



**SÜREKLİ ZAMANLI KAOTİK SİSTEM TABANLI
BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI'NIN
GELİŞTİRİLMESİ**

Tuncay CİGAL

**Yüksek Lisans Tezi
Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI**

EYLÜL -2018

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ ZAMANLI KAOTİK SİSTEM TABANLI BALİNA OPTİMİZASYON
ALGORİTMASI'NIN GELİŞTİRİLMESİ

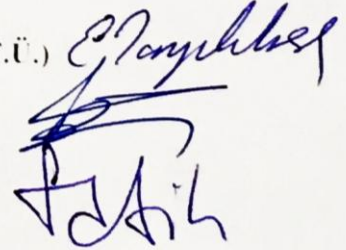
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuncay CİGAL

(132137104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.08.2018
Tezin Savunulduğu Tarih : 14.09.2018

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Bilal ALATAŞ (F.Ü.)
Doç. Dr. M. Fatih TALU (İ.Ü.)



EYLÜL - 2018

ÖNSÖZ

Bu çalışmada meta sezgisel optimizasyon yöntemleri ile ilgili araştırma yapılarak Balina Optimizasyon Algoritması'nın kaotik global yakınsama özelliğinin artırılması ve lokal çözüme takılıp kalmasının önlenmesi amaçlanmıştır. Kaotik haritalar ve sürekli zamanlı kaotik sistemlerin algoritmalar üzerindeki etkileri simülasyonlar ile incelenerek sonuçlar analiz edilmiştir.

Tez çalışması boyunca ve diğer çalışmalarımda benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini paylaşan çok kıymetli danışman hocam sayın Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI'na ve Yazılım Mühendisliği bölümünde geleceği inşa etmekte olan çok değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Tuncay CİGAL
Elazığ, 2018

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR.....	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Meta sezgisel Optimizasyon Algoritmaları	2
1.2. Tezin Amaç, Kapsam ve Organizasyonu.....	5
2. META SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI.....	7
2.1. Dal-Kök Algoritması	7
2.2. Güve Işık Algoritması.....	11
2.3. Balina Optimizasyon Algoritması	14
2.3.1. Avın Etrafını Sarma	15
2.3.2. Hava Kabarcığı Yöntemi İle Ava Yaklaşma	16
2.3.3. Av Arama (Global Arama)	17
3. DKA, GIA ve BOA’NIN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI	18
3.1. Kalite Testi Fonksiyonları	18
3.2. Mühendislik Tasarım Problemleri	20
3.2.1. Basınçlı Kap Problemi	20
3.2.2. Yay Germe/Sıkıştırma Problemi.....	21
3.3. Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi	21
3.4. Kalite Test Fonksiyonları ile Yapılan Deneyler	22
3.4.1. Duyarlılık Analizi	27
3.5. Mühendislik Problemleri ile Yapılan Deneyler	29
3.6. Bulgular ve Tartışma	31
4. KAOTİK HARİTALI BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI ...	32
4.1. Kaotik Haritalar	32
4.1.1. Lojistik Harita	33

4.1.2.	Çadır Harita.....	33
4.1.3.	Çember Harita.....	34
4.1.4.	Çebişev Haritası	34
4.1.5.	Gaus Harita	35
4.1.6.	Sinüs Harita.....	35
4.1.7.	Sinüzoidal Yineleyici.....	36
4.1.8.	Singer Harita	36
4.1.9.	Parçalı Harita	37
4.1.10.	İteratif Harita.....	37
4.2.	Kaotik Haritalı BOA Yöntemleri.....	38
4.3.	Deneyler.....	38
4.3.1.	Kalite Test Fonksiyonları ile Yapılan Deneyler	39
4.3.2.	Mühendislik Problemleri ile Yapılan Deneyler	50
4.4.	Bulgular ve Tartışma	51
5.	META SEZGİSEL ALGORİTMALAR İÇİN SÜREKLİ ZAMANLI KAOTİK SİSTEMLER	52
5.1.	Sürekli Zamanlı Kaotik Sistemler.....	52
5.2.	Deneyler.....	53
5.2.1.	Kalite Testi Fonksiyonları ile Yapılan Deneyler	54
5.2.2.	Mühendislik Problemleri ile Yapılan Deneyler	59
5.3.	Bulgular ve Tartışma	60
6.	SONUÇ	61
	KAYNAKLAR.....	62
	ÖZGEÇMİŞ.....	66

ÖZET

SÜREKLİ ZAMANLI KAOTİK SİSTEM TABANLI BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI'NIN GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında meta sezgisel optimizasyon yöntemleri ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. Doğadan esinlenen yeni optimizasyon yöntemlerinden olan Balina Optimizasyon Algoritması incelenerek kalite test fonksiyonları ve mühendislik tasarım problemleri ile algoritmanın performansı test edilmiştir. Kaotik haritalar ve sürekli zamanlı kaotik sistemler kullanılarak algoritmanın farklı versiyonları oluşturulmuştur.

Meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının stokastik yapılarından dolayı rastgele sayı dizileri bu alanda sıkça kullanılmaktadır. Rastgele üretilen sayı dizilerinin dağılımları algoritmaların global optimuma yakınsamalarında oldukça etkili olmaktadır. Bu nedenle rastgele sayı üretici olarak kaotik haritalar meta sezgisel optimizasyon algoritmaları ile birlikte kullanılabilir. Bu tez çalışmasında kaotik haritaların meta sezgisel algoritma üzerindeki etkisi incelenmiş ve bazı durumlarda sürekli zamanlı kaotik sistemlerin kullanılmasının kaotik haritalardan daha faydalı olabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Meta sezgisel Algoritmalar, Kaos, Sürekli Zamanlı Kaotik Sistemler, Optimizasyon

SUMMARY

DEVELOPMENT OF WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON CONTINUOUS TIME CHAOTIC SYSTEM

In the scope of this study, literature search about meta-heuristic optimization methods was performed. Whale Optimization Algorithm which is one of the new optimization method inspired by nature was examined and performance of the algorithm has been tested in benchmark functions and real engineering problems. Different versions of the algorithm were created using chaotic maps and continuous time chaotic systems.

Because of the stochastic structure of the meta-heuristic optimization algorithms, random number sequences are frequently used in this area. The distributions of randomly generated number sequences are very effective on convergence of algorithms to the global optimum. For this reason, as a random number generator, chaotic maps can be used with heuristic optimization algorithms. In this thesis study, the effect of the chaotic map on the meta-heuristic algorithm is examined and it has been shown that the use of continuous time chaotic systems may be more useful than chaotic maps in some cases.

Keywords: Meta-Heuristic Algorithms, Chaos, Continuous Time Systems, Optimization

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Meta sezgisel yöntemler.....	4
Şekil 2.1. (a) Örümcek bitkisi, (b) Rodos çimi	7
Şekil 2.2. Güvelerin doğrusal hareketi	11
Şekil 2.3. Işık kaynağına yakın alanda spiral yol çizgisi.....	12
Şekil 2.4 Kambur balinaların hava kabarcığı yöntemi ile avlanması.....	15
Şekil 3.1. Basıncılı kap tasarım problemi.....	20
Şekil 3.2. Yay germe / sıkıştırma tasarım problemi	21
Şekil 3.3. (a) F1, (b) F6, (c) F15, (d) F20 fonksiyonları için BOA'nın yakınsama grafikleri.....	27
Şekil 3.4. (a) F1, (b) F6, (c) F15, (d) F20 fonksiyonları için GIA'nın yakınsama grafikleri.....	28
Şekil 3.5. (a) F1, (b) F6, (c) F15, (d) F20 fonksiyonları için DKA'nın yakınsama grafikleri.....	29
Şekil 4.1. Lojistik harita grafiği	33
Şekil 4.2. Çadır harita grafiği	33
Şekil 4.3. Çember harita grafiği	34
Şekil 4.4. Çebişev harita grafiği	34
Şekil 4.5. Gaus harita grafiği	35
Şekil 4.6. Sinüs harita grafiği	35
Şekil 4.7. Sinüzoidal yineleyici harita grafiği	36
Şekil 4.8. Singer harita grafiği	36
Şekil 4.9. Parçalı harita grafiği.....	37
Şekil 4.10. İteratif harita grafiği	37

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1. DKA sözde kodu	9
Tablo 2.2. GIA sözde kodu	12
Tablo 2.3. BOA'nın sözde kodu	17
Tablo 3.1. Tek modlu kalite test fonksiyonları	18
Tablo 3.2. Çok modlu kalite test fonksiyonları	19
Tablo 3.3. Sabit boyutlu çok modlu fonksiyonlar.....	19
Tablo 3.4. Tek modlu kalite testi fonksiyonları ile yapılan deney sonuçları.....	23
Tablo 3.5. Çok modlu kalite testi fonksiyonları ile yapılan deney sonuçları	24
Tablo 3.6. Sabit boyutlu çok modlu kalite testi fonksiyonları ile yapılan deney sonuçları	25
Tablo 3.7. Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları	26
Tablo 3.8. Basınçlı kap problemi test sonuçları.....	29
Tablo 3.9. Yay germe / sıkıştırma problemi test sonuçları	30
Tablo 3.10. Mühendislik tasarım problemleri Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları	30
Tablo 4.1. KHBOA1 için kalite test fonksiyonları sonuçları	39
Tablo 4.2. KHBOA2 için kalite test fonksiyonları sonuçları	40
Tablo 4.3. KHBOA3 için kalite test fonksiyonları sonuçları	42
Tablo 4.4. KHBOA4 için kalite test fonksiyonları sonuçları	43
Tablo 4.5. KHBOA5 için kalite test fonksiyonları sonuçları	44
Tablo 4.6. Her kaotik algoritma için kaotik haritaların başarılı oldukları fonksiyonlar	46
Tablo 4.7. Başarılı kaotik algoritmalar ile temel algoritmanın karşılaştırmalı sonuçları ...	47
Tablo 4.8. Wilcoxon işaretli sıralar testi karşılaştırma sonuçları	49
Tablo 4.9. Basınçlı kap tasarım problemi test sonuçları	50
Tablo 4.10. Yay germe / sıkıştırma problemi test sonuçları	50
Tablo 4.11. Mühendislik problemleri için Wilcoxon işaretli sıralar test sonuçları	51
Tablo 5.1. Sürekli zaman kaotik sistemler.....	53
Tablo 5.2. LSBOA versiyonları ve temel algoritmanın kalite test fonksiyonları sonuçları	54
Tablo 5.3. En iyi sonucu veren kaotik harita kullanan ve lorenz sistem kullanan algoritmaların kalite test fonksiyonları için karşılaştırmalı sonuçları	56
Tablo 5.4. Kaotik harita kullanan ve lorenz sistem kullanan algoritmalar için Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları	58
Tablo 5.5. Basınçlı kap tasarım problemi için alınan en iyi sonuçlar.....	59

