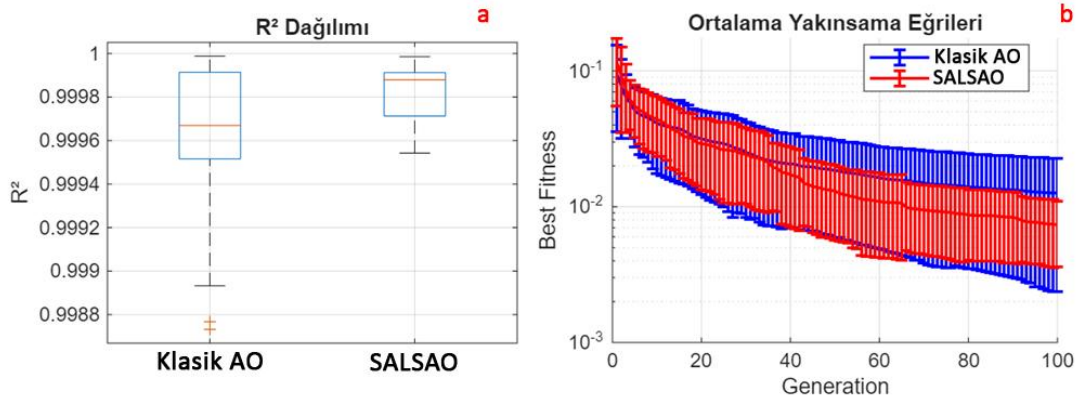
Şekil 6.10.. Sentetikli veri için Klasik AO ve SALS AO yöntemlerinin karşılaştırılması

a- MSE dağılımı ile

b- MAE dağılımı ile

Şekil 6.10 a’da Tablo 2’deki değerlere ait MSE Dağılımı verilmiştir. MSE terimi hata karelerinin ortalamasını gösterir. Burada Klasik AO yönteminde mavi kutu daha geniş bir dağılıma sahip olduğunu; kırmızı çizgi ile gösterilen medyan değeri ise SA-AO yönteminden daha yüksek değerde ($\sim 1.2 \times 10^{-4}$ civarı) ve ayrıca maksimum değer $\sim 5 \times 10^{-4}$ üzerinde çıkmış, hatta birkaç aykırı değer de gözleniyor. SA-AO mavi kutu daha dar bir dağılıma sahip, kırmızı çizgi ile gösterilen medyan değeri daha düşük $\sim 0.5 \times 10^{-4}$ değerler aldığı görülmektedir. Bu, SA-AO’nun daha istikrarlı ve düşük hatayla sonuçlar verdiğinin göstermektedir. Sonuç olarak SA-AO, MSE açısından Klasik AO’ya göre daha başarılı olduğunu gösterir.

Şekil 6.10.b’de MAE Dağılımı verilmiştir. MAE mutlak hata ortalamasıdır. Klasik AO’da dağılım daha geniş ve medyan değer ~ 0.01 civarındadır. SA-AO ‘da ise daha düşük medyan ~ 0.005 – 0.006 ve daha sıkışık bir dağılım görülmektedir. Sonuç olarak; SA-AO, mutlak hata açısından da Klasik AO’dan daha iyi performans gösterir. SA-AO sadece MSE’de değil, MAE açısından da daha isabetli ve tutarlı tahminler verir.



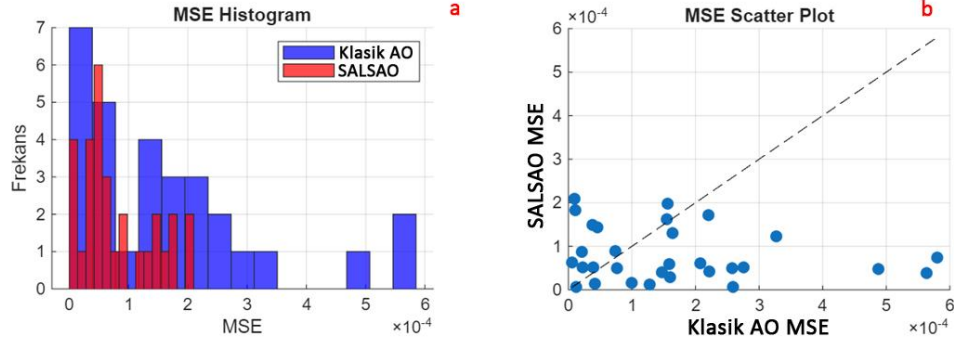
Şekil 6.11. Sentetikli veri için Klasik AO ve SALSAO yöntemlerine ait grafikler

a- R^2 dağılımı

b- Ortalama yakınsama eğrileri

Şekil 6.11 a’da R^2 Dağılımı verilmiştir. R^2 modelin açıklayıcılığını ölçer. 1’e ne kadar yakınsa, model o kadar iyidir. Klasik AO’da medyan ~ 0.9996 civarında ama alt sınır daha düşük (0.9988) ve daha geniş bir dağılım var. SA-AO da ise daha dar bir dağılıma sahip, medyan değeri daha yüksektir (~ 0.9998). Her iki yöntem de modelin veriyi çok iyi açıkladığını gösteriyor, fakat SA-AO’nun tutarlılığı biraz daha iyi olduğu gözlenir. Sonuç olarak; SA-AO, Klasik AO’ya göre daha kararlı ve yüksek açıklayıcılık sağlar.

Şekil 6.11. b’de Ortalama Yakınsama Eğrileri verilmiştir. x eksenini iterasyon sayısını, y eksenini ise log ölçeğinde en iyi uygunluk değerlerini göstermektedir. Kırmızı alanla gösterilen kısım SA-AO, mavi alanla gösterilen klasik AO’ya göre daha hızlı ve daha düşük uygunluk değerine yani daha iyi çözüm değerlerine ulaşıyor. SA-AO değerlerinin dağılımı daha dar olması sonuçlarının daha istikrarlı olduğunu gösterir. SA-AO (kırmızı alan) daha hızlı düşüş (daha iyi uygunluğa ulaşır) ve erken iterasyonlarda Klasik AO’ya göre daha hızlı iyileşme gösterir. Ayrıca sapma bantları daha dar bu nedenle tekrar eden çalıştırmalarda daha kararlı olduğu görülür. SA-AO hem konverjans hızı hem de son çözüm kalitesi açısından avantajlı olduğu görülür. Ayrıca SA-AO klasik algoritmadaki erken minimuma takılma problemini de azaltır. Sonuç olarak; SA-AO daha hızlı yakınsadığı için daha güvenilir sonuçlar üretir.



Şekil 6.12. Sentetikli veride Klasik AO ve SALS AO yöntemlerinin karşılaştırma grafikleri

a- MSE histogramı

b- MSE Ortalama yakınsama eğrileri

Şekil 6.12 a’da MSE histogramında; x ekseni MSE değerlerini, y ekseni frekansı yani kaç kez görüldüğünü gösterir. Mavi histogram değerlerine bakıldığında Klasik AO’nun daha geniş ve daha yüksek MSE değerlerinde, kırmızı histogram SA-AO’nun daha dar ve daha düşük MSE değerlerinde yoğunlaşmış olduğu gözlenmektedir. Sonuç olarak; SA-AO’nun sonuçları daha düşük MSE’ ye yoğunlaşırken, Klasik AO’nun daha dağınık ve yüksek hatalara sahip olduğu görülür.

Şekil 6.12 b ’de MSE Scatter Plot x ekseni Klasik AO’nun MSE değerlerini, y ekseni ise SA-AO’nun MSE değerlerini gösterir. Kesikli çizgi $y=x$ denklem çizgisidir. Noktaların çoğu çizginin altındaysa SA-AO’nun daha iyi MSE’ si Klasik AO ‘dan daha düşük olduğunu gösterir. Sonuç olarak; SA-AO neredeyse her durumda daha iyi performans gösterir.

Şekil 6.10, 6.11, 6.12’deki tüm grafikler (MSE, MAE, R^2 , histogram, yakınsama eğrileri, scatter plot) SA-AO’nun Klasik AO’ya göre daha düşük hata, daha hızlı yakınsama ve daha istikrarlı performans sağladığını gösterir.

Tablo 6.11. Sentetikli veri seti için Klasik AO ve SALS AO performans değerlendirmesi

30 Deneme Monte Carlo Analizi			
Metrik	MSE	MAE	R^2
Klasik AO (%)	$(1.66 \pm 1.58) \times 10^{-4}$	$(94.85 \pm 52.27) \times 10^{-4}$	$(99.96 \pm 0.0345) \times 10^{-2}$
SALS AO (%)	$(0.80 \pm 0.61) \times 10^{-4}$	$(68.01 \pm 28.63) \times 10^{-4}$	$(99.98 \pm 0.0133) \times 10^{-2}$

SALSAO yönteminin sentetikli harmonikli veri setindeki performans değerlendirmesini ayrıca Monte Carlo analizi kullanarak 30 tekrar için yapılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.10'da verilmiştir. Monte Carlo analizi sonuçları değerlendirildiğinde, SALSAO yönteminin Klasik AO yöntemine kıyasla daha düşük hata metriklerine ve daha düşük varyansa sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Bu durum, SALSAO algoritmasının sentetikli harmonik veri seti üzerinde hem daha doğru hem de daha kararlı sonuçlar verdiğini göstermekte ve bu yöntemin tercih edilebilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, analizde kullanılan 30 tekrar sayesinde sonuçların rastlantısal etkilerden arındırılmış, istatistiksel olarak anlamlı ve güvenilir olduğu da kanıtlanmıştır.

Klasik SA ile SALSAO yöntemleri arasındaki karşılaştırma sonucunda, SALSAO algoritmasının Klasik AO yöntemine kıyasla önemli ölçüde iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Özellikle hata metriklerinde elde edilen gelişmeler dikkate değerdir. Ortalama Kare Hatası (MSE) bakımından %51,57 oranında iyileşme sağlanmış olup, bu durum modelin tahmin doğruluğunu anlamlı biçimde artırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, Ortalama Mutlak Hata (MAE) değerinde %28,30 oranında bir azalma gözlemlenmiş, bu da tahmin hatalarının mutlak düzeyde önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur. Determinasyon Katsayısı (R^2) açısından ise %0,02 oranında bir artış sağlanmış, bu da modelin açıklayıcılığında bir gelişmeye işaret etmektedir.

Elde edilen bu iyileşmelerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla yapılan paired t-test analizine göre; MSE için elde edilen p-değeri 0.013892 ($p < 0.05$), MAE için 0.025880 ($p < 0.05$) ve R^2 için 0.013892 ($p < 0.05$) olarak hesaplanmıştır. Bu p-değerleri, genellikle kabul edilen anlamlılık düzeyi olan 0.05'in altında olduğundan, her üç metrik için de elde edilen iyileştirmelerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda, SALSAO algoritması hem hata oranlarını düşürmesi hem de anlamlı performans artışları sağlaması açısından Klasik AO yöntemine göre üstünlük göstermektedir.

6.2. MGO ile Temel Frekans ve Katlarında Harmonik Kestirime Ait Sonuçlar

1.durum

Simüle edilmiş Led lamba verisinde; temel frekans ve katlarında beyaz gürültü eklenerek harmonik kestirimi yapılmış aşağıdaki sonuçlar ve dalga şekilleri alınmıştır.