Tablo 5.6. Yay germe / sıkıştırma problemi için alınan en iyi değerler	59
Tablo 5.7. Mühendislik problemleri için Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları	60



KISALTMALAR

BOA	: Balina Optimizasyon Algoritması
BYAO	: Bakteriyel Yem Arama Optimizasyonu
DE	: Diferansiyel Evrim
DKA	: Dal-Kök Algoritması
GA	: Genetik Algoritma
GIA	: Güve-Işık Algoritması
HAA	: Harmoni Arama Algoritması
KHBOA	: Kaotik Haritalı Balina Optimizasyon Algoritması
KKO	: Karınca Koloni Optimizasyonu
LSBOA	: Lorenz sistem kullanan Balina Optimizasyon Algoritması
ÖÖTA	: Öğretme-Öğrenme Tabanlı Algoritma
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
RSÜ	: Rastgele Sayı Üretici
ST	: Sahte Tavlama
YAK	: Yapay Arı Koloni Algoritması

SEMBOLLER LİSTESİ

t	: Mevcut iterasyon
T	: Maksimum iterasyon sayısı
x_i^t	: i . boyutun t . iterasyonundaki çözüm
r	: Rastgele oluşturulan sayı
d	: Boyut
a	: 2'den 0'a lineer azalan değişken
A, C	: Yakınsama vektörleri
D	: Uzaklık
N	: Popülasyon
M	: Güve popülasyonu
F	: Işık popülasyonu
tol	: Tolerans değeri
w	: Tel çapı
d	: Ortalama bobin çapı
L	: Uzunluk (veya bobin sayısı)
T_s	: Kabuk kalınlığı
T_h	: Basınçlı kabın baş kalınlığı
R	: İç yarıçap
L	: Kabın silindirik bölümünün başlık haricindeki uzunluğu

1. GİRİŞ

İnsanoğlu var olduğundan bu yana karmaşık dünya problemleri ile mücadele etmek zorunda kalmıştır. Bu anlamda, özellikle mühendislerin ya da profesyonel işlerle uğraşanların günlük çalışmalarında daima bir dizi karar vermeleri gerekir. Bu kararlar yaşadığımız dünyanın da ne kadar sağlıklı ve sorunsuz olacağını belirlediği için oldukça fazla etkiye sahiptir. Günümüz dünyasında belirlenen sorunlar için alınacak kararlar çoğu zaman karmaşık olabiliyor ve kullanılan klasik yöntemler sonuçları optimalden uzaklaştırabiliyor. Birçok bilim insanı ve özel şirketler bunun farkında olduğundan karar verme sistemleri için çokça çaba harcamışlardır. Bu nedenle matematiksel modelleme, hesaplama ve algoritma becerilerinin önemi giderek artmaktadır [1].

Farklı alanlardaki araştırmacıların doğanın çözdüğü zor problemlerden esinlenerek elde ettiği fikirlerden biri de optimizasyondur. Optimizasyon, bir problem için belirli koşullar altında arama süreci olarak tanımlanabilir. Optimizasyon teknolojisi, karar verme süreçlerini hızlandırmakta ve karar kalitesini arttırmakta kullanılarak gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin etkin, doğru ve gerçek zamanlı çözümünde fayda sağlamaktadır.

Optimizasyonda modelleme ve çözümleme önemli bileşenlerdendir. Gerçek dünya probleminin matematiksel olarak ifade edilmesi modelleme, elde edilen modeli sağlayan çözümün elde edilmesi ise çözümlemedir [2]. Modeller, temel bilimlerde ve mühendislikte yoğun olarak kullanılan büyük kapsamlı bir sistemin tüm özelliklerini yansıtacak daha küçük boyutlardaki yapılardır. Optimizasyon modelleri ise sistemin işleyişini ve özelliklerini yansıtan, sistemin içindeki ve çevresindeki diğer sistemlerle olan etkileşimleri kapsayan matematiksel ifadelerden oluşmaktadır.

Optimizasyon problemlerinin çözümü için önerilen birçok algoritma hem sistemin modelini hem de amaç fonksiyonunu oluşturmak için matematiksel modellere ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle çoğu zaman problemin yapısına, değişkenlerine ve kısıtlarına göre matematiksel model kurulmalıdır. Model kurulurken ilk önce karar değişkenleri ya da tasarım parametreleri olarak adlandırılan değişkenler tanımlanır. Daha sonra bu parametrelere bağlı olarak minimize veya maksimize edilecek bir maliyet fonksiyonu ve problem ile ilgili sınırlamalar tanımlanır. Karmaşık sistemlerde bu şekilde bir matematiksel denklem kurmak zordur ve kullanma maliyeti yüksektir. Ayrıca mühendislikte birçok

optimizasyon probleminin kısıtlayıcıları vardır ve doğrusal değildir. Bu gibi doğrusal olmayan problemlere çözüm bulabilmek için etkili optimizasyon algoritmaları gerekir.

Genel olarak optimizasyon algoritmaları deterministik ve stokastik olarak iki sınıfa ayrılabilir. Deterministik olan algoritmalar aynı başlangıç değerleri ile arama yaptıklarında aynı çözüm kümesine ulaşırlar. Diğer taraftan stokastik algoritmalar aynı başlangıç değerleri ile arama yapsalar bile farklı çözümlere ulaşabilirler. Bununla birlikte nihai sonuçlar biraz farklı olsa da, belirli bir doğruluk içinde aynı optimal çözümlere genellikle yakınsayacaktır. Deterministik algoritmaların hemen hepsi lokal arama algoritmalarıdır ve lokal aramalarda etkilidirler. Ancak global optimum noktası arama alanının uzağında ise lokal optimuma takılma riskleri fazladır [3].

Deterministik yöntemler kendi içinde gradyan tabanlı ve hesaplamalı metotlara ayrılır. Tamamen hesaplamalı metotlarda gradyan hesaplamalarına gerek yoktur fakat bu metotlar yavaş ve verimsizdir. Gradyan tabanlı algoritmalar çözüm arama için amaç fonksiyonlarının türevlerini kullanırlar ancak bu metotlar amaç fonksiyonunun düz ve pürüzsüz olmadığı durumlarda global optimuma yakınsamayı garanti etmezler. Sonuç olarak birden fazla lokal optimuma sahip olan problemlerde deterministik yöntemlerin başarısının düşük olduğu söylenebilir [4].

Tasarım problemleri genellikle doğrusal değildir ve karmaşık kısıtlayıcılar içerirler. Klasik optimizasyon algoritmaları ise birçok doğrusal ve doğrusal olmayan problemde yetersizdir. Bu nedenle stokastik yapıları birçok meta sezgisel optimizasyon algoritması önerilmiştir.

1.1. Meta sezgisel Optimizasyon Algoritmaları

Meta sezgisel algoritmalar, karmaşık problemlerde veya kesin çözüm için sürenin kısıtlı olduğu durumlarda optimizasyon problemlerine uygulanabilecek uygun çözümler arayan algoritma olarak tanımlanabilir. En iyi çözümü garanti etmezler ama kısa sürede bir çözüm elde edeceklerini garanti ederler. Meta sezgisel algoritmaların hesaplama gücü iyi ve dönüşümleri kolaydır [5]. Klasik algoritmalarda başarının temel ölçütü zaman verimliliği iken meta sezgisel algoritmalarda başarının temel ölçütü çözümlerin ne kadar hızlı bulunabildiği ve ne kadar optimal olduğudur [6]. Ayrıca Yang ve Deb meta sezgisel algoritmaların en iyi iki özelliğinin yoğunlaşma ve çeşitlendirme olduğundan bahsetmiştir.

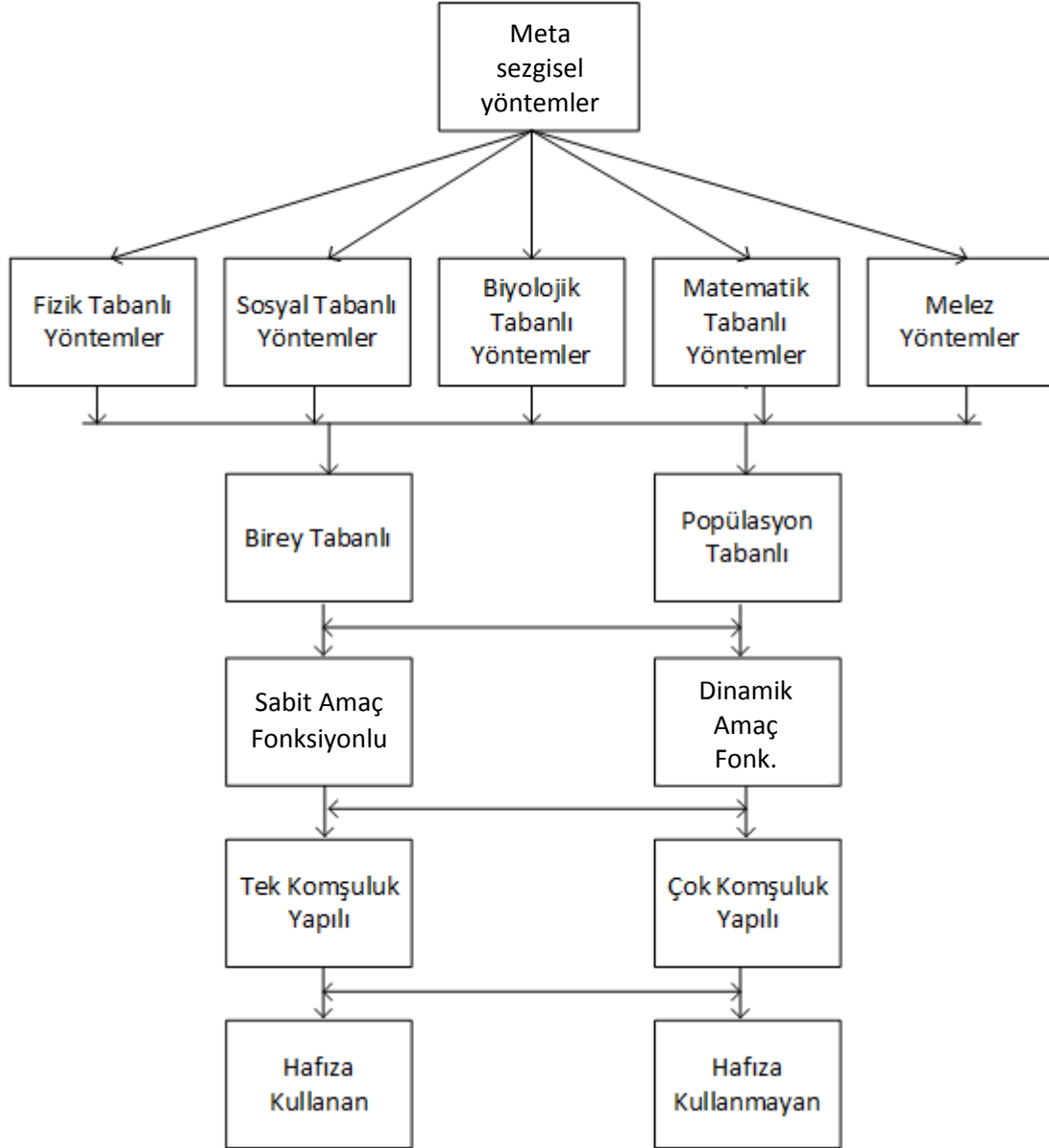
Yoğunlaşma en iyi adayları veya çözümleri seçmeyi amaçlarken çeşitlendirme ise algoritmanın arama alanını daha verimli bir şekilde keşfedebilmesini sağlar [7].

Pratik bir soruna çözüm bulabilmek için ilk girişimler Rechenberg eserlerinde bulunabilir [8]. Doğa karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için yeni optimizasyon algoritmalarına ilham kaynağı olmuştur. Meta sezgisel algoritmalar doğadan ilham alır ve etoloji, biyoloji, fiziksel davranışları taklit ederek sorunları çözer. Günümüzde doğadan ilham almış algoritmalar arasında Genetik Algoritma (GA) [9] , Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [10], Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO) [11], Yapay Arı Koloni Algoritması (YAK) [12,13], Sahte Tavlama (ST) [14,15], Öğretme-Öğrenme Tabanlı Algoritma (ÖÖTA) [16], Bakteriyel Yem Arama Optimizasyonu (BYAO) [17], Altın Oranlı Sinüs-Kosinüs Algoritması (ASKA) [18], Diferansiyel Evrim (DE) [19] ve bazı diğer algoritmalar dikkat çekmektedir.

Meta sezgisel algoritmaların ilham kaynaklarının benzer olmasına rağmen kendine özgü çözüm metotları ile farklılaşırlar ve oluşturulan problem modeline göre çözüm ararlar. Bu yüzden problem yapısına ve çözüm metoduna bağlı olarak uygulanan meta sezgisel yöntemler de çoğu zaman sürekli, kesikli optimizasyon gibi kategorilere ayrılmıştır. Aynı şekilde sezgisel tekniklerde kullanılan algoritmaya bağlı olarak; tek komşuluk yapısı, değişken komşuluk yapısı, hafıza kullanan ya da hafıza kullanmayan teknikler şeklinde ayrılabilirler. Bu tür durumlara kullanıcı kendi ihtiyaçları doğrultusunda karar vermek durumundadır [20].

Meta sezgisel algoritmalar ile ilgili diğer bir farklılık ise bir ya da daha fazla aday çözüm ile başlamalarıdır. Her iterasyonda bir aday çözüm ile başlayanlar aday çözümün değerini, birden fazla aday çözüm ile başlayanlar ise aday çözüm kümesini iyileştirirler. Bu iki sınıflandırma literatürde birey bazlı ve popülasyon bazlı algoritmalar olarak geçmektedir [21]. Bu iki yöntemin farklı avantaj ve dezavantajları vardır. Bir aday çözüm ile başlayanlar yani birey bazlı algoritmalarda hesaplama maliyeti ve iterasyon sayısı daha azdır ve erken yakınsarlar, ama lokal optimuma takılma riski fazladır. Birden çok aday çözüm ile başlayan popülasyon bazlı algoritmaların aday çözüm sayıları fazla olduğundan lokal optimumdan kaçma şansları daha fazladır. Popülasyon bazlı algoritmaların dezavantajı ise yüksek hesaplama maliyeti olarak verilebilir. Birey bazlı algoritmalara örnek olarak Tabu Arama [22,23] ve Tepe Tırmanma Algoritması [24] verilebilir. Popülasyon bazlı algoritmalara ise Parçacık Sürü Optimizasyonu [10,25], Kuş Sürüsü Algoritması [26], Karınca Koloni

Optimizasyonu [27] örnek olarak verilebilir. Şekil 1.1’de sezgisel yöntemlerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Meta sezgisel yöntemler [5]

Yukarıda bahsedilen farklılıkların yanında meta sezgisel algoritmaların ortak özellikleri de bulunmaktadır. Bütün meta sezgisel optimizasyon yöntemlerinin ortak özelliği az ya da çok keyfi başlangıç çözümü ile başlaması ve kurallar çerçevesinde iteratif olarak yeni çözümler üreterek bu çözümleri değerlendirmesidir. İterasyonlar sonunda ise arama sırasında bulunan en iyi değeri çözüm olarak kabul ederler. Algoritma çalışmasını

sonlandırmak için de benzer kriterler kullanılmaktadır. Devam eden iterasyonlar sırasında, önceki iterasyonlarda elde edilmiş en iyi çözümde beklenenden daha iyi bir gelişim olmazsa, bulunan değer kabul edilebilir bir çözüm olunca, belirlenen iterasyon sayısı ya da zamana ulaşılmış ise ya da parametrelerden biri veya birkaçı çalışmayı durdurur ise arama sonlandırılır.

Meta sezgisel yöntemlerin avantajlarının yanında, bu yöntemlerle bulunan çözümlerin optimum çözüm olup olmadığının belirsiz olması ve birçok parametrenin uygun şekilde tasarlanmasının gerekliliği gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Problemlerin çözümünde sezgisel teknikler kullanıldığında çözüm uzayında yer alan bütün çözümleri bulmak yerine sezgisel çözümün yaklaşımına bağlı olarak bazı çözümler bulunur. Bundan dolayı sezgisel yöntem kullanılarak elde edilmiş olan bir sonucun bu yöntemle bulunan en iyi sonuç olarak değerlendirilmesine karşın optimal olduğu söylenemez. Çözüm uzayındaki bütün çözümlerin gerçekleştirilmesi problemde yer alan kısıtlara bağlı olmakla birlikte çoğu zaman mümkün değildir [20].

Literatürde sezgisel optimizasyon algoritmaları için standart denilebilecek bazı kriterler oluşturulmuştur [28]. Çözüm kalitesi ve hesaplama zamanı herhangi bir algoritmanın etkinliğinin değerlendirilmesi için önemli kriterlerdir. Bundan dolayı iyi bir algoritma sunduğu parametreler ile kullanıcıya çözüm kalitesi ve hesaplama maliyeti arasında bir denge kurabilmesi için imkân vererek yeni alanlara kolaylıkla uygulanabilmelidir.

1.2. Tezin Amaç, Kapsam ve Organizasyonu

Bu çalışmada global optimizasyonda güncel yaklaşımlardan olan tek ve çok optimum nokta içeren optimizasyon problemlerinin çözümü için önerilen, Dal-Kök Algoritması (DKA), Güve Işık Algoritması (GIA) ve Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) incelenmiştir. Kalite test fonksiyonları ve mühendislik tasarım problemleri kullanılarak algoritmaların performansları test edilerek birbiri ile kıyaslanmıştır. Çalışmanın devamında ise kaotik haritaların algoritma üzerindeki etkisi incelenmiştir ve kaotik haritalar yerine sürekli zamanlı kaotik sistemler kullanılarak meta sezgisel algoritmaların performanslarının artırılması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde DKA, GIA ve BOA'dan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde bu algoritmaların performansları kalite test fonksiyonları ve gerçek mühendislik problemleri kullanılarak analiz edilmiş ve birbiri ile karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde BOA'nın kaotik haritalı versiyonları oluşturularak kaotik haritaların algoritma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Beşinci bölümde sürekli zamanlı kaotik sistemlerin kaotik haritalar yerine kullanılmasının algoritma performansına etkisi incelenmiştir. Altıncı bölümde ise tezde yapılan çalışmalar değerlendirilerek yorumlanmıştır.



2. META SEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Optimizasyon problemlerinin çözümü için önerilen güncel sezgisel yöntemler olan Dal-Kök Algoritması, Güve-Işık Algoritması ve Balina Optimizasyon Algoritması aşağıda alt başlıklar şeklinde açıklanmıştır.

2.1. Dal-Kök Algoritması

Dal-Kök algoritması (DKA) 2015 yılında F.Merrikh Bayat tarafından tek ve çok modlu optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma bazı bitkilerin yer değiştirme davranışından ilham alınarak geliştirilmiştir.

Hayvanlar kas gücü ve zekâlarını kullanarak ihtiyaç duyduğu daha iyi kaynaklara giderken bitkiler bunu yapamazlar. Muhtemelen, buna en iyi örnek havalar soğuduğunda daha sıcak yerlere göç eden kuşlar verilebilir. Ancak çilek ve örümcek gibi bitkiler kök ve dallarını kullanarak Şekil 2.1’de gösterildiği gibi farklı konumlarda yeni yavru bitkiler oluşturarak yer değişikliği yapabilir. [29].