Temel frekans ve harmonikler;

$$\text{Sinyal} = 1.2 * \sin(2 * \pi * 50 * t) + 0.8 * \sin(2 * \pi * 150 * t) + 0.5 * \sin(2 * \pi * 250 * t)$$

Tablo 6.11.. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi

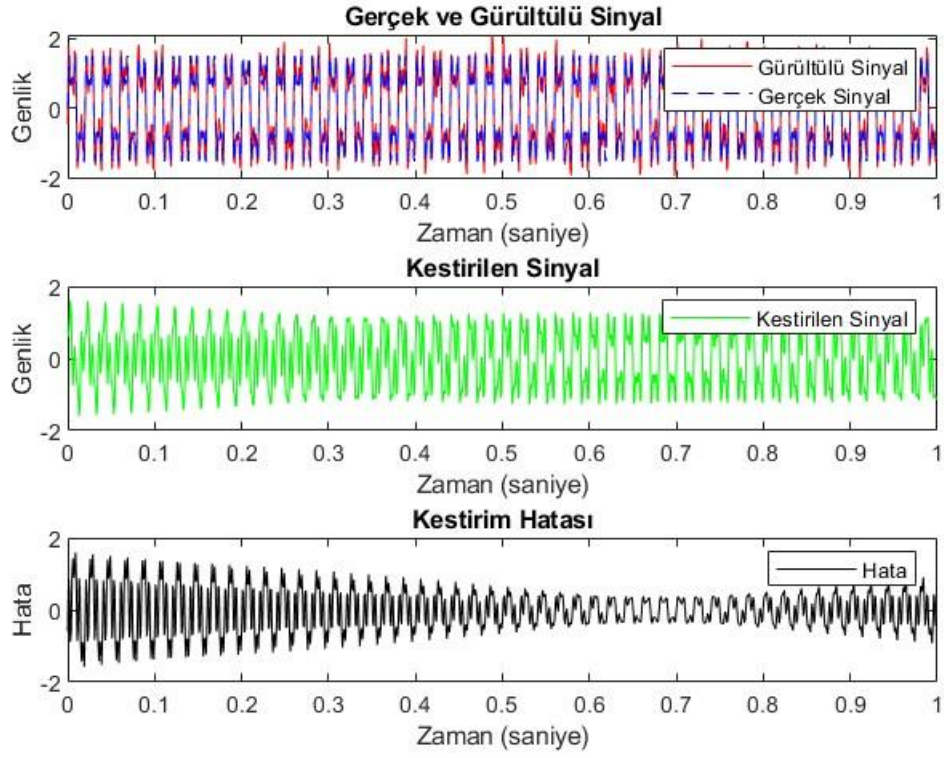
MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi		
Popülasyon sayısı	50	100
İterasyon sayısı	100	100
	45-55	45-55
Frekans sınırları	145-155	145-155
	245-255	245-255
RMSE	0.94035	0.83856
Tamamlanan süre (sn)	0.270647	0.537830

Tablo 6.2. MGO ile 1.durumda harmonik kestirimi analizi

Popülasyon	RMSE	Süre (sn)	Değişim
50	0.94035	0.270647	-
100	0.83856	0.537830	%10,83 iyileşme

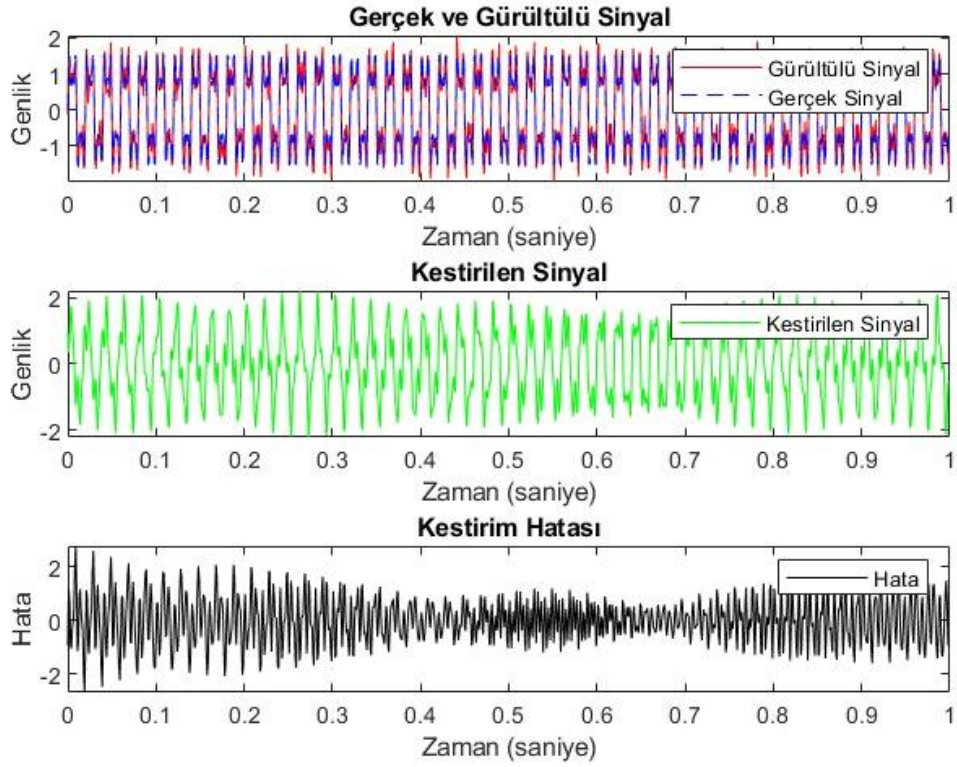
Frekans bantlarının mümkün olduğunca doğru belirlenmesi öncelikli hedef olmalıdır. Popülasyon büyüklüğü, hesaplama kaynakları ve doğruluk gereksinimleri arasında dengeli seçilmelidir. Kötü başlangıç koşullarına rağmen yüksek performans sergileyebilen

MGO için, gerçek zamanlı uygulamalarda 50 bireylik popülasyon yeterli olabilir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi (popülasyon size=50)

Yüksek doğruluk gerektiren offline analizlerde 100 birey tercih edilebilir (Şekil 6.14). Frekans bantları sistem özellikleri iyi bilinmiyorsa geniş tutulmalıdır.



Şekil 6.14. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi (popülasyon size=100)

2.durum

Simüle edilmiş Led lamba verisinde; temel frekans ve katlarında frekans aralığı değiştirilip beyaz gürültü eklenerek MGO ile harmonik kestirimi yapılmış aşağıdaki sonuçlar ve dalga şekilleri alınmıştır.

Temel frekans ve harmonikler;

$$\text{signal} = 1.2 * \sin(2 * \pi * 50 * t) + 0.8 * \sin(2 * \pi * 150 * t) + 0.5 * \sin(2 * \pi * 250 * t)$$

Tablo 6.13. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi

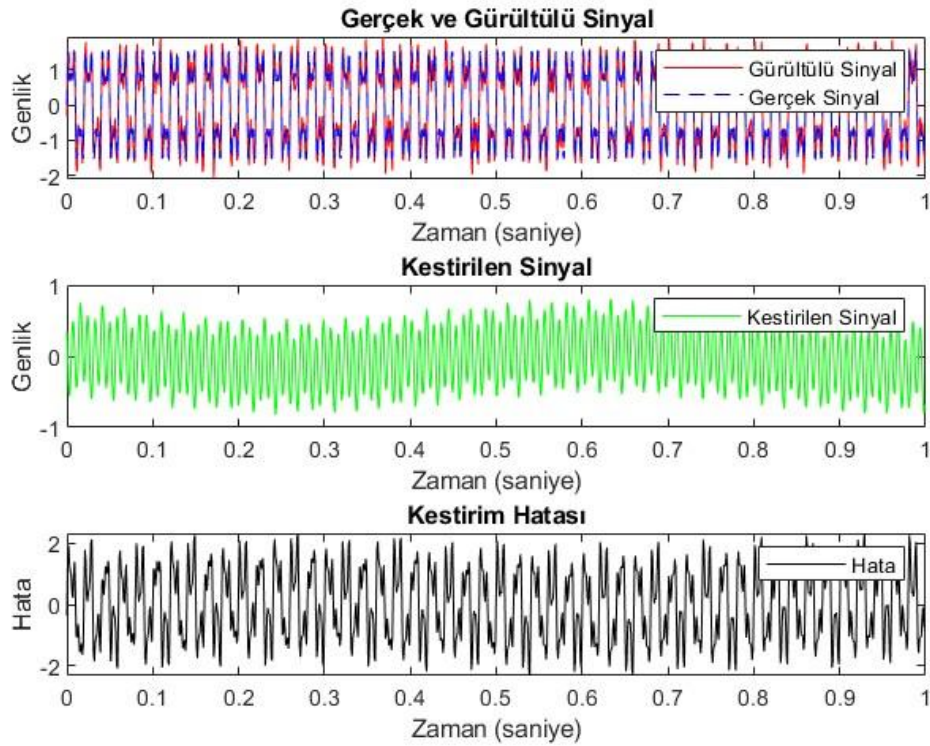
MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirimi		
Popülasyon sayısı	50	100
İterasyon sayısı	100	100

Tablo 6.13. (Devamı) Farklı harmoniklerin kestiriminde kullanılan MGO için parametreler

	40-50	40-50
Frekans sınırları	110-120	110-120
	240-250	240-250
RMSE	1.05200	0.83856
Tamamlanan süre (sn)	0.327279	0.537830

Tablo 6.14 MGO ile 2.durumda harmonik kestirimi analizi

Popülasyon	RMSE	Süre (sn)	Değişim
50	1.05200	0.327279	-
100	0.83856	0.537830	%20.28 iyileşme



Şekil 6.15. MGO ile temel frekans ve katlarında harmonik kestirim

6.3. SWO ile Simüle Edilmiş LED Lamba Verisine Ait Sonuçlar

Simüle edilmiş Led lamba verisinde; temel frekans, ara harmonik ve üst harmoniklerde beyaz gürültü eklenerek SWO ile harmonik kestirimi yapılmış aşağıdaki sonuçlar ve dalga şekilleri alınmıştır.

Temel frekans, ara harmonikler ve üst harmonikler

$Sinyal = 1.2 * \sin(2 * \pi * 45 * t) + \dots$ % Temel frekans

$0.8 * \sin(2 * \pi * 115 * t) + \dots$ % Ara harmonik

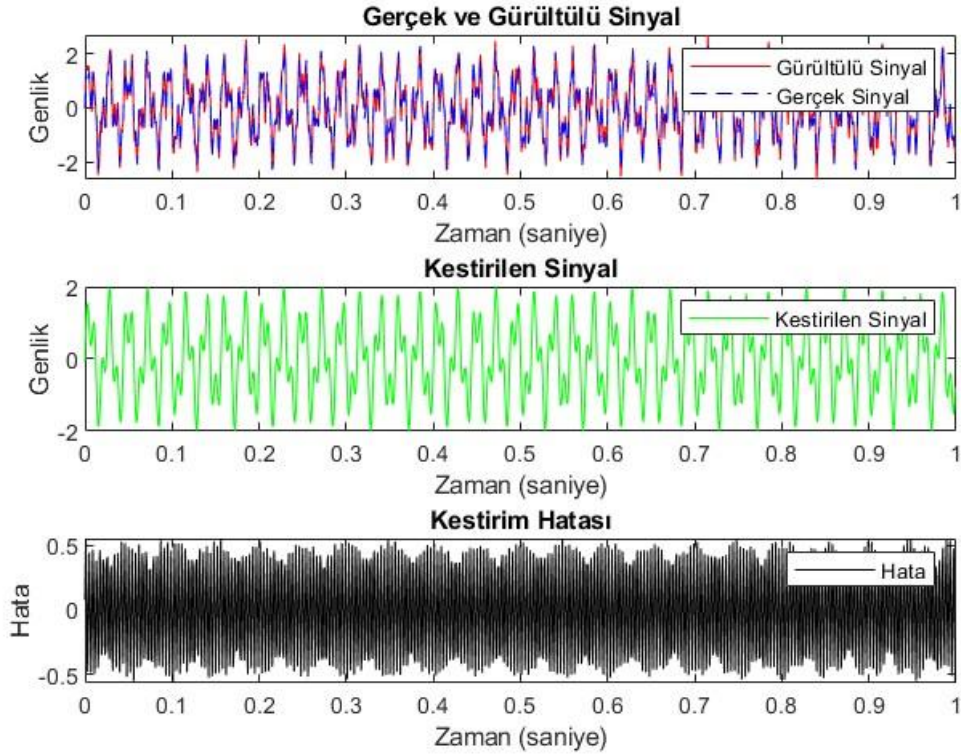
$0.5 * \sin(2 * \pi * 245 * t);$ % Üst harmonik

Tablo 6.15. SWO ile temel frekans, ara harmonik ve üst harmoniklerde harmonik kestirimi

SWO ile temel frekans, ara harmonik ve üst harmoniklerde harmonik kestirimi	
Popülasyon sayısı	50
İterasyon sayısı	100
	40-50
Frekans sınırları	110-120
	240-250
RMSE	0.52520
Tamamlanan süre (sn)	0.265488

Elde edilen 0.52520 RMSE değeri, harmonik kestirim hatasının kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Önceki MGO sonuçlarıyla karşılaştırıldığında (0.83856), SWO'nun daha düşük hata oranı ile üstün performans sergilediği görülmektedir. Bu değer, algoritmanın temel frekans, ara harmonik ve üst harmonik bileşenleri yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini kanıtlamaktadır. 0.26 saniyelik çözüm süresi, SWO'nun hesaplama verimliliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Aynı popülasyon ve iterasyon sayısında MGO'nun 0.327279 saniye performansına kıyasla %18,9 daha hızlı çalışmaktadır. Bu durum, SWO'nun gerçek zamanlı uygulamalar için uygun bir seçenek olabileceğine işaret etmektedir.