(a)



(b)

Şekil 2.1. (a) Örümcek bitkisi, (b) Rodos çimi [29]

Bu algoritma su kaynağı ve mineral aramak için doğada kendi dalları ile yayılan ve aynı anda lokal arama için kök ve kökteki tüylerini şekillendiren çilek ve örümcek gibi bitkilerden ilham alır. Bu nedenle algoritma Dal-Kök algoritması olarak adlandırılmıştır.

Sezgisel yöntem olarak bitki dallarını kullanma fikri daha önce Bitki Yayılım Algoritması (BYA) 'nda kullanılmıştır [30]. Ancak, önerilen algoritma ile BYA arasında ilham kaynakları dışında benzerlik bulunmamaktadır.

Bitkilerde dallar yaprak ekseninde uzanır ve ana bitkiden dışarı doğru büyür. Ana bitki denilen ilk bitkiden dışarı doğru büyüyen dalın ikinci evresi, yavru bitki olarak adlandırılan ve yeni yavru bitkiler oluşturacak olan yeni bir bitkidir. Başlangıçta ince ve az sayıda kök büyüten yavru bitki verimli bir noktaya gelince daha fazla kök salarak ana bitki olur ve bağımsız olarak kendi yaşamını sürdürür. Ana bitki ile yavru bitkilerin genlerinin aynı olması ve toprağa farklı bir konumda yeni kök salmalarından dolayı bu bitkilerin üremesini bitkilerin yer değiştirmesi olarak düşünebiliriz.

Matematiksel açıdan bakılırsa bitkiler bir tür optimizasyon gerçekleştirir. Yani, bu tür bitkiler köklerini, dallarını ve kökteki tüylerini ayrı ayrı geliştirerek lokal ve global aramayı aynı anda gerçekleştirirler. Kök ve dalların gelişimi hemen hemen rastgele olur ama bir dal veya bir kök daha fazla su kaynağı olan bir yere geldiğinde tüm bitkinin büyümesini etkileyen daha fazla dallar, kökler ve kök tüyleri oluşturur. Eğer yavru bitki lokal optimumda sıkışır da daha fazla kök ve dal geliştirerek bulunduğu noktadan uzaklaşmaya çalışır. Bu gözlem DKA'da yeni rastgele başlangıç değerleri ile tekrar başlatma olarak modellenmiştir. Bitkilerin bu davranışları optimizasyon algoritmasına dönüştürülmek için 3 kural ile modellenmiştir;

- Her ana bitki dalları ile yayılır. Bu dallar rastgele büyür ve her biri aslında yeni bir bitkinin öncüsüdür. (büyük adımlar ile global arama)
- Her ana bitki kök ve köke bağlı yeni küçük dalları rastgele geliştirir. (nispeten büyük ve küçük adımlarla yerel arama)
- Zengin bir kaynağa ulaşan yavru dal bulunduğu noktaya kök salarak daha da büyür ve sonuç olarak daha geniş alana sahip olur. Diğer taraftan fakir kaynaklara ulaşan yavru dallar muhtemelen ölürlür.

DKA'nın sözde kodu Tablo 2.1'de verilmiştir. Algoritma her biri ana bitki olarak adlandırılan N_{pop} adet ve m boyutlu birey ile başlatılır. Daha sonra her iterasyonda Denklem 2.1 kullanılarak yavru bitki olarak adlandırılan bireyler oluşturulur [29]. İkinci iterasyondan itibaren bu bireyler ana bitkiyi modelleyerek yeni bireyler oluşturacaklardır.

$$x_{yavru}^k(i) = \begin{cases} x_{ana}^1(i) & k = 1 \\ x_{ana}^k(i) + d_{dal} * r_k, & k = 2, \dots, N_{pop} \end{cases} \quad (2.1)$$

Tablo 2.1. DKA sözde kodu [29]

```

Girdileri belirleme:
   $d_{dal}, d_{kök}$  : Yavru bitkilerin ana bitki ile olan uzaklıkları,
   $maks\_gecikme$ : Lokal minimuma takılma sayısı (sabit değer)
   $tol$  : iki sonuç arasındaki fark için sabit eşik değeri
   $N$ : Popülasyon sayısı
   $T$ : İterasyon sayısı
   $m$ :Popülasyon sayısı
   $d$ : Boyut sayısı
   $X_{ana}$ : Rastgele popülasyon oluştur (ana bitkiler)
   $iterasyon=0$ ;  $gecikme=0$ ;
while iterasyon<T
  Denklem 2.1 ile yavru bitkileri oluştur ( $X_{yavru}$ )
   $X_{en\_iyi} = en\_iyi(X_{yavru})$ 
  if  $iterasyon > 1$  ve  $(X_{en\_iyi} - X_{en\_iyi-1}) < tol$ 
    for  $i = 1: m$ 
      for  $j = 1: d$ 
        Denklem 2.3 ile geniş adımlı lokal arama yap
      end (for)
    end (for)
    for  $i = 1: m$ 
      for  $j = 1: d$ 
        Denklem 2.4 ile küçük adımlı lokal arama yap
      end (for)
    end (for)
  end (if)
   $fit(X_{yavru}) = amaçFonsiyonu(X_{yavru})$ ;
   $X_{ana-1} = X_{en\_iyi}$ ; //Sonraki iterasyonun ilk ana bitisi
   $X_{2..N} = ruletSeçim(X_{yavru})$ ; /* Sonraki iterasyonun diğer ana
                                     bitkilerini rulet seçim ile oluştur */
  if  $(X_{en\_iyi} - X_{en\_iyi-1}) < tol$ 
     $gecikme++$ ;
  else
     $gecikme=0$ ;
  if  $gecikme > maks\_gecikme$  ise  $X_{ana} = rand()$ ; // rastgele yeni popülasyon
end (while)

```

Denklem 2.1’de r_k [-0.5, 0.5] aralığında rastgele sayıyı ve d_{dal} yavru bitkinin ana bitkiden uzaklığını ifade eden katsayıyı göstermektedir. d_{dal} parametresinin lokal minimumlardan kaçmayı sağlaması için yeterince büyük bir değer seçilmelidir. Bu nedenle

d_{dal} önemli bir başlangıç değeridir. Denklem 2.1 ile yeni bireyler oluşturulduğunda amaç fonksiyonu hesaplanarak Denklem 2.2’deki eşitsizlik kontrol edilir [29]. Eğer eşitsizlik sağlanırsa algoritma global aramaya devam eder aksi takdirde lokal aramaya başlanır.

Eşitsizlikte kullanılan tol parametresi algoritmanın başlangıç parametrelerindendir ve 10^{-3} olarak belirlenmiştir.

$$\left| \frac{\frac{\min_{k=1,\dots,N_{pop}} f(x_{yavru}^k(i)) - \frac{\min_{k=1,\dots,N_{pop}} f(x_{yavru}^k(i-1))}{\frac{\min_{k=1,\dots,N_{pop}} f(x_{yavru}^k(i-1))}} \right| \geq tol \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’deki eşitsizliğin sağlanmadığı durumlarda Denklem 2.3 kullanılarak lokal arama yapılır. Lokal arama sadece en iyi birey etrafında gerçekleştirilir [29].

$$x_{gecici,l} = diag\{1, 1, \dots, d_{dal}n_k, 1, \dots, 1\} * x_{yavru,eniye}(i) \quad (2.3)$$

Denklemde n_k ($k=1,\dots,m$) normal dağılımlı rastgele sayıyı ifade etmektedir. Denklem 2.3 en iyi bireyin bütün değişkenleri için tekrarlanır. Eğer $x_{gecici,i}$ amaç fonksiyonunda en iyi bireyden daha optimum bir değer verirse en iyi birey değiştirilir. Bu işlem ile bitkilerin kökleri ile yaptıkları arama modellenmiş olur ve algoritma geniş adımlar ile lokal arama yapmış olur. Daha sonra bitkilerin kök tüyleri ile yaptığı aramayı modellemek için algoritma küçük adımlar ile lokal arama yapar. Bu işlem Denklem 2.4’te gösterilmiş olup Denklem 2.3’ten farkı d_{dal} yerine daha küçük bir değer olan $d_{kök}$ ve n_k yerine $[-0.5, 0.5]$ aralığında rastgele sayı olan r_k sabitinin kullanılmış olmasıdır [29].

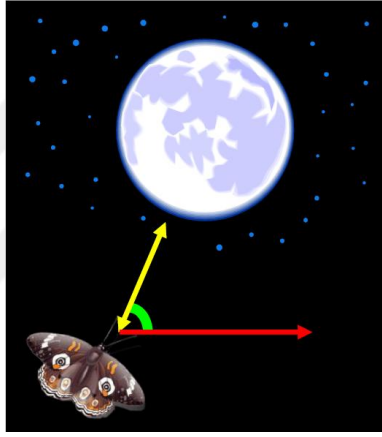
$$x_{gecici,l} = diag\{1, 1, \dots, d_{kök}r_k, 1, \dots, 1\} * x_{yavru,eniye}(i) \quad (2.4)$$

DKA’da lokal optimumlara takılmayı önlemek için “tekrar başlatma stratejisi” olarak isimlendirilen bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, her iterasyonda global ve lokal aramaların ardından son iki iterasyonda elde edilen sonuçlar arasındaki farkın tol değerinden küçük olup olmadığı kontrol edilir. Eğer fark tol değerinden küçükse kontrol sayacına bir eklenir değilse kontrol sayacı sıfırlanır. Eğer kontrol sayacı başlangıç parametresi olarak belirlenen maksimum sayıya ulaşırsa algoritma rastgele oluşturulan yeni popülasyon ile sonraki iterasyona devam eder ve bu durumda elde edilen en iyi sonuç hariç olmak üzere geçmiş sonuçlar hafızadan silinir.

2.2. Güve Işık Algoritması

2015 yılında Seyedali Mirjalili tarafından geliştirilen güvelerin ışık etrafındaki hareketlerinden esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır.

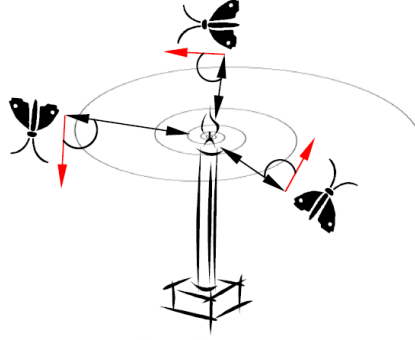
Bu algoritmaya ilham olan davranış güvelerin geceleri yaptıkları özel gezinti yöntemleridir. Güveler geceleri ay ışığını da kullanarak gezinti için enine yön belirleme isimli bir yöntem ile uçabilecek şekilde evrimleşmişlerdir. Bu yöntemde güveler aya göre sabit bir açıyı koruyarak uçarlar ve uzun mesafelerde doğrusal yer değiştirme için en etkili yöntemdir [31]. Şekil 2.2 güvelerin doğrusal hareketini göstermektedir.



Şekil 2.2. Güvelerin doğrusal hareketi [32]

Ay güveden uzak olduğunda bu gezinti yöntemi düz bir doğrultuda uçmayı garanti eder. Aynı gezinti yöntemi insanlar tarafından da kullanılabilir. Ayın gökyüzünün güneyinde olduğunu ve bir kişinin de doğuya gitmek istediğini düşünelim. Eğer kişi ayı sol tarafına alarak yürürse doğuya doğru düz bir çizgide ilerler. Enine yön bulmanın verimliliğine rağmen güvelerin ışık etrafında spiral şeklinde uçtuklarını görürüz. Gerçekte güveler yapay ışıktan dolayı yanılgıya düşerler ve böyle davranışlar sergilerler. Bu enine yön bulmanın dezavantajını gösterir. Yani doğrusal çizgide hareket ışık kaynağı çok uzakta olduğunda işe yarayabilir. Bu şekilde aya oranla çok yakın bir ışık kaynağını izleyen güveler Şekil 2.3'te gösterildiği gibi işe yaramayan ve giderek ışık kaynağına yaklaşan bir yol izlerler. Çalışmada bu davranıştan matematiksel olarak Güve-Işık Algoritması (GIA) ismiyle bahsedilmiş ve optimizasyon yöntemi olarak modellenmiştir [32]. Bu algoritmada, aday çözümlerimiz güveler, problem değişkenleri ise güvelerin arama uzayındaki

pozisyonlarıdır. Bu nedenle, güveler yön vektörlerini değiştirerek 1-D, 2-D, 3-D veya daha yüksek boyutlu uzayda uçabilirler.



Şekil 2.3. Işık kaynağına yakın alanda spiral yol çizgisi [32]

Algoritma güve ve ışık popülasyonu olmak üzere iki popülasyon ile başlatılır ve her iki popülasyon da problem için çözüm kümesidir. Farkları iterasyonlardaki işlem ve güncelleme yöntemleridir. Güveler arama uzayında yer değiştiren gerçek arama ajanları, ışıklar ise güvelerin elde ettiği en iyi pozisyonlarıdır. Her bir güve bu noktalar etrafında arar ve daha iyi bir çözüm bulunca onu günceller. Algoritmanın sözde kodu Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. GIA sözde kodu [32]

```
Girdileri belirle:
  N: Popülasyon sayısı, T: İterasyon sayısı, m:Popülasyon sayısı, d: Boyut sayısı
  M: Rastgele popülasyon oluştur
  iterasyon=0;
while iterasyon<T
  Denklem 2.6 ile ışık popülasyonunu güncelle
  UM = amaçFonksiyonu(M);
  if iterasyon == 1
    F = sırala(M); // Işık popülasyonu oluştur
    UF = sırala(UM);
  else
    F = sırala (Mt-1); // önceki iterasyondaki popülasyonu sırala
    UF = sırala (Mt-1);
  end
  for i = 1: m
    for j = 1: d
      Denklem 2.5 ile yeni konumu hesapla
    end (for)
  end (for)
end (while)
```

Algoritmanın matematiksel modelinde güve ve ışık popülasyonları matrisler ile ifade edilmiştir. Matris 2.1'deki M matrisi güveleri, Matris 2.2'deki UM matrisi ise her güvenin amaç fonksiyon değerini (uygunluk değeri) simgeler.

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,d} \\ m_{2,1} & m_{2,1} & m_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,1} & m_{n,d} \end{bmatrix} \quad (\text{Matris 2.1})$$

$$UM = \begin{bmatrix} OM_1 \\ OM_2 \\ \vdots \\ OM_n \end{bmatrix} \quad (\text{Matris 2.2})$$

Matris 2.1 ve Matris 2.2'de n güve sayısını d ise değişken sayısını (boyut) gösterir. Her güvenin pozisyon vektörü (M matrisindeki her bir satır) amaç fonksiyonu ile değerlendirilir ve çıktı ise UM matrisinde uygun alana (ilk satır için UM_1) alanına yazılır.

Matris 2.3'te ışık kaynakları değerlerini saklayan F matrisi gösterilmiştir. Her ışık kaynağı için uygunluk değerini saklayan UF matrisi ise Matris 2.4'te gösterilmiştir.

$$F = \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & F_{1,d} \\ F_{2,1} & F_{2,1} & F_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{n,1} & F_{n,1} & F_{n,d} \end{bmatrix} \quad (\text{Matris 2.3})$$

$$UF = \begin{bmatrix} OF_1 \\ OF_2 \\ \vdots \\ OF_n \end{bmatrix} \quad (\text{Matris 2.4})$$

Algoritma ilk iterasyonda güve popülasyonunun amaç fonksiyon değerlerini sıralayarak F matrisine saklar. Sonraki iterasyonlarda F matrisi yeni güve konumları ile güncellenir. Güveler yer değişikliğini Denklem 2.5'teki spiral denklem ile kendisine denk gelen F matrisindeki ışık kaynağı etrafında yapar [32].

$$S(M_i, F_j) = D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j \quad (2.5)$$

D_i j . ışık kaynağı için i .güvenin uzaklığı, b logaritmik spiral şeklini belirtmek için sabit ve t $[-1,1]$ aralığında rastgele sayıyı temsil eder. t Parametresi güvenin sonraki

konumunun ışık kaynağına ne kadar yakın olacağını gösterir. ($t = -1$ ışığa en yakın nokta, $t = 1$ ise en uzak nokta) Bu nedenle, ışığın etrafında bütün yönlerde çoklu elips olduğu varsayılır ve güvenin sonraki konumu bu elips içerisinde olur.

İlerleyen iterasyonlar boyunca lokal optimuma yakınsamayı güçlendirmek için ışık kaynağı sayısı iterasyonlar boyunca azaltılmıştır. Bunu sağlayabilmek için Denklem 2.6 kullanılmıştır [32]. Algoritma çalışma esnasında ışık kaynağı sayısı lineer olarak azaldığından dolayı son n tane güve konumunu sonuncu ışık kaynağına göre günceller. Denklemde t iterasyon sayısını ifade etmektedir.

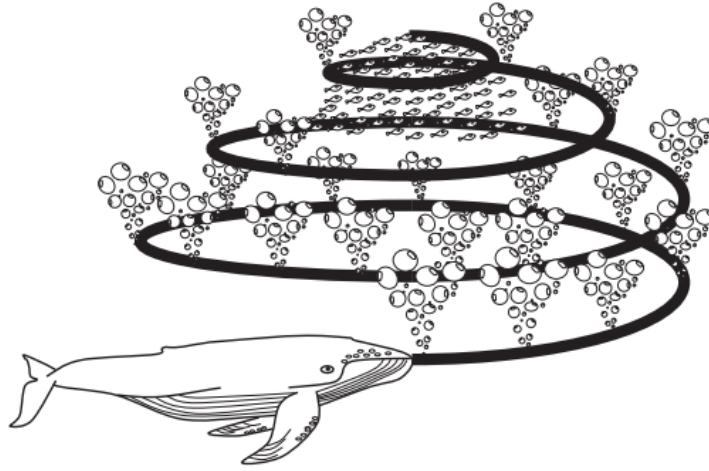
$$\text{ışık kaynağı sayısı} = \text{round}(N - t * \frac{N-1}{T}) \quad (2.6)$$

2.3. Balina Optimizasyon Algoritması

Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) 2016 yılında Seyedali Mirjalili tarafından tek ve çok modlu optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen meta sezgisel algoritmadır [33]. Mirjalili bu algoritmada balinaların avlanma davranışlarını modellemiştir.

Balinalar dünyanın en büyük memelileri olarak bilinirler. Yetişkin bir balina 30 metre uzunluğuna ve 180 ton ağırlığına erişebilir. Katil, Minke, Kuzey, Kambur, Buzul, Oluklu ve mavi balina olmak üzere 7 türü vardır. Balinalar okyanus yüzeylerinden nefes almak zorunda oldukları için hiçbir zaman uyumazlar. Sadece beyinlerinin yarısı uyur. Balinalar ile ilgili diğer bir gerçek ise duygularının olduğudur. Hof ve Van Der Gucht 'a göre balinalar ve insanların beyinlerinin belli bölgelerinde benzer hücreler bulunmaktadır [34]. Bu hücreler insanların sosyal davranışlarındaki yargılama ve duyguları ile ilgilidir ve insanları diğer canlılardan ayırırlar. Balinalarda ki bu hücreler insanlara oranla iki kat daha fazladır. Balinaların düşünebildiği, öğrenebildiği, iletişim kurabildiği ve hatta duygularının olduğu kanıtlanmıştır. Ama insanlara göre çok daha az zekidirler. Sosyal olarak ise genellikle grup olarak bazen de yalnız hareket ederler. Bütün hayatları boyunca aileleri ile yaşayan balinalar da bulunmaktadır.