Şekil 6.16' da SWO, gerçek zamanlı harmonik analiz sistemlerinde kullanıma uygun, sınırlı hesaplama kaynaklarına sahip gömülü sistemlerde tercih edilebilir, hızlı sonuç gerektiren operasyonel durumlarda etkin çözüm sunar.



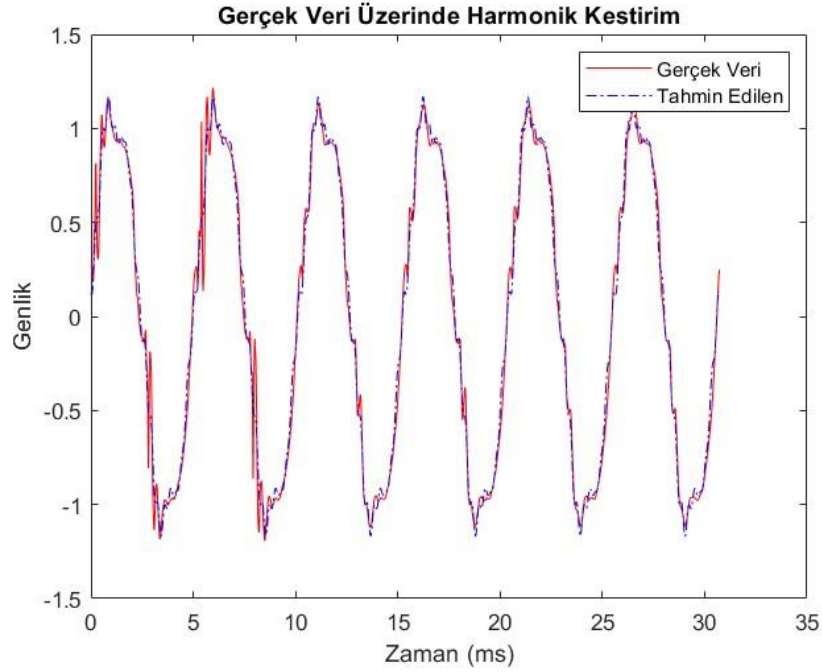
Şekil 6.16.. SWO ile farklı frekanslarda simüle edilmiş ledin harmonik kestirimi

6.4. Gerçek Sinyalde AO ile Harmonik Kestirimine Ait Sonuçlar

IEEE 1159.2 Working Group kısmındaki File wave14a.xls kamuya açık gerçek veri seti üzerinde AO algoritması ile harmonik kestirimi başarı ile sağlanmıştır. AO ve SALS AO Algoritmasında popülasyon sayısı = 50; maksimum iterasyon = 100; tekrar sayısı = 30 olarak alınmıştır. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar Tablo 6.16’da verilmiştir.

Tablo 6.16.. Kamuya açık gerçek veride klasik AO ve SALS AO sonuçları

IEEE 1159.2 Working Group kamuya açık File wave14a.xls											
Klasik AO	MSE	0,2553	0,4141	0,0061	0,0649	0,0083	0,3765	0,0521	0,0064	0,0104	0,0075
	MAE	0,4139	0,5643	0,0542	0,1976	0,0658	0,5269	0,1971	0,0571	0,0736	0,0612
	R2	0,5839	0,325	0,99	0,8942	0,9865	0,3863	0,9151	0,9896	0,9831	0,9877
SALS AO	MSE	0,0271	0,0168	0,0893	0,0207	0,0336	0,0076	0,0064	0,0097	0,2922	0,4945
	MAE	0,1326	0,1092	0,2508	0,118	0,1466	0,0623	0,0578	0,0744	0,455	0,6192
	R2	0,9558	0,9726	0,8544	0,9662	0,9452	0,9876	0,9895	0,9841	0,5238	0,1939



Şekil 6.17. Kamuya açık gerçek veri setinde AO algoritması ile harmonik kestirimi

Şekil 6.17’de kamuya açık gerçek veri setinde AO algoritması ile harmonik kestirimi gerçek veri ve tahmin edilen sinyal olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.17. Kamuya açık gerçek veri setinde AO ve SALS AO ile harmonik kestirimi

Metrik	Klasik AO	SALS AO	Değişim (%)	Yorum
MSE	0.12016	0.09979	▼ %16,94	Anlamlı iyileşme
MAE	0.22117	0.20259	▼ %8,41	Orta düzey iyileşme
R ²	0.80414	0.83731	▲ %4,12	İstatistiksel olarak anlamlı artış

%16,94'lük iyileşme, SA bileşeninin yerel minimumlardan kaçış kabiliyetini artırarak daha doğru küresel çözümler bulduğunu göstermektedir. %8,41'lik iyileşme, modelin tutarlı şekilde daha isabetli tahminler yaptığını doğrulamaktadır. MAE' deki iyileşmenin MSE' ye kıyasla daha düşük olması, algoritmanın büyük hataları daha etkin kontrol edebildiğini göstermektedir. %4,12'lik artış, modelin açıklayıcılık gücünde istatistiksel olarak anlamlı bir iyileşme olduğunu göstermektedir. SALS AO' nun 0.83731 R² değeri, modelin verideki varyansın %83,73'ünü başarıyla açıklayabildiğini

kanıtlamaktadır. Performans Tutarlılığı; SALSAO, Test 10 hariç tüm senaryolarda daha düşük veya benzer MSE değerleri üretmiştir. Test 10'da SALSAO' nun performansı (MSE: 0.4945) beklenmedik şekilde düşmüştür. Bu durum, aşırı özelleşme veya parametre duyarlılığına işaret edebilir.

6.5. Deneysel Olarak Üretilmiş Güç Kalite Bozunumu Örneklerine Ait Sonuçlar

Bölüm 3 Tablo 3.5' de deneysel olarak üretilmiş güç kalitesi bozunum örneklerine ait model eşitliği ve parametreleri verilmiştir. Saf sinyal (S1) ve birçok tekli bozunum ve bazı ikili bozunumlar için 10 dB, 20dB, 30dB ve 40dB SNR gürültülü koşullardaki kestirim sonuçları önerilen SALSAO algoritması ile elde edilmiştir. Bu sonuçlara ait MATLAB programı ile elde edilmiş görüntüler ve sonuçlar her bir bozunum için aşağıda verilmiştir. Bu sonuçlarının karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Seçilen harmonikler 1, 3, 7, 11, 12, 13, 14, 15, popülasyon 200, iterasyon 500 olarak alınmıştır.

Tablo 6.18. Saf sinyal S1 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
1	10	0,001078	0,032833	0,026425	0,997844	0,9989935	26,66355133	6,616384
1	20	4,83E-05	0,006951	0,005561	0,9999034	0,9999551	40,1482811	6,102972
1	30	1,01E-05	0,003174	0,002601	0,9999799	0,9999901	46,95683289	6,712916
1	40	1,32E-06	0,001151	0,000938	0,9999974	0,9999987	55,77146912	7,264148

Tablo 6.19.. Gerilim düşmesi S2 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
2	10	0,01728	0,13145	0,10057	0,9245886	0,961673	11,227794	6,872748
2	20	0,01684	0,12976	0,09674	0,9265096	0,962579	11,339914	6,183707
2	30	0,01682	0,12970	0,09800	0,9265801	0,962613	11,344084	6,435855
2	40	0,01681	0,12964	0,09752	0,9266432	0,962643	11,347818	7,362260

Tablo 6.20. Gerilim yükselmesi S3 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
3	10	0,027456	0,165700	0,112776	0,957493	0,978627	13,715463	6,4536101
3	20	0,026065	0,161448	0,115856	0,959646	0,979616	13,941207	6,414206
3	30	0,026024	0,161319	0,115103	0,959711	0,979650	13,948166	7,7019476
3	40	0,026020	0,1613070	0,115630	0,959717	0,979652	13,948803	7,2592831

Tablo 6.21. Kesinti S4 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
4	10	0,067700	0,260193	0,180097	0,290729	0,539416	1,493341	6,173660
4	20	0,067677	0,260149	0,179980	0,290965	0,539717	1,494787	6,741785
4	30	0,067675	0,260140	0,179003	0,291014	0,539681	1,495089	6,618918
4	40	0,067687	0,260168	0,178923	0,290866	0,539541	1,494179	7,451617

Tablo 6.22. Kırpışma S5 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
5	10	0,0031360	0,05600	0,047723	0,993814	0,996919	22,090530	6,371038
5	20	0,002500	0,05000	0,041056	0,995068	0,997536	23,075717	6,495198
5	30	0,002437	0,04937	0,040082	0,995193	0,997596	23,187263	6,881804
5	40	0,002430	0,04930	0,039772	0,995207	0,997603	23,199604	6,839304

Tablo 6.23. Geçici olaylar S6 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
6	10	0,004952	0,070371	0,040660	0,990222	0,995099	20,098106	6,081801
6	20	0,004483	0,066960	0,034181	0,991147	0,995564	20,529680	6,745878
6	30	0,004410	0,066443	0,031790	0,991283	0,995633	20,597030	6,124477
6	40	0,004400	0,066381	0,031625	0,991299	0,995640	20,605028	6,511583

Tablo 6.24. Harmonikler S7 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
7	10	0,000334	0,0182932	0,0150368	0,9995062	0,9997782	33,065013	6,235223
7	20	6,390295	0,0079939	0,0064988	0,9999057	0,9999611	40,255626	7,368560
7	30	9,500230	0,003082	0,0024306	0,9999859	0,9999945	48,533515	6,332843
7	40	1,731360	0,0013158	0,0010262	0,9999974	0,9999986	55,927024	6,296759

Tablo 6.25. Çentik S8 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
8	10	0,016914	0,130057	0,067714	0,964470	0,982882	14,685848	6,330790
8	20	0,016948	0,130184	0,070785	0,964400	0,982820	14,676927	6,404641
8	30	0,016767	0,129488	0,067883	0,964780	0,983013	14,725628	6,182820
8	40	0,016120	0,126966	0,065716	0,966139	0,983704	14,904411	6,196104