Bu çalışmada esas alınan tür kambur balinadır ve algoritmada bu balinaların avlanmaları modellenmiştir. Şekil 2.4'te kambur balinaların avlanma stratejisi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Kambur balinaların hava kabarcığı yöntemi ile avlanması [33]

Kambur balinaların hava kabarcığı davranışı denilen kendilerine özgü bir avlanma davranışı vardır. Suyun altında soluk vererek hava kabarcığı bulutları ve sütunları meydana getirirler. Bu geniş, birbirleri ile bağlantılı hava kabarcıkları kümesi, suyun altında soluk verilmesi ile oluşarak avları bir araya toplar. Daha sonra, kambur balina su kabarcıklarının içerisinde yüzeye doğru yükselir. Yükselmeye devam ederken soluk alıp vererek kabarcık oluşturmaya devam eder ve avına yaklaştıkça kabarcık çemberini daraltarak hedef küçültür. Bu davranışın, avın bulunmasında veya avın hareketsiz hale getirilmesi ve şaşırtılması yoluyla ele geçirilmesinde yardımcı olduğu bilinmektedir. Ayrıca bu davranış avcıyı avdan gizleyebilir [35]. BOA’da kambur balinaların avlanma stratejisi avın etrafını hava kabarcığı ile sarma, halkayı daraltarak ava doğru spiral şekilde hareket ederek yaklaşma ve av arama olarak 3 ayrı kısımda modellenmiştir.

2.3.1. Avın Etrafını Sarma

Kambur balinalar avlarının konumunu tahmin edebilirler ve bu nedenle avlarının etrafını hava kabarcıkları ile sarmalayabilirler. BOA’da ise avın konumu ulaşılabilecek olan optimum nokta olarak kabul edilir. Optimizasyon problemlerinde optimum çözüm bilinmediğinden dolayı optimum nokta ulaşılan en iyi çözüm ya da onun etrafında bir nokta olarak kabul edilir. En iyi arama ajanı belirlendikten sonra diğer arama ajanlarının konumlarını en iyi ajanı kullanarak güncellenir. Avın etrafını sarma davranışının matematiksel modeli Denklem 2.7 ve Denklem 2.8’de gösterilmiştir [33].

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (2.7)$$

$$\vec{X}(t+1) = |\vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}| \quad (2.8)$$

t : Bulunulan iterasyon

$\vec{A}$ ve $\vec{C}$: Yakınsama vektörleri

$\vec{X}^*$: t . İterasyon sonunda elde edilmiş en iyi çözüm vektörü

$\cdot$: Matris çarpımı

$\vec{A}$ ve $\vec{C}$ yakınsama vektörlerinin değerleri Denklem 2.9 ve 2.10'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (2.9)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (2.10)$$

r : [0,1] aralığında rastgele sayı

$\vec{a}$: İterasyonlar boyunca 2'den 0'a doğru lineer olarak azalan vektör

2.3.2. Hava Kabarcığı Yöntemi İle Ava Yaklaşma

Bu davranış avın etrafındaki çemberi daraltma ve spiral hareket olmak üzere iki kısımda modellenmiştir. Avın etrafındaki çemberi daraltma Denklem 2.9'daki $\vec{a}$ değişkeninin değerini azaltmakla mümkün olabilmektedir. Spiral hareket ise Denklem 2.11 ile modellenmiştir [33].

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (2.11)$$

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (2.12)$$

Denklem 2.12'de gösterilen $\vec{D}'$ arama ajanı ile en iyi nokta arasındaki mesafeyi simgelemektedir. b logaritmik spiral sabiti, l ise [-1,1] aralığında rastgele sayıdır. Kambur balinalar ava doğru yükselirken aynı zamanda spiral harekete devam ederler. Algoritmada spiral hareket veya ava doğru hareketten hangisinin yapılacağı Denklem 2.13'te gösterildiği gibi ½ olasılıkla belirlenir. p değişkeni rastgele sayıyı ifade etmektedir [33].

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, & p < 0.5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.13)$$

2.3.3. Av Arama (Global Arama)

Global arama için arama ajanlarının yeni konumları, bilinen en iyi nokta yerine rastgele seçilen bir arama ajanı etrafında belirlenir. Matematiksel modeli Denklem 2.14 ve Denklem 2.15'te gösterilmiştir. Denklemlerde $\overrightarrow{X_{rand}}$ rastgele seçilen bir arama ajanını göstermektedir [33].

$$\overrightarrow{D'} = \vec{C} \cdot \overrightarrow{X_{rand}} - \vec{X} \quad (2.14)$$

$$\vec{X}(t+1) = |\overrightarrow{X_{rand}} - \vec{A} \cdot \overrightarrow{D'}| \quad (2.15)$$

Global arama ve lokal aramanın hangisinin yapılacağına ise $\vec{A}$ 'nın değerine göre karar verilir. $\vec{A} > 1$ veya $\vec{A} < -1$ olduğunda en iyi noktadan daha uzak bir nokta seçilebileceğinden dolayı bu durumlar global arama olarak kabul edilerek bireyin yeni konumu Denklem 2.8 yerine Denklem 2.15 kullanılarak belirlenir. Tablo 2.3'te BOA'nın sözde kodu gösterilmiştir.

Tablo 2.3. BOA'nın sözde kodu [33]

```
Girdileri belirle: N: Popülasyon sayısı, T: İterasyon sayısı, m:Popülasyon sayısı, d:  
Boyut sayısı  
X: Rastgele popülasyon oluştur  
iterasyon=0;  
while iterasyon<T  
Her birey için amaç fonk. maliyeti hesapla ve en iyi bireyi belirle  
Denklem 2.9 ve Denklem 2.10 ile A ve C'yi güncelle  
for i = 1: m  
for j = 1: d  
if p<0.5  
if |A|<1  
Denklem 2.8 ile birey konumu güncelle  
else  
Denklem 2.15 ile birey konumu güncelle  
end (if)  
else if p>=0.5  
Denklem 2.11 ile birey konumu güncelle  
end (if)  
end (for)  
end (for)  
end (while)
```

3. DKA, GIA ve BOA’NIN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Tezin bu bölümünde DKA, GIA ve BOA yöntemleri, kalite test fonksiyonları ve mühendislik tasarım problemleri kullanılarak karşılaştırılmış ve istatistiki test yardımı ile yorumlanmıştır. Kullanılan kalite test fonksiyonları, mühendislik problemleri ve istatistiki test yöntemi aşağıda açıklanmıştır.

3.1. Kalite Testi Fonksiyonları

Kalite test fonksiyonları optimizasyon algoritmalarının performansını ölçmek ve test etmek için kullanılabilmektedir ve literatürde birçok test fonksiyonu tanımlanmıştır [37]. Bu fonksiyonlar yerel optimum sayılarına ve sıklıklarına göre tek modlu, çok modlu, sabit boyutlu çok modlu ve karma olmak üzere 4 sınıfa ayrılırlar [38]. Tek modlu fonksiyonlarda sadece bir adet optimum nokta bulunurken çok modlu fonksiyonlarda birden fazla lokal optimum nokta ve bir tek global optimum nokta bulunmaktadır. Sabit boyutlu çok modlu fonksiyonlar ise birden çok lokal optimum noktaya sahip olan ve boyutu değiştirilemeyen fonksiyonlardır. Karma test fonksiyonları global optimumu rastgele pozisyonlara kaydırılabilen daha zorlu fonksiyonlardır. Bu çalışmada kullanılan kalite test fonksiyonlarından tek modlu fonksiyonlar Tablo 3.1’de, çok modlu fonksiyonlar Tablo 3.2’de ve sabit boyutlu çok modlu fonksiyonlar Tablo 3.3’te gösterilmiştir. Tablolarda fonksiyonların literatürde kullanılan isimleri, denklemleri, boyutları, aralıkları ve optimum değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Tek modlu kalite test fonksiyonları

Fonksiyon Adı	Fonksiyon	Değişken Sayısı (Boyut)	Aralık	Optimum Değer
Sphere	$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	[-100,100]	0
Schwefel 2.22	$F_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	30	[-10,10]	0
Schwefel 1.2	$F_3(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	30	[-100,100]	0
Schwefel 2.21	$F_4(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$	30	[-100,100]	0
Generalized Rosenbrock	$F_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	[-30,30]	0
Step	$F_6(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$	30	[-100,100]	0
Quartic	$F_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1]$	30	[-1.28,1.28]	0

Tablo 3.2. Çok modlu kalite test fonksiyonları

Fonksiyon Adı	Fonksiyon	Değişken Sayısı (Boyut)	Aralık	Optimum Değer
Generalized Schwefel	$F_8(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	30	[-500,500]	-418.98xn
Generalized Rastrigin	$F_9(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	[-5,12,5,12]	0
Ackley	$F_{10}(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	[-32,32]	0
Griewank	$F_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	[-600,600]	0
Penalized Functions 1	$F_{12}(x) = \frac{\pi}{n} \left\{ \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 \right\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)$ $y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4} u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m x_i > a \\ 0 & -a < x_i < a \\ k(-x_i - a)^m x_i < -a \end{cases}$	30	[-50,50]	0
Penalized Functions 2	$F_{13}(x) = 0.1 \{ \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)] + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_n)] \} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$	30	[-50,50]	0

Tablo 3.3. Sabit boyutlu çok modlu fonksiyonlar

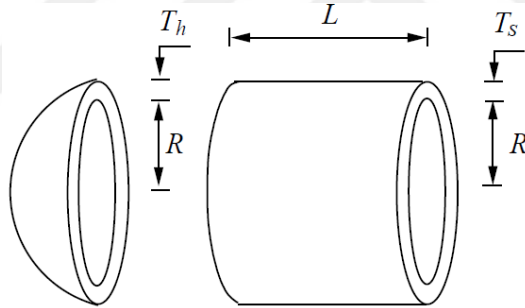
Fonksiyon Adı	Fonksiyon	Değişken Sayısı (Boyut)	Aralık	Optimum Değer
De Jong	$F_{14}(x) = \left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{\sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6} \right)^{-1}$	2	[-65.536, 65.536]	1
Kowalik	$F_{15}(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 b_i x_3 + x_4} \right]^2$	4	[-5,5]	0.00030
Six-Hump Camel-Back	$F_{16}(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$	2	[-5,5]	-1.0316
Branin	$F_{17}(x) = (x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6)^2 + 10(1 - \frac{1}{8\pi}) \cos(x_1) + 10$	2	Alt: [-5,0] Üst: [10,15]	0.398
Goldstein-Price	$F_{18}(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)]x[30 + (2x_1 - 3x_2)^2x(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 - 27x_1^2)]$	2	[-2,2]	3
Hartman (H3,4)	$F_{19}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^3 a_{ij}(x_j - p_{ij})^2)$	3	[0,1]	-3.86
Hartman (H6,4)	$F_{20}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^6 a_{ij}(x_j - p_{ij})^2)$	6	[0,1]	-3.32
Shekel (beş lokal minimum)	$F_{21}(x) = -\sum_{i=1}^5 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0,10]	-10.1532
Shekel (yedi lokal minimum)	$F_{22}(x) = -\sum_{i=1}^7 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0,10]	-10.4028
Shekel (10 lokal minimum)	$F_{23}(x) = -\sum_{i=1}^{10} [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0,10]	-10.5363

3.2. Mühendislik Tasarım Problemleri

Mühendislik tasarım problemlerinin birçoğu lineer olmayan yapıları ve karmaşık kısıtlayıcılara sahip olmaları nedeni ile optimizasyon algoritmalarını test etmek için literatürde sıkça kullanılmaktadır [39]. Bu çalışmada mühendislik tasarım problemlerinden “basınçlı kap problemi” ve “yay germe / sıkıştırma problemi” kullanılmıştır.