Tablo 6.26. Ani darbe S9 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
9	10	0,018029	0,134274	0,087424	0,971980	0,987803	16,146148	6,143027
9	20	0,017642	0,132826	0,087840	0,972581	0,988088	16,255018	6,330083
9	30	0,018967	0,137722	0,096355	0,970523	0,987043	15,893075	7,059310
9	40	0,017786	0,133364	0,089879	0,972359	0,987973	16,214366	6,255782

Tablo 6.27. Gerilim düşmesi+ Harmonik S10 için sonuçlar

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
10	10	0,021565	0,146850	0,092680	0,883083	0,940292	9,361022	6,124754
10	20	0,021394	0,146269	0,093225	0,884007	0,940783	9,395796	6,378502
10	30	0,021374	0,146201	0,093219	0,884114	0,94084	9,399831	7,522333
10	40	0,021387	0,146245	0,092950	0,884045	0,940803	9,397205	6,245189

Tablo 6.28. Gerilim Yükselmesi + Harmonik S11 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
11	10	0,025712	0,160350	0,132547	0,965900	0,983001	14,682170	6,150214
11	20	0,024769	0,157382	0,126703	0,967151	0,983483	14,844866	7,534567
11	30	0,024639	0,156970	0,125999	0,967322	0,983567	14,867653	7,581165
11	40	0,024641	0,156975	0,125169	0,967320	0,983563	14,867381	6,218433

Tablo 6.29. Kesinti + Harmonik S12 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
12	10	0,065520	0,255969	0,164687	0,284564	0,538009	1,483210	6,328631
12	20	0,065251	0,255443	0,163055	0,287502	0,540611	1,501199	6,507994
12	30	0,065270	0,255480	0,162553	0,287294	0,540409	1,499921	7,556739
12	40	0,065266	0,255472	0,162678	0,287337	0,540448	1,500184	6,434557

Tablo 6.30. Kırpışma + Harmonik S13 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
13	10	0,010675	0,103321	0,083804	0,981612	0,990777	17,360712	6,206349
13	20	0,009414	0,097026	0,078606	0,983784	0,991873	17,907571	7,001563
13	30	0,009338	0,096635	0,077712	0,983915	0,991938	17,942682	7,608856
13	40	0,009333	0,096609	0,077660	0,983923	0,991942	17,945026	6,339460

Tablo 6.31. Gerilim Düşmesi + Harmonik S14 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
14	10	0,050916	0,225645	0,201487	0,822361	0,906859	7,505445	6,223998
14	20	0,050484	0,224688	0,201610	0,823866	0,907690	7,542387	7,623615
14	30	0,050472	0,224660	0,201627	0,823909	0,907714	7,543463	7,560279
14	40	0,050444	0,224597	0,201554	0,824008	0,907767	7,545900	6,331519

Tablo 6.32. Gerilim Yükselmesi + Harmonikler S15 için sonuçlar;

Sınıf	SNR_dB	MSE	RMSE	MAE	R_squared	Correlation	SNR_Improvement_dB	Time_sec
15	10	0,045217	0,212643	0,169726	0,958413	0,979088	13,822183	6,214386
15	20	0,044119	0,210043	0,168268	0,959422	0,979561	13,929171	6,762941
15	30	0,043868	0,209449	0,168545	0,959652	0,979677	13,954005	7,556063
15	40	0,043882	0,209480	0,169079	0,959640	0,9796701	13,952692	6,272859

Tablo 6.18 ile Tablo 6.32’ a kadar olan tablolarda kullanılan karşılaştırma parametreleri;

Sınıf: Harmonik seçim kombinasyonu (1–15 arası)

SNR_dB: Gürültü seviyesi (dB cinsinden)

Selected_Harmonics: Seçilen harmoniklerin listesi

Population & Generations: Algoritma parametreleri (muhtemelen genetik algoritma veya optimizasyon)

MSE: Ortalama Kare Hata

RMSE: Kök Ortalama Kare Hata

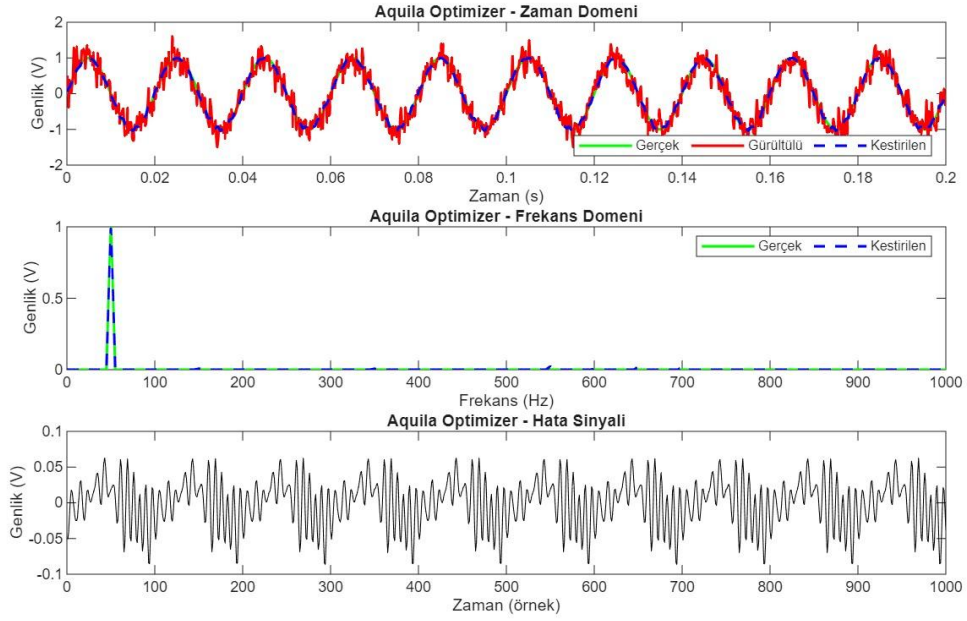
MAE: Ortalama Mutlak Hata

R_squared: Determinasyon katsayısı (R^2)

Correlation: Korelasyon katsayısı

SNR_Improvement_dB: SNR iyileştirme miktarı (dB)

Time_sec: İşlem süresi (saniye)



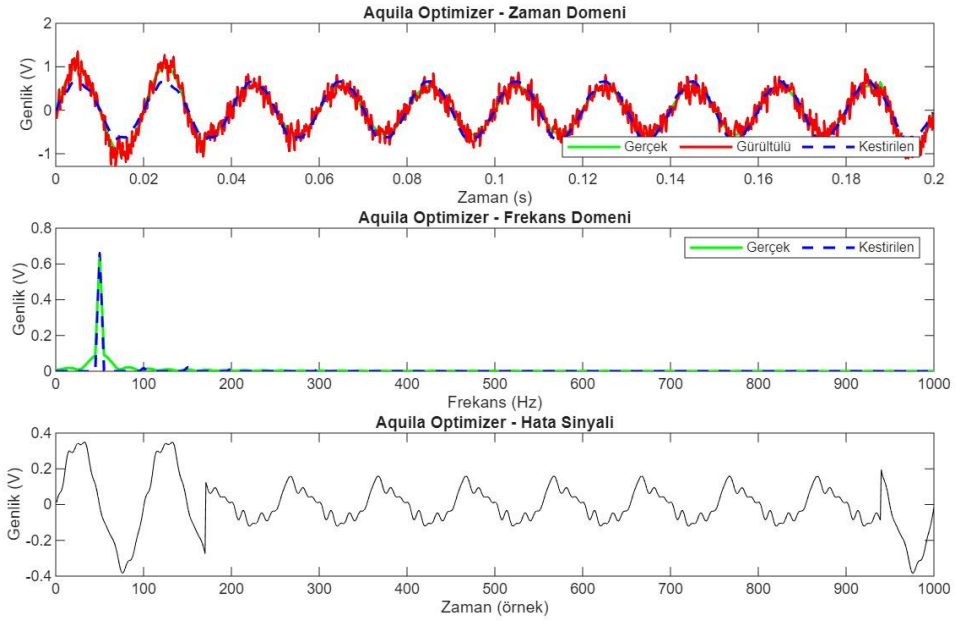
Şekil 6.18. S1 saf sinyal 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Tablo 3.5'te belirtilen deneysel güç kalitesi bozunumları kapsamında, Şekil 6.18'de S1 saf sinyalinin 10 dB SNR seviyesinde gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı grafikleri sunulmaktadır. Grafikler, sinyalin hem zaman hem de frekans domainindeki davranışını ortaya koymak üzere düzenlenmiştir.

Zaman domaini grafiğinde, saf S1 sinyali ile gürültü eklenmiş sinyal arasındaki fark belirgin şekilde görülmektedir. Gürültünün etkisi, sinyal genliğinde zayıflama ve bozulmalara neden olmuş; bu da hata sinyalinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Saf sinyalin temel bileşenleri, gürültüye rağmen ayırt edilebilmekte olup, işlem sonucunda gürültü bileşenlerinin minimize edildiği gözlemlenmektedir.

Frekans domaini grafiğinde ise, sinyalin spektral içeriği ve gürültünün frekans dağılımı karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Saf sinyalin baskın frekans bileşenleri, gürültülü sinyalde maskelenmekte; ancak uygulanan işlemler neticesinde bu bileşenlerin ön plana çıkarıldığı anlaşılmaktadır.

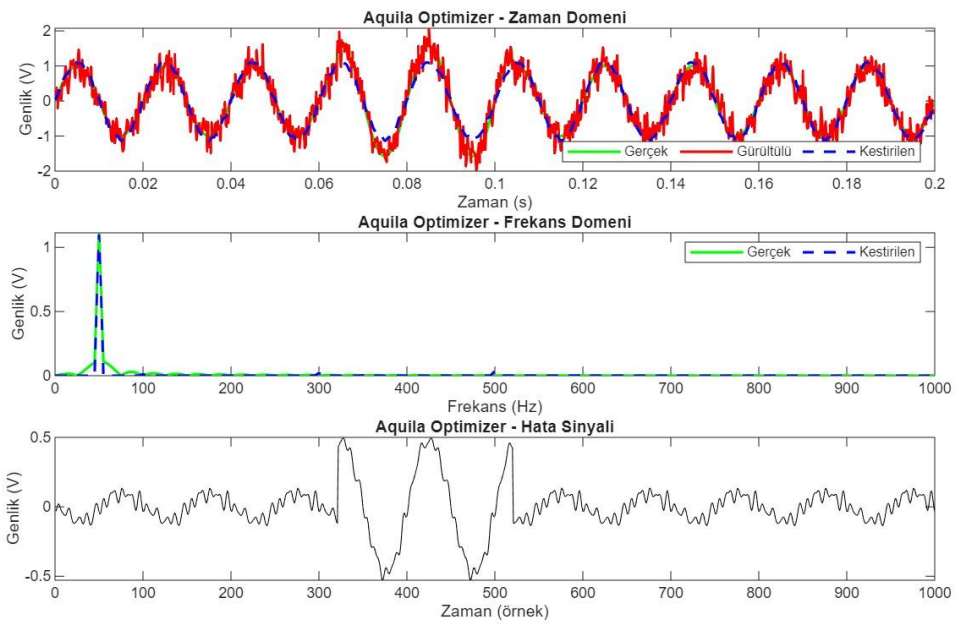
Sonuç olarak, Şekil 18'deki görseller, önerilen yöntemin gürültü altında dahi sinyal bileşenlerini etkin bir şekilde tanımlayabildiğini ve bozunum analizinde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, güç kalitesi izleme ve sinyal işleme uygulamaları açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır.