3.2.1. Basınçlı Kap Problemi

Basınçlı kap Şekil 3.1’de gösterilen iki ucu yarı küresel olan başlıklar ile kapalı silindirdir [40]. Basınçlı kap problemin amacı ise malzeme, şekillendirme ve kaynak maliyetini minimize etmektir. Problemde kabuk kalınlığı T_s (x_1), başlık kalınlığı T_h (x_2), iç yarıçap R (x_3) ve L (x_4) başlık haricindeki uzunluk olmak üzere dört adet tasarım değişkeni bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Basınçlı kap tasarım problemi [43]

Problemin matematiksel ifadesi Denklem 3.1’de gösterilmiştir. Değişkenlerin değer aralıkları $0.0625 \leq x_1, x_2 \leq 99 \times 0.0625$ ve $10 \leq x_3, x_4 \leq 200$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca problemin g_1, g_2, g_3, g_4 ile gösterilen dört adet kısıtlayıcısı bulunmaktadır. Bu kısıtlar da Denklem 3.2’de gösterilmiştir.

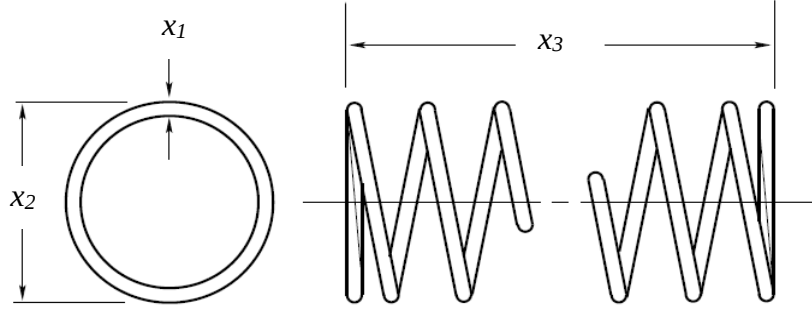
$$\min f(x) = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \quad (3.1)$$

Kısıtlar,

$$\begin{aligned} g_1(x) &= -x_1 + 0.0193x_3 \leq 0, \\ g_2(x) &= -x_2 + 0.00954x_3 \leq 0, \\ g_3(x) &= -\pi x_3^2x_4 - 43\pi x_3^3 + 1296000 \leq 0, \\ g_4(x) &= -x_4 - 240 \leq 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2.2. Yay Germe/Sıkıştırma Problemi

Yay germe / sıkıştırma probleminin amacı sabit bir gerilme ya da sıkıştırma yükü altındaki yayın ağırlığını en aza indirmektir [43]. Şekil 3.2’de tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Yay germe / sıkıştırma tasarım problemi [43]

Problemin tasarım değişkenleri tel çapı (x_1), bobin çapı (x_2) ve yayı oluşturan halka (bobin) sayısı (x_3) olmak üzere üç adettir. Matematiksel ifadesi Denklem 3.3’te gösterilmiştir. Problemin Denklem 3.4’te g_1, g_2, g_3, g_4 ile gösterilen dört adet kısıtlayıcısı bulunmaktadır.

$$\min f(x) = (x_3 + 2)x_1^2 x_2 \quad (3.3)$$

Kısıtlar,

$$\begin{aligned} g_1(\vec{x}) &= 1 - \frac{x_2^3 x_3}{71785 x_1^4} \leq 0, \\ g_2(\vec{x}) &= \frac{4x_2^2 - x_1 x_2}{12566(x_2 x_1^3 - x_1^4)} + \frac{1}{5108 x_1^2} - 1 \leq 0, \\ g_3(\vec{x}) &= 1 - \frac{140.45 x_1}{x_2^2 x_3} \leq 0, \\ g_4(\vec{x}) &= \frac{x_1 + x_2}{1.5} - 1 \leq 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.3. Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi

Meta sezgisel algoritmaların deterministik olmayan yapılarından dolayı birbiri ile karşılaştırılmalarında sonuçların güvenilirliği için istatistiksel testlerden sıkça faydalanılmaktadır [36]. Bu çalışmada istatistiksel testlerden biri olan Wilcoxon işaretli sıralar testi kullanılmıştır. Bu test eşleştirilmiş gruplara ilişkin farklılıkların boyutlarını da

dikkate alarak iki değişkene ait dağılımın benzer olup olmadığını test etmek amacıyla geliştirilmiş parametrik olmayan istatistiksel hipotez testidir. Bu çalışmada Wilcoxon işaretli sıralar testi 0,05 istatistiksel anlamlılık değeri ile uygulanmıştır. Ayrıca Wilcoxon işaretli sıralar testi çift kuyruklu olarak uygulanmıştır; çünkü amaç sonuçların birbirlerine göre büyüklüklerinin değil aralarındaki farkın anlamlılık düzeyinin ölçülmesidir.

3.4. Kalite Test Fonksiyonları ile Yapılan Deneyler

Algoritmaları karşılaştırmak için Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te gösterilen 23 adet kalite test fonksiyonu kullanılmıştır. Testlerde performans ölçütümüz elde edilen sonuç değerleridir. Bulunan sonuçların verimliliğinde algoritmaların popölasyon sayısı, değişken boyutu, algoritmaya özğü giriş parametreleri, iterasyon sayısı ve uygulanan fonksiyonun türü önemli parametrelerdendir. Bu nedenle, eşit şartlarda test olabilmesi için algoritmaların giriş parametreleri için literatürdeki en uygun parametreler alınmıştır [29, 32, 33]. Popölasyon sayısı, iterasyon sayısı ve değişken boyutu her üç algoritma için de eşit sayıda belirlenmiştir. Algoritmaların stokastik yapılarından dolayı, adil bir test olabilmesi için algoritmaların 30'ar kez bağımsız çalıştırılmasının ardından amaç fonksiyon değerlerinin istatistiksel sonuçları değerlendirme için kullanılmıştır. Ayrıca algoritmaların her iterasyondaki fonksiyon değerlendirme sayıları birbirinden farklı olduğu için algoritma sonlandırma kriteri olarak maksimum fonksiyon değerlendirme sayısı baz alınmıştır.

Algoritmalar kalite test fonksiyonları üzerinde çalıştırılarak tek modlu fonksiyonların sonuçları Tablo 3.4'te, çok modlu fonksiyonların sonuçları Tablo 3.5'te ve sabit boyutlu çok modlu fonksiyonların sonuçları da Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Bu değerler her bir algoritmanın 30 popölasyon sayısı ve maksimum 1000 fonksiyon değerlendirmesi ile çalıştırılarak elde edilmiştir.

Tablo 3.4'te verilen tek modlu kalite test fonksiyonları sonuçlarına göre, ortalama değerlerde F1, F2, F5 ve F7 fonksiyonlarında BOA, F4 ve F6 fonksiyonlarında GIA, F3 fonksiyonunda DKA optimum sonuca daha çok yaklaşmışlardır. En iyi değerlerde ise F1, F2 ve F7 fonksiyonlarında BOA, F3-F5 fonksiyonlarında GIA, F6 fonksiyonunda DKA optimum sonuca daha çok yaklaşmışlardır.

Bu sonuçlara göre, seçilen problemler ve belirlenen algoritma parametreleri ile tek modlu fonksiyonlar için en iyi algoritmanın BOA, en kötü algoritmanın DKA olduğu

gözlenmiştir. Ayrıca GIA'nın standart sapmasının yüksek olduğu, bağımsız çalıştırmalarda daha uzak sonuçlara gidebildiği gözlenmiştir.