Şekil 6.19. S2 Gerilim düşmesi 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

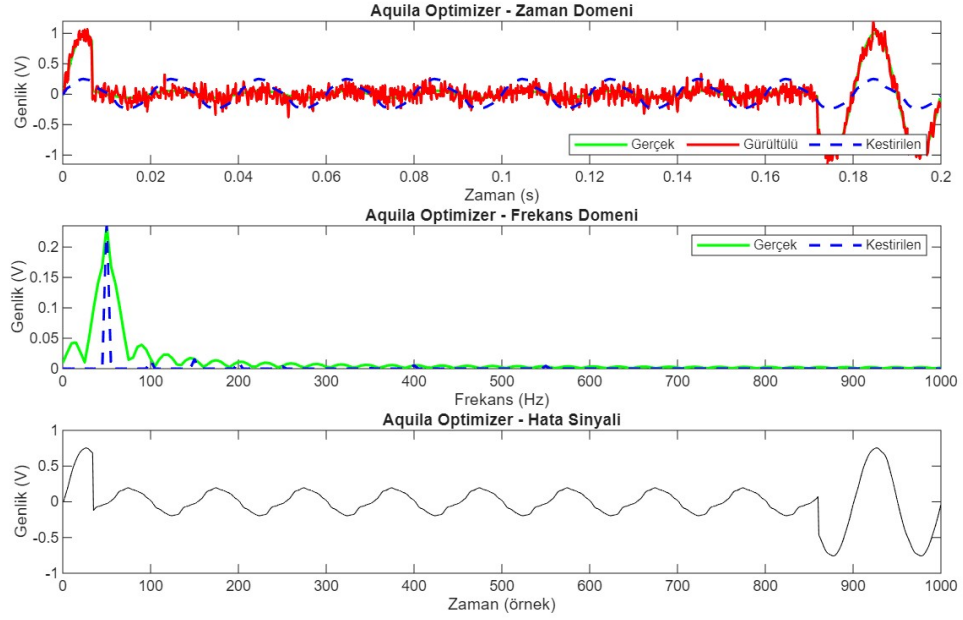
Şekil 6.19'da bir gerilim düşmesi olayını temsil eden S2 sinyalinin, 10 dB SNR seviyesinde gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Grafikler, sinyalin hem zaman hem de frekans domainindeki davranışını ayrıntılı olarak gösterecek şekilde düzenlenmiştir. Zaman domaini grafiğinde, orijinal S2 gerilim düşmesi sinyali ile gürültü eklenmiş sinyal arasındaki fark net bir şekilde görülmektedir. Gürültünün etkisi, sinyal genliğinde dalgalanmalar ve bozulmalara neden olmuştur. İşlem sonucunda, gürültü bileşenleri minimize edilerek, alta yatan gerilim düşmesi olayının şeklinin ortaya çıkarıldığı gözlemlenmektedir. Bu işlem, aynı zamanda olayın başlangıç ve bitiş noktalarının, zayıflatılmış da olsa gürültülü bir sinyal üzerinden tespit edilebilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen hata sinyali, C2 sinyalinin (muhtemelen temel bileşen veya bir referans sinyal) genliğinin zayıflatılmasıyla hesaplanmıştır. Frekans domaini grafiği, sinyalin spektral içeriğindeki değişimi karşılaştırmalı olarak sunar. Saf S2 sinyalinin karakteristik frekans bileşenleri, gürültülü ortamda gizlenmekteyken, uygulanan sinyal işleme teknikleri sayesinde bu bileşenlerin belirgin

hale getirildiği anlaşılmaktadır. Gürültünün geniş bantlı spektral dağılımına karşın, gerilim düşmesi olayına özgü frekans özelliklerinin korunduğu veya geri kazanıldığı görülmektedir. Şekil 19'daki görseller, önerilen metodolojinin, gürültü varlığında bile bir gerilim düşmesi olayını tespit etme ve karakterize etme konusundaki etkinliğini göstermektedir. Zaman domaininde olay sürelerinin, frekans domaininde ise bozunuma ait spektral imzaların başarılı bir şekilde ortaya çıkarılması, yöntemin güç kalitesi izleme ve arıza analizi uygulamaları için değerli bir araç olabileceğine işaret etmektedir.



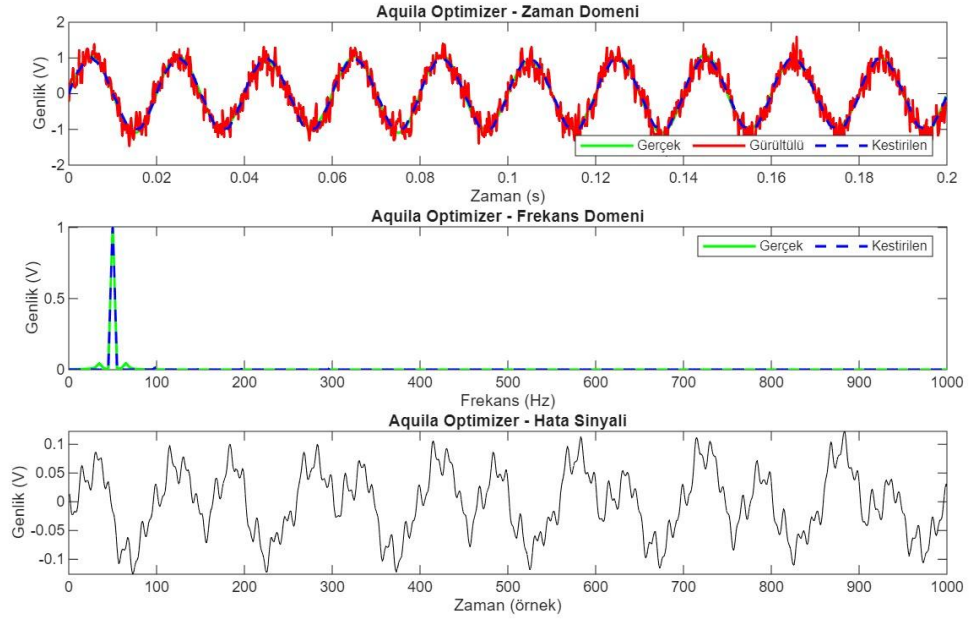
Şekil 6.20. S3 Gerilim yükselmesi 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.20'da bir gerilim yükselmesi olayını temsil eden S3 sinyalinin, 10 dB SNR'de gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Zaman domaininde, gürültünün neden olduğu bozulmalara rağmen, sinyal işleme ile gerilim yükselmesi olayının karakteristik genlik artışı ve olay süresi belirgin hale getirilmiştir. Hata sinyali, S3 genliğinin kontrollü zayıflatılmasıyla elde edilmiş ve olayın başlangıç/bitiş noktaları tespit edilebilmiştir. Frekans domaininde ise, gürültüye rağmen gerilim yükselmesine özgü spektral bileşenler korunmuş ve ortaya çıkarılmıştır. Bu bulgular, yöntemin, gürültülü ortamlarda dahi gerilim yükselmesi bozunumlarını tespit ve karakterize etmede etkin bir araç olabileceğini göstermektedir.



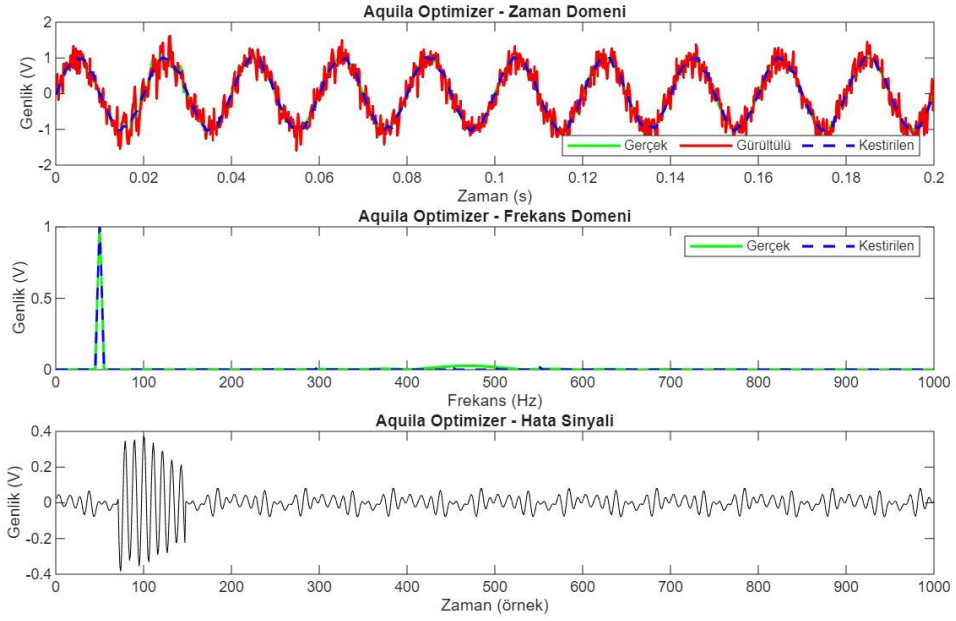
Şekil 6.21. S4 Kesinti 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.21’da bir kesinti olayını temsil eden S4 sinyalinin, 10 dB SNR’de gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Zaman domaininde, gürültünün neden olduğu bozulmalara rağmen, sinyal işleme ile kesinti olayının karakteristik genlik düşüşü ve olay süresi belirgin hale getirilmiştir. Hata sinyali, S4 bileşeninin ortaya çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Frekans domaininde ise, gürültüye rağmen kesinti olayına özgü spektral değişimler korunmuş ve ortaya çıkarılmıştır. Bu bulgular, yöntemin, gürültülü ortamlarda dahi kesinti bozunumlarını tespit ve karakterize etmede etkin bir araç olabileceğini göstermektedir.



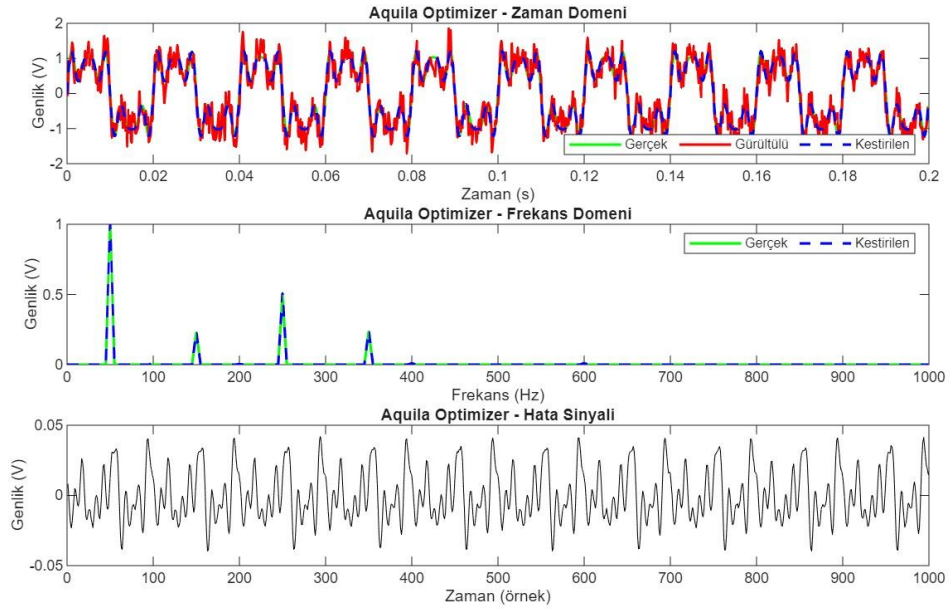
Şekil 6.22. S5 Kırpışma 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.22, bir kırpışma olayını temsil eden S5 sinyalinin, 10 dB SNR'de gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Temel bileşen sinyalinin kestirilmesiyle, hata sinyali olarak S5 kırpışma bileşeni elde edilmiştir. Zaman domaini grafiği, kestirilen saf sinyal ile hata sinyali olarak izole edilen kırpışmanın periyodik genlik değişimlerini açıkça ortaya koymaktadır. Frekans domaininde ise, kırpışma olayının karakteristik düşük frekanslı spektral içeriği, temel bileşenden ayrıştırılarak belirginleştirilmiştir. Bu bulgular, önerilen yöntemin, temel bileşen gürültüsünden arındırılmış bir kırpışma sinyalini hem zaman hem de frekans domaininde etkili bir şekilde izole edebildiğini ve bu tür bozunumların tespiti için umut verici bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.



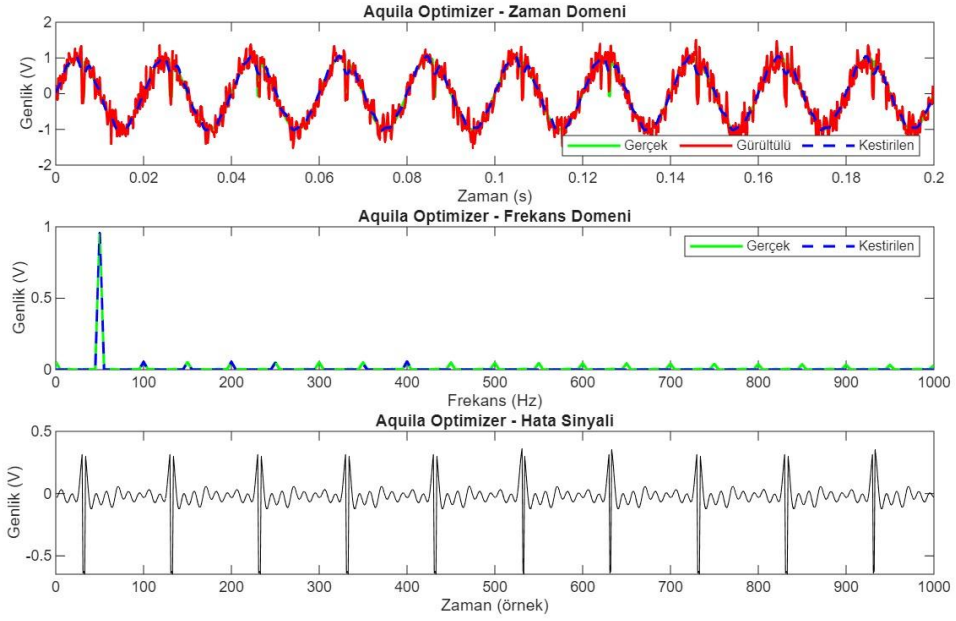
Şekil 6.23. S6 Geçici olaylar 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.23'te geçici olaylar olarak sınıflandırılan S6 sinyalinin, 10 dB SNR'de gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Temel bileşen sinyalinin kestirilmesiyle, hata sinyali olarak S6 geçici olay bileşeni izole edilmiştir. Zaman domaini grafiği, kestirilen saf sinyal ile hata sinyali olarak elde edilen ve ani, kısa süreli genlik değişimleriyle karakterize edilen geçici olayın karşılığını net bir şekilde göstermektedir. Frekans domaini analizi ise, bu ani olayların neden olduğu geniş bantlı spektral içeriğin, temel bileşenin frekans spektrumundan başarıyla ayrıştırılabildiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu bulgular yöntemin, gürültülü ortamlarda dahi hızlı geçici olayların tespiti ve karakterizasyonu için etkili bir araç olma potansiyelini desteklemektedir.



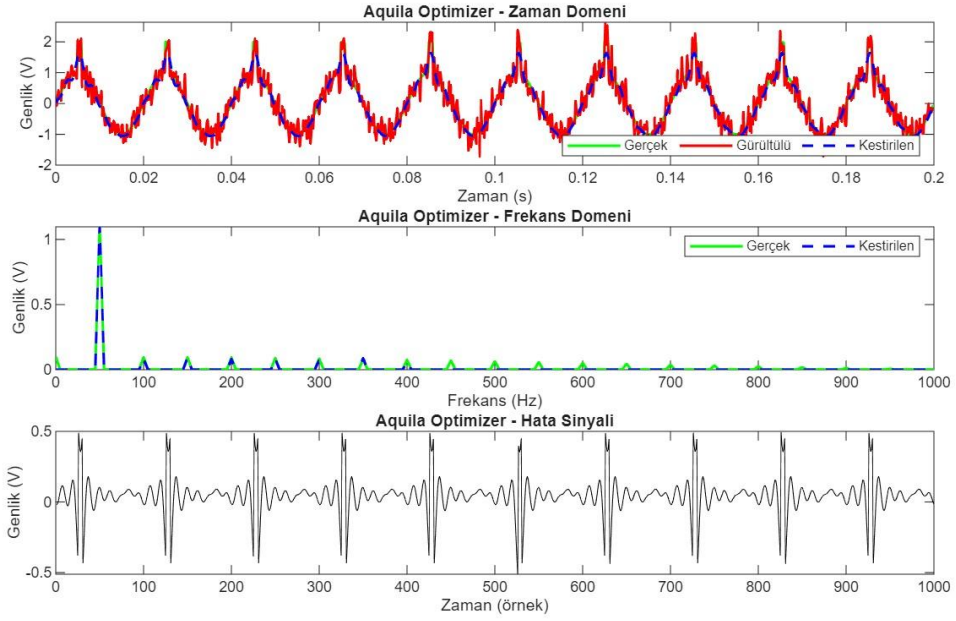
Şekil 6.24. S7 Harmonikler 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.24'te harmonik bozunumları temsil eden S7 sinyalinin, 10 dB SNR'de gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Gürültü sinyalinin minimize edilmesiyle, mevcut S7 sinyal bileşeni olan harmoniklerin karakteristik yapısı ortaya çıkarılmıştır. Zaman domaini grafiği, periyodik bozulmaların neden olduğu sinyal deformasyonunu, saf sinyal ile karşılaştırmalı olarak sergilemektedir. Frekans domaini analizi ise, temel frekans bileşenine ek olarak, harmoniklerin karakteristik tamsayı katları şeklindeki spektral çizgilerinin belirgin bir şekilde görülebildiğini ve gürültüden başarıyla ayrıştırılabildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, metodolojinin, güç sistemlerinde kritik bir sorun olan harmonik bozunumların, gürültülü koşullar altında dahi hem zaman hem de frekans domaininde tespit edilip analiz edilebilmesi için güvenilir bir çerçeve sunduğunu kanıtlamaktadır.



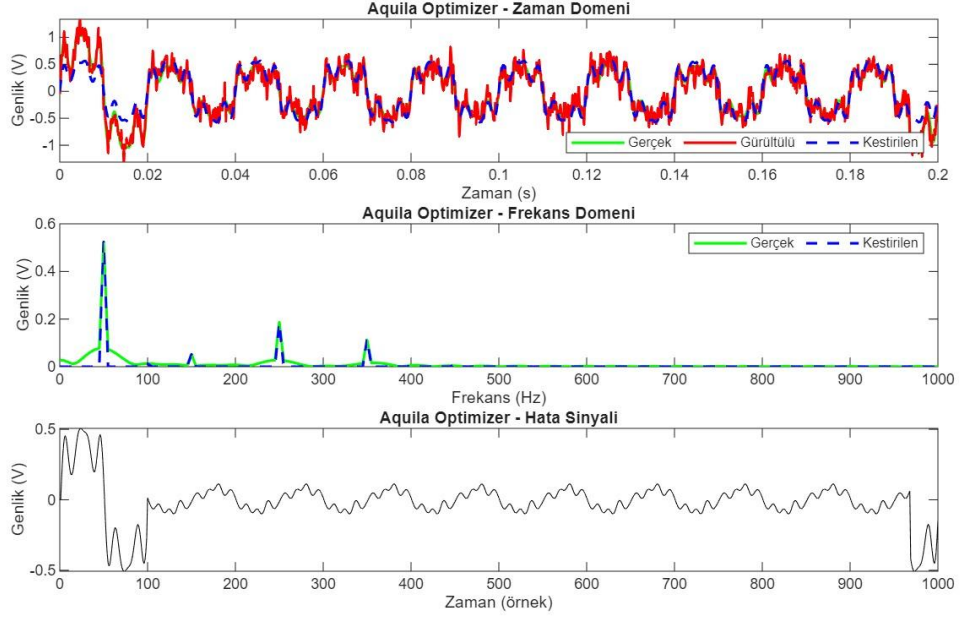
Şekil 6.25. S8 Çentik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.25'te bir çentik bozunumunu temsil eden S8 sinyalinin, 10 dB SNR'de gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Temel bileşen sinyalinin tespit edilmesiyle, hata sinyali olarak temel bileşene eklenmiş bu karakteristik bozunum izole edilmiştir. Zaman domaini grafiği, periyodik olarak tekrarlanan ani genlik düşüşlerini (çentikleri) açıkça ortaya koyarken, frekans domaini analizi, bu olayın spektrum üzerinde dar bantlı, seçici bir enerji azalması olarak kendini gösterdiğini belirginleştirmiştir. Her iki domainde de çentik bozunumunun karakteristik imzasının, gürültüden ve temel bileşenden başarıyla ayrıştırılabildiği gözlemlenmektedir. Bu bulgular, yöntemin, güç elektroniği cihazlarından kaynaklanan bu tür seçici bozunumların tespiti ve analizinde yüksek bir etkinlik sergilediğini kanıtlamaktadır.



Şekil 6.26. S9 Ani darbe 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.26’te bir ani darbe bozunumunu temsil eden S9 sinyalinin, 10 dB SNR’de gürültü eklenmiş hali ile karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Temel bileşen sinyalinin tespit edilmesini takiben, hata sinyali olarak bu ani ve yüksek genlikli darbe bileşeni başarıyla izole edilmiştir. Zaman domaini grafiği, ani darbe olayının keskin ve kısa süreli doğasını, temel sinyalden belirgin bir şekilde ayırıştırarak sergilemektedir. Frekans domaini analizi ise, ani darbenin neden olduğu geniş bantlı spektral enerji dağılımını ortaya koymakta ve bu bileşenin temel sinyalin frekans içeriğinden etkili bir şekilde ayrılabilmesini göstermektedir. Her iki domainde de elde edilen bu net ayırıştırma, metodolojinin, geçici ve yüksek enerjili bozunumların gürültülü ortamlarda dahi güvenilir bir şekilde tespit edilip tanımlanmasına olanak sağladığını ve güç kalitesi izleme sistemleri için değerli bir katkı sunduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 6.27. S10 Gerilim düşmesi + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

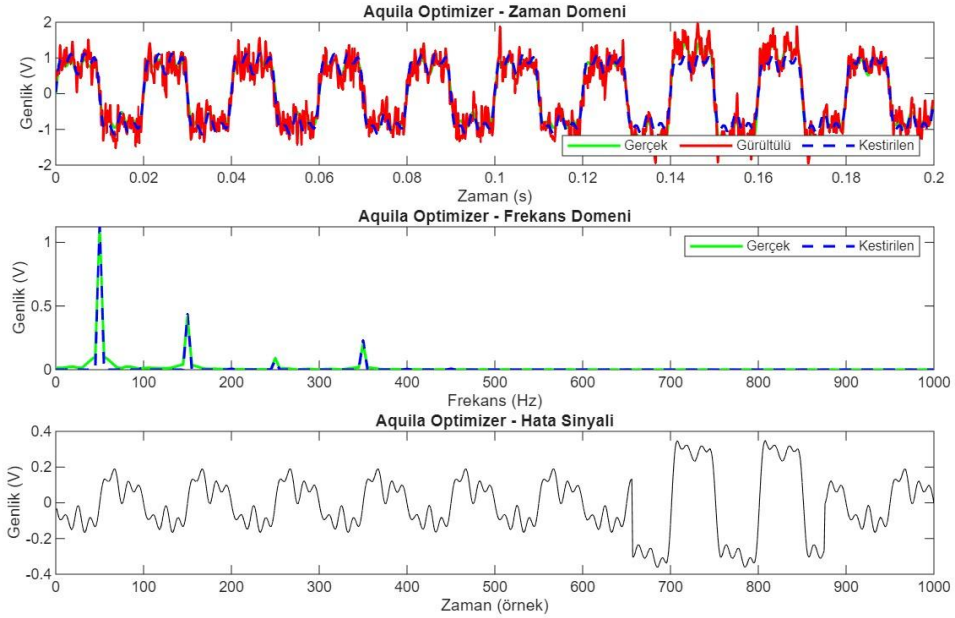
Şekil 6.27’de Tablo 3.5’te belirtilen ikili (çoklu) güç kalitesi bozunumlarından bir örneğini 10 dB SNR gürültü seviyesindeki karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Bu şekilde, aynı anda meydana gelen iki farklı bozunum türünün harmoniklerin veya bir kesinti ile ani darbe bileşik etkisi incelenmektedir.

Temel bileşen sinyalinin kestirilmesi ve gürültünün minimize edilmesi yoluyla, her bir bozunum bileşeninin hata sinyali olarak ayrıştırılabildiği görülmektedir. Zaman domaini grafiği, her iki bozunumun da karakteristik özelliklerini (örneğin, uzun süreli genlik değişimi ve ani, kısa süreli değişimler) aynı zaman ekseninde ortaya koymakta ve bu bileşik olayın karmaşık yapısını netleştirmektedir.

Frekans domaini analizi ise, her bir bozunum türünün spektrum üzerinde bıraktığı karakteristik çizgilerin bir arada görülebildiğini ve temel bileşenden başarıyla ayrılabilirdiğini göstermektedir.

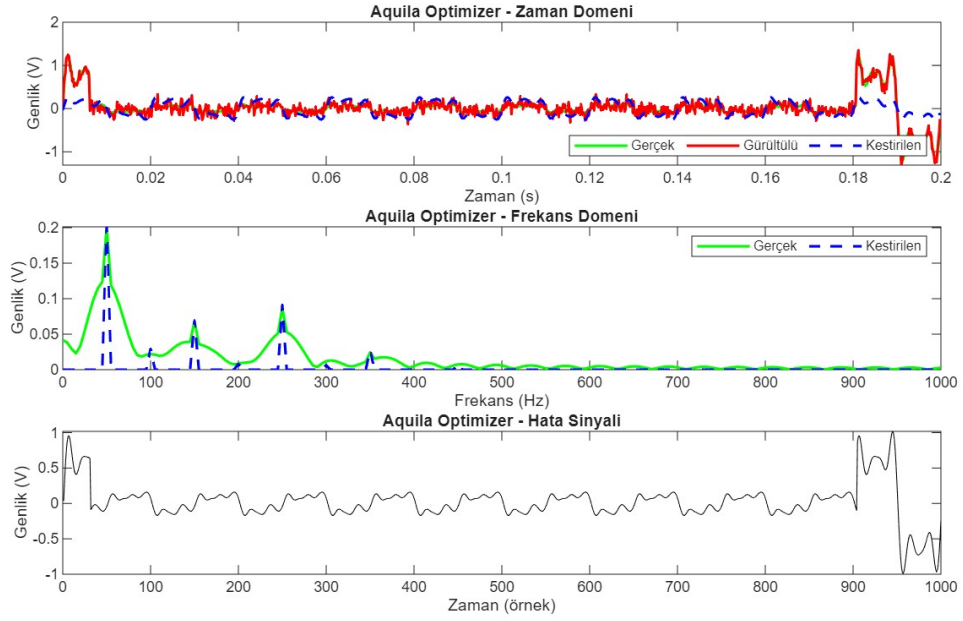
Bu bulgular, önerilen yöntemin yalnızca tekli değil, aynı zamanda örtüşen ve daha karmaşık bir yapıya sahip ikili bozunumların tespiti, ayrıştırılması ve karakterize edilmesi

için de son derece etkili ve güvenilir bir yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yetenek, gerçek dünya güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan çoklu bozunum senaryolarının analizi için metodolojinin pratik değerini daha da artırmaktadır.



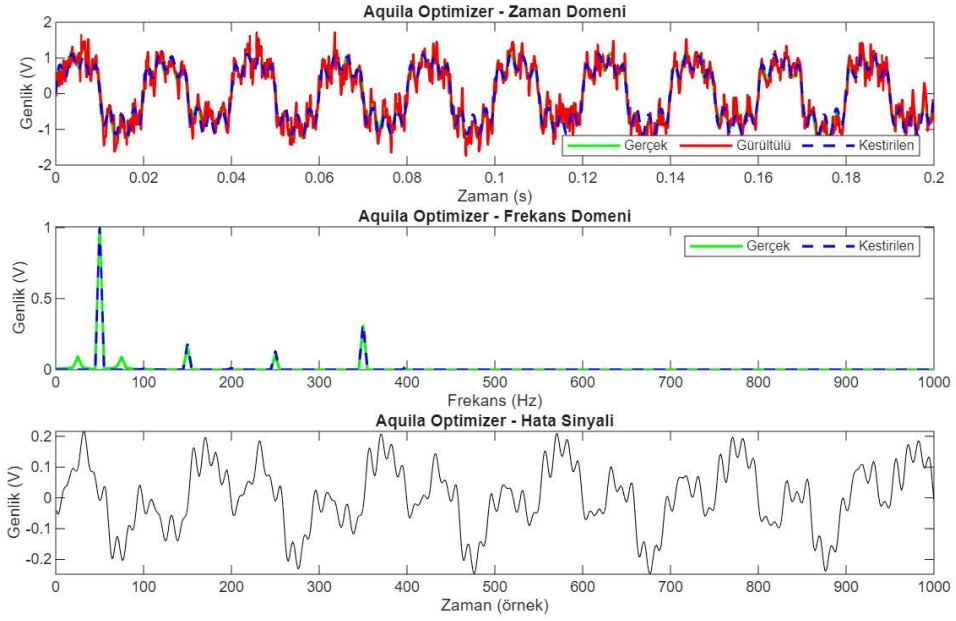
Şekil 6.28. S11 Gerilim yükselmesi + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.28, Gerilim Yükselmesi + Harmonik bozunumlarını temsil eden S11 sinyalinin 10 dB SNR gürültü altındaki karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Temel bileşen ayrıştırılarak, hem gerilim yükselmesi olayının uzun süreli genlik artışı hem de harmonik bozunumun periyodik etkisi hata sinyali olarak aynı anda izole edilmiştir. Zaman domaininde her iki bozunumun üst üste bindiği karmaşık yapı net bir şekilde görülürken, frekans domaininde harmonik bileşenlerin karakteristik tamsayı katları, temel sinyal üzerindeki geçici yükselmeye birlikte belirginleştirilmiştir. Bu sonuç, yöntemin bileşik bozunumların ayrıştırılması ve analizinde de etkin olduğunu doğrulamaktadır.



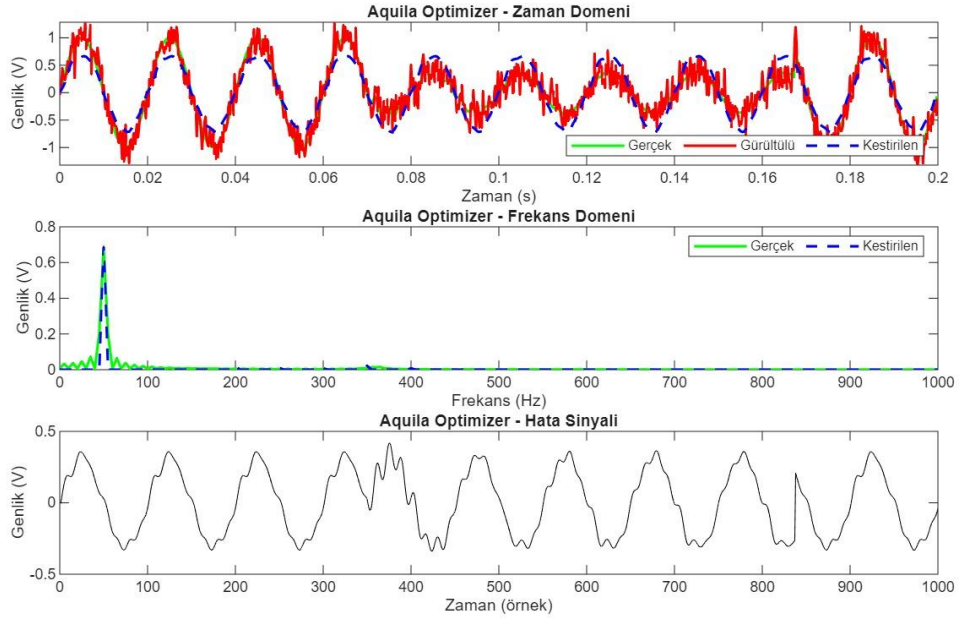
Şekil 6.29. S12 Kesinti + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.29’da Kesinti + Harmonik bozunumlarını içeren S12 sinyalinin 10 dB SNR gürültü seviyesindeki karşılaştırmalı grafiklerini sunmaktadır. Temel bileşenin kestirilmesiyle, kesintinin neden olduğu genlik kaybı ile harmoniklerin periyodik bozulmaları aynı anda hata sinyali olarak ortaya çıkarılmıştır. Zaman domaininde, kesintinin ani genlik düşüşü harmonik çarpılmalarla iç içe geçmiş olarak gözlemlenirken; frekans domaininde, harmonik bileşenlere ait karakteristik spektral çizgiler, kesinti süresince varlığını sürdürmektedir. Bu bulgu, yöntemin, bileşik bozunum senaryolarında dahi her bir bileşeni ayırt edebilme kapasitesini doğrulamakta ve güç kalitesi analizlerindeki dayanıklılığını pekiştirmektedir.



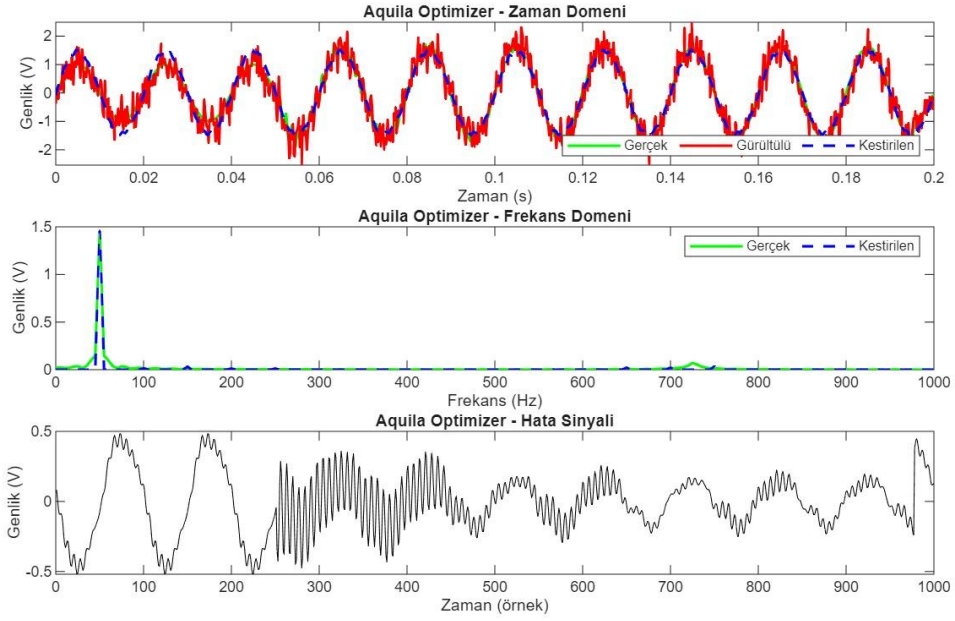
Şekil 6.30. S13 Kırpışma + Harmonik 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.30’da Kırpışma + Harmonik bileşik bozunumunu temsil eden S13 sinyalinin 10 dB SNR gürültü altındaki analizinde, temel bileşen ayrıştırılarak hem kırpışmanın düşük frekanslı salınımları hem de harmonik bozunumun periyodik yapısının hata sinyali olarak eşzamanlı izole edilebildiği görülmektedir. Zaman domaininde, kırpışmanın genlik modülasyonu üzerine bindirilmiş harmonik bozulmalar net bir şekilde gözlemlenirken; frekans domaininde ise kırpışmaya özgü alçak frekans bant genişlemesi ile harmonik bileşenler belirginleştirilmiştir. Bu sonuçlar, yöntemin, farklı frekans karakterine sahip bileşik bozunumları gürültülü ortamlarda dahi etkili şekilde ayırt edebildiğini ve güç kalitesi izleme sistemleri için değerli bir analitik kapasite sunduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 6.31. S14 Gerilim düşmesi + Geçici olay 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.31’de Gerilim Düşmesi + Geçici Olay bileşik bozunumunu temsil eden S14 sinyalinin 10 dB SNR gürültü altındaki analizinde, temel bileşen ayrıştırılarak hem gerilim düşmesinin sürekli genlik azalması hem de geçici olayın ani yüksek frekanslı bileşenlerinin hata sinyali olarak eşzamanlı tespit edilebildiği görülmektedir. Zaman domaininde, gerilim düşmesi periyodunda ani bir geçici olayın neden olduğu keskin darbe açıkça gözlemlenirken; frekans domaininde ise gerilim düşmesine ait alçak frekanslı bileşenlerle birlikte geçici olayın geniş bantlı spektral enerji dağılımı belirginleştirilmiştir. Bu bulgular, yöntemin hem yavaş hem de hızlı dinamiklere sahip bileşik bozunumları güvenilir şekilde analiz edebildiğini ve gerçek şebeke koşullarındaki karmaşık arıza senaryolarının çözülmesinde etkin bir araç olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 6.32. S15 Gerilim yükselmesi + Geçici olay 10dB SNR gürültülü karşılaştırma grafikleri

Şekil 6.32’te Gerilim Yükselmesi + Geçici Olay bileşik bozunumunu temsil eden S15 sinyalinin 10 dB SNR gürültü altındaki analizinde, temel bileşen ayrıştırılarak hem gerilim yükselmesinin sürekli genlik artışı hem de geçici olayın ani yüksek frekanslı bileşenlerinin hata sinyali olarak eşzamanlı tespit edilebildiği görülmektedir. Zaman domaininde, gerilim yükselmesi periyodunda ani bir geçici olayın neden olduğu keskin sapma net bir şekilde gözlemlenirken; frekans domaininde ise gerilim yükselmesine ait temel frekans bileşenleriyle birlikte geçici olayın geniş bantlı spektral içeriği belirginleştirilmiştir. Bu sonuçlar, yöntemin birbiriyle örtüşen farklı zaman-frekans karakteristiklerine sahip bileşik bozunumları yüksek doğrulukla analiz edebildiğini ve gerçek şebeke koşullarındaki karmaşık güç kalitesi olaylarının teşhisinde güvenilir bir yaklaşım sunduğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak; Tablo 3.5 Deneysel olarak üretilmiş güç kalitesi bozunum örneklerine ait sayısal sonuçlar ve grafikler incelendiğinde;

En iyi performans gösteren sınıflar Class 1 ve Class 7 yüksek R^2 (~ 0.999), düşük MSE ve yüksek SNR iyileştirmesi ile öne çıkıyor. Özellikle Class 7, 40 dB SNR’de 55.93 dB iyileşme ile en yüksek kazancı sağlamıştır. En düşük performans gösteren sınıflar ise

Class 4 ve Class 12 düşük R^2 (~ 0.29) ve düşük SNR iyileştirmesi (~ 1.5 dB) ile en zayıf başarılı sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

SNR arttıkça genel olarak MSE, RMSE, MAE değerleri azalıyor, R^2 ve SNR iyileştirmesi arttığı tespit edilmiştir. Özellikle Class 1 ve Class 7'de yüksek SNR'de neredeyse mükemmel yakın sonuçlar elde edilmiştir. Tüm sınıflarda SNR'den bağımsız işlem süresi açısından benzer ($\sim 6-7$ saniye) sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Sınıflandırmada farklı harmonik seçimlerinin sinyal kalitesi ve gürültü giderme üzerindeki etkisini karşılaştırmak için en iyi sonuçları elde eden en iyi üç sınıfa ait değerler aşağıdaki Tablo 6.33'te verilmiştir.

Tablo 6.33.. En iyi üç sınıf SNR 40 dB için karşılaştırma

Class	MSE	R_squared	SNR_Improvement_dB
1	1.32 e-06	0.999997	55.77 dB
5	0.00243	0.9952	23.20 dB
7	1.73 e-06	0.999997	55.93 dB

7. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında geliştirilen SALSAO hibrit yönteminin, güç sistemlerindeki harmonik bozulmaların ve diğer bozunum türlerinin tespitinde yüksek doğruluk, gürültüye karşı dayanıklılık ve güvenilirlik sağladığı deneysel olarak kanıtlanmıştır. Ancak, elde edilen bu olumlu sonuçlar ışığında, çalışmanın kapsamını genişletmek ve yöntemin performansını daha da artırmak amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Gerçek Zamanlı Uygulama ve Donanım Gerçekleştirimi: Bu çalışmada geliştirilen SALSAO algoritmasının performansı, sentetik ve kamuya açık gerçek veri setleri üzerinde başarıyla test edilmiştir. Bir sonraki aşama olarak, algoritmanın gerçek zamanlı çalışabilirliğini doğrulamak için FPGA (Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi) veya yüksek hızlı DSP (Dijital Sinyal İşlemci) tabanlı ölçüm cihazları üzerinde uygulanması ve performansının sahada değerlendirilmesi önerilmektedir.

Çoklu Bozunum Senaryolarının Derinlemesine İncelenmesi: Tez kapsamında, SALSAO yöntemi birkaç ikili bozunum (örneğin, gerilim düşmesi + harmonik) için test edilmiştir. Literatürde daha karmaşık olabilecek üçlü veya daha fazla bozunumun aynı anda gözlemlendiği senaryolar mevcuttur. Algoritmanın, bu tür çoklu ve karmaşık bozunumların birbirinden ayrıştırılması ve karakterize edilmesindeki başarımının araştırılması önemli bir katkı sağlayacaktır.

Farklı Optimizasyon Algoritmaları ile Hibrit Yapıların Geliştirilmesi: Bu çalışmada, AO ve SA algoritmalarının hibrit kullanımının başarısı gösterilmiştir. Farklı meta-sezgisel algoritmaların (örneğin, son dönemde çıkan algoritmaların) güçlü yönlerini birleştiren yeni hibrit yapıların (üçlü hibritler gibi) keşfedilmesi, yakınsama hızının ve global optimuma ulaşma kabiliyetinin daha da iyileştirilmesine olanak tanıyabilir.

Algoritma Parametrelerinin Otomatik Optimizasyonu: SALSAO ve diğer meta-sezgisel yöntemlerin performansı, seçilen kontrol parametrelerine (popülasyon büyüklüğü, jenerasyon sayısı, soğuma programı vb.) hassastır. Gelecek çalışmalarda, bu parametrelerin farklı sinyal koşullarına göre otomatik ve uyarlanabilir şekilde optimize edilmesini sağlayan bir mekanizmanın geliştirilmesi, yöntemin kullanıcı bağımlılığını azaltacak ve pratik uygulanabilirliğini artıracaktır.

Gelişmiş Gürültü Modelleri ve Filtreleme Teknikleri ile Entegrasyon: Çalışmada, algoritmanın AWGN (Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültüsü) altındaki performansı değerlendirilmiştir. Gerçek güç sistemlerinde, gürültü yapısı daha karmaşık olabilmektedir. Önerilen yöntemin, ani, keskin, kısa süreli ve yüksek genlikli darbelerden (impulslardan) oluşan empulsif gürültü veya spektral güç yoğunluğu tüm frekanslarda eşit olmayan renkli gürültü gibi daha gerçekçi gürültü modelleri altındaki dayanıklılığının test edilmesi ve gerekirse ön işleme amaçlı gelişmiş adaptif filtreleme teknikleri ile entegre edilmesi önerilir.

Akıllı Şebeke ve Mikro şebeke Uygulamalarına Entegrasyon: Harmonik tespiti, akıllı şebekeler ve dağıtılmış enerji kaynaklarının entegre olduğu mikro şebekeler için kritik bir öneme sahiptir. Bu tezde geliştirilen SALS AO tabanlı bir izleme sisteminin, akıllı şebeke altyapısına entegre edilerek, gerçek zamanlı güç kalitesi izleme, hızlı arıza tespiti ve otomatik harmonik kompanzasyon sistemlerini tetikleyecek bir araç olarak kullanılması, gelecekteki endüstriyel uygulamalar için potansiyel bir araştırma yönü oluşturmaktadır.

Bu öneriler doğrultusunda yapılacak çalışmalar, hem önerilen SALS AO yönteminin yeteneklerini geliştirecek hem de güç kalitesi analizi ve yönetimi alanındaki akademik ve endüstriyel uygulamalara önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- 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.
- Akkaya, S. (2023-a). Güç Kalitesi Bozukluklarının Sınıflandırılmasına Yönelik Ampirik Araştırmalara Genel Bir Bakış. *Mühendislikte Öncü ve Çağdaş Çalışmalar*, 410-431.
- Akkaya, S. (2023-b). An Overview of the Empirical Investigations into the Classification of Power Quality. *Pioneer and contemporary studies in engineering*, Duvar Yayınları, (409-430).
- 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.
- 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.
- Ercire, M., & Ünsal, A. (2021). Güç Kalitesi Olay İşaretlerinin LabVIEW ile Üretilmesi ve Doğrulanması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 868-881. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.972028>
- 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.
- Kalınlı, A. (2002). Elman Ağının Simulated Annealing Algoritması Kullanarak Sistem Kimliklendirme İçin Eğitilmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 15(2), 25-42.
- 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.
- 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.
- Nedimoğlu, E., & Gümüş, B. (2019). Şebekeye bağlı güneş enerji santrallerinin harmoniklerine etki eden parametrelerin araştırılması [Investigation of parameters affecting harmonics of grid-connected solar power plants]. DÜMF Mühendislik Dergisi, 10*(3), 919-931. <https://doi.org/10.24012/dumf.605070>
- Oğuzalp, Ş. N., Akkaya, S., & Eminoğlu, U., (2025). Comparison of advanced metaheuristic algorithms for harmonic detection in power systems Güç sistemlerinde harmonik tespiti için gelişmiş meta sezgisel algoritmaların karşılaştırılması. *Gumushane Universitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.15, no.2, 620-638.
- 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. Mcquilkin. Harmonics causes, effects, measurements, and analysis : an update. *IEEE transactions on industry applications*. 26.6 (1990); 1034-1042.
- Rüstemli, S., Cengiz, M.S., & Dinçer, F., (2013). Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, cilt. 2, hayır. 1, s. 30–38*.
- 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.
- 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.
- Yalçın, N.A., 2021. Harmonik kestiriminde yeni hibrit yaklaşımlar. (Doktora Tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi. Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