Tablo 3.4. Tek modlu kalite testi fonksiyonları ile yapılan deney sonuçları (Std. sapma: Standart sapma, Opt. değer: Optimum değer, F: Fonksiyon)

<i>F</i>	<i>İstatistik</i>	<i>BOA</i>	<i>GIA</i>	<i>DKA</i>	<i>Opt. Değer</i>
F1	<i>Ortalama</i>	7.679E-146	1.13181E-29	1.86225E-08	0
	<i>En iyi</i>	1.6199E-170	9.116E-33	7.0688E-09	
	<i>En kötü</i>	2.3037E-144	1.76809E-28	3.5209E-08	
	<i>Std. sapma</i>	4.2059E-145	3.32473E-29	7.03483E-09	
F2	<i>Ortalama</i>	2.02E-103	0.666666667	0.000526425	0
	<i>En iyi</i>	1.655E-115	2.08922E-20	3.621E-04	
	<i>En kötü</i>	5.6692E-102	10	7.463E-04	
	<i>Std. sapma</i>	1.0336E-102	2.537081317	9.244E-05	
F3	<i>Ortalama</i>	22461.19145	333.3333365	87.0939	0
	<i>En iyi</i>	3063.136111	1.08156E-10	32.4645	
	<i>En kötü</i>	52422.5572	5000	208.9766	
	<i>Std. sapma</i>	12571.37505	1268.540658	34.65899458	
F4	<i>Ortalama</i>	33.7746737	0.679977242	31.36268333	0
	<i>En iyi</i>	0.077299134	3.13152E-06	10.2668	
	<i>En kötü</i>	85.57041911	9.095059044	42.0181	
	<i>Std. sapma</i>	27.98455795	1.800905734	7.133159436	
F5	<i>Ortalama</i>	27.22285249	183.2122402	192.9885427	0
	<i>En iyi</i>	26.49697506	0.003722465	0.51041	
	<i>En kötü</i>	27.88849989	3019.843304	2117.2068	
	<i>Std. sapma</i>	0.410460626	553.2431075	429.5921298	
F6	<i>Ortalama</i>	0.107772543	3.06279E-30	3.9689E-08	0
	<i>En iyi</i>	0.010877405	0	1.1512E-08	
	<i>En kötü</i>	0.423599625	6.00243E-29	7.6685E-08	
	<i>Std. sapma</i>	0.111154773	1.0928E-29	1.46458E-08	
F7	<i>Ortalama</i>	0.00226168	0.004928043	0.234536967	0
	<i>En iyi</i>	8.20797E-05	0.001447778	0.073349	
	<i>En kötü</i>	0.015927253	0.01727284	0.47616	
	<i>Std. sapma</i>	0.00338185	0.003616857	0.092790129	

Tablo 3.5'te verilen çok modlu kalite test fonksiyonları sonuçlarına göre, ortalama değerlerde F8-F11 fonksiyonlarında BOA, F12 ile F13 fonksiyonlarında DKA optimum sonuca daha çok yaklaşmışlardır. GIA ise çok modlu fonksiyonlarda diğer algoritmalarla göre başarısız olmuştur. En iyi sonuçlara göre BOA F8-F11 fonksiyonlarında, DKA F12 fonksiyonunda ve GIA F13 fonksiyonunda diğer algoritmalarla daha optimum sonuç vermişlerdir.

Sonuç olarak altı adet çok modlu fonksiyonun dört tanesinde BOA iki tanesinde DKA optimum sonuca daha iyi yakınsamıştır. En iyi sonuçlarda da BOA altı fonksiyonun dört tanesinde optimuma en iyi yakınsayan algoritma olmuştur. Bu nedenle çok modlu kalite test fonksiyonları için en iyi algoritmanın BOA olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 3.5. Çok modlu kalite testi fonksiyonları ile yapılan deney sonuçları

<i>F</i>	<i>İstatistik</i>	<i>BOA</i>	<i>GIA</i>	<i>DKA</i>	<i>Opt. Değer</i>
F8	<i>Ortalama</i>	-10684.67986	-3271.789677	-7262.851523	-418.98x30 =12569.4
	<i>En iyi</i>	-12569.45903	-3952.952203	-8837.0334	
	<i>En kötü</i>	-6904.820486	-2685.053344	-5968.8802	
	<i>Std. sapma</i>	1885.198933	319.0147274	713.3132448	
F9	<i>Ortalama</i>	1.89478E-15	22.86029391	0.033170882	0
	<i>En iyi</i>	0	5.969754343	1.2417E-06	
	<i>En kötü</i>	5.68434E-14	55.71731727	0.99496	
	<i>Std. sapma</i>	1.03781E-14	13.55748014	0.181652964	
F10	<i>Ortalama</i>	4.44089E-15	0.764924438	15.39280737	0
	<i>En iyi</i>	8.88178E-16	4.44089E-15	0.000093435	
	<i>En kötü</i>	7.99361E-15	19.92110266	19.759	
	<i>Std. sapma</i>	2.63889E-15	3.640657838	7.176367117	
F11	<i>Ortalama</i>	0.002577684	0.156421493	81.27423333	0
	<i>En iyi</i>	0	0.02461003	36.5701	
	<i>En kötü</i>	0.077330532	0.54139889	125.7612	
	<i>Std. sapma</i>	0.014118559	0.108627551	19.14708211	
F12	<i>Ortalama</i>	0.00681972	0.165943286	1.02046E-09	0
	<i>En iyi</i>	0.000308283	4.80844E-32	1.2033E-10	
	<i>En kötü</i>	0.023166251	1.868355905	1.1192E-08	
	<i>Std. sapma</i>	0.005247979	0.372254775	2.13787E-09	
F13	<i>Ortalama</i>	0.247523672	0.004761192	4.29E-08	0
	<i>En iyi</i>	0.04034473	1.34978E-32	1.6261E-09	
	<i>En kötü</i>	0.574731998	0.010987366	7.1659E-07	
	<i>Std. sapma</i>	0.146133791	0.005537709	1.31516E-07	

Tablo 3.6’da verilen sabit boyutlu çok modlu kalite test fonksiyonları sonuçlarına göre, F15, F19, F21-F23 fonksiyonlarında BOA, F14 ile F20 fonksiyonlarında GIA, F16 ile F17 fonksiyonlarında DKA optimuma daha iyi yakınsamışlardır. F18 fonksiyonda ise GIA ve DKA’nın her ikisi de optimum sonuca ulaşmışlardır. Sabit boyutlu çok modlu kalite test fonksiyonlarında en başarılı algoritma 10 fonksiyonun beş tanesinde daha iyi sonuca ulaşan olan BOA olmuştur.

Tablo 3.6. Sabit boyutlu çok modlu kalite testi fonksiyonları ile yapılan deney sonuçları

<i>F</i>	<i>İstatistik</i>	<i>BOA</i>	<i>GIA</i>	<i>DKA</i>	<i>Opt. Değer</i>
F14	<i>Ortalama</i>	1.786598478	1.724073895	14.7115	1
	<i>En iyi</i>	0.998003838	0.998003838	0.998	
	<i>En kötü</i>	10.76318067	5.928845125	23.8094	
	<i>Std. sapma</i>	1.878171903	1.294405659	7.206718795	
F15	<i>Ortalama</i>	0.000632566	0.001243774	0.004657718	0.00030
	<i>En iyi</i>	0.000307618	0.000506674	0.00040898	
	<i>En kötü</i>	0.001382903	0.008333703	0.056543	
	<i>Std. sapma</i>	0.000322647	0.001406452	0.011462557	
F16	<i>Ortalama</i>	-1.031628453	-1.031628453	-1.0316	-1.0316
	<i>En iyi</i>	-1.031628453	-1.031628453	-1.0316	
	<i>En kötü</i>	-1.031628453	-1.031628453	-1.0316	
	<i>Std. sapma</i>	3.27705E-11	6.77522E-16	6.77522E-16	
F17	<i>Ortalama</i>	0.397887718	0.397887358	0.39789	0.398
	<i>En iyi</i>	0.397887358	0.397887358	0.39789	
	<i>En kötü</i>	0.397890292	0.397887358	0.39789	
	<i>Std. sapma</i>	6.88006E-07	0	1.6938E-16	
F18	<i>Ortalama</i>	3.000003311	3	3	3
	<i>En iyi</i>	3.00000001	3	3	
	<i>En kötü</i>	3.000018694	3	3	
	<i>Std. sapma</i>	4.76415E-06	1.79918E-15	0	
F19	<i>Ortalama</i>	-3.860879679	-3.862782148	-3.86280000	-3.86
	<i>En iyi</i>	-3.862781154	-3.862782148	-3.8628	
	<i>En kötü</i>	-3.85084879	-3.862782148	-3.8628	
	<i>Std. sapma</i>	0.002672885	2.71009E-15	3.16177E-15	
F20	<i>Ortalama</i>	-3.187627982	-3.226063084	-3.21499	-3.32
	<i>En iyi</i>	-3.321923891	-3.862782148	-3.322	
	<i>En kötü</i>	-2.267107785	5.928845125	-3.2031	
	<i>Std. sapma</i>	0.207705464	2.016007978	0.036279788	
F21	<i>Ortalama</i>	-9.300140117	-6.986164141	-5.476393333	-10.1532
	<i>En iyi</i>	-10.15303917	-3.862782148	-10.1532	
	<i>En kötü</i>	-5.054378231	5.928845125	-2.6305	
	<i>Std. sapma</i>	1.930956223	2.487420978	3.262328522	
F22	<i>Ortalama</i>	-8.194344858	-8.139831523	-7.54189	-10.4028
	<i>En iyi</i>	-10.40280926	-6.986164141	-10.4029	
	<i>En kötü</i>	-2.765752651	5.928845125	-2.7519	
	<i>Std. sapma</i>	2.84061633	3.117372501	3.207521272	
F23	<i>Ortalama</i>	-8.813212208	-8.065136608	-6.27303	-10.5363
	<i>En iyi</i>	-10.53633747	-8.139831523	-10.5364	
	<i>En kötü</i>	-1.676052456	5.928845125	-2.2847	
	<i>Std. sapma</i>	2.988965887	3.71420418	3.646664091	

Kalite test fonksiyonları için algoritma çiftlerine uygulanan Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları Tablo 3.7’de verilmiştir. Tabloda R^+ ve R^- algoritmaların rank toplamalarını göstermektedir. Algoritmanın rank toplamının yüksek olması optimuma daha iyi yakınsadığını göstermektedir.

Tablodaki *BOA / DKA* sütunu incelendiğinde; F4, F20 ve F22 fonksiyonlarında $p > 0,05$ olduğundan anlamlı fark yoktur. Anlamlı farklılık olan 20 fonksiyondan 14 tanesinde BOA'nın, altı tanesinde ise DKA'nın rankları daha yüksektir.

BOA / GIA sütunu incelendiğinde; F5, F10, F12, F14, F20-F23 fonksiyonlarında anlamlı fark yoktur. Diğer 15 fonksiyonun dokuz tanesinde BOA'nın altı tanesinde ise GIA'nın rankları daha yüksektir.

DKA / GIA sütunu incelendiğinde; F5, F12, F13, F15, F20 - F22 fonksiyonlarında anlamlı bir fark yoktur. Diğer 16 fonksiyonun 12 tanesinde GIA'nın dördünde ise DKA'nın rank değerleri daha yüksektir.

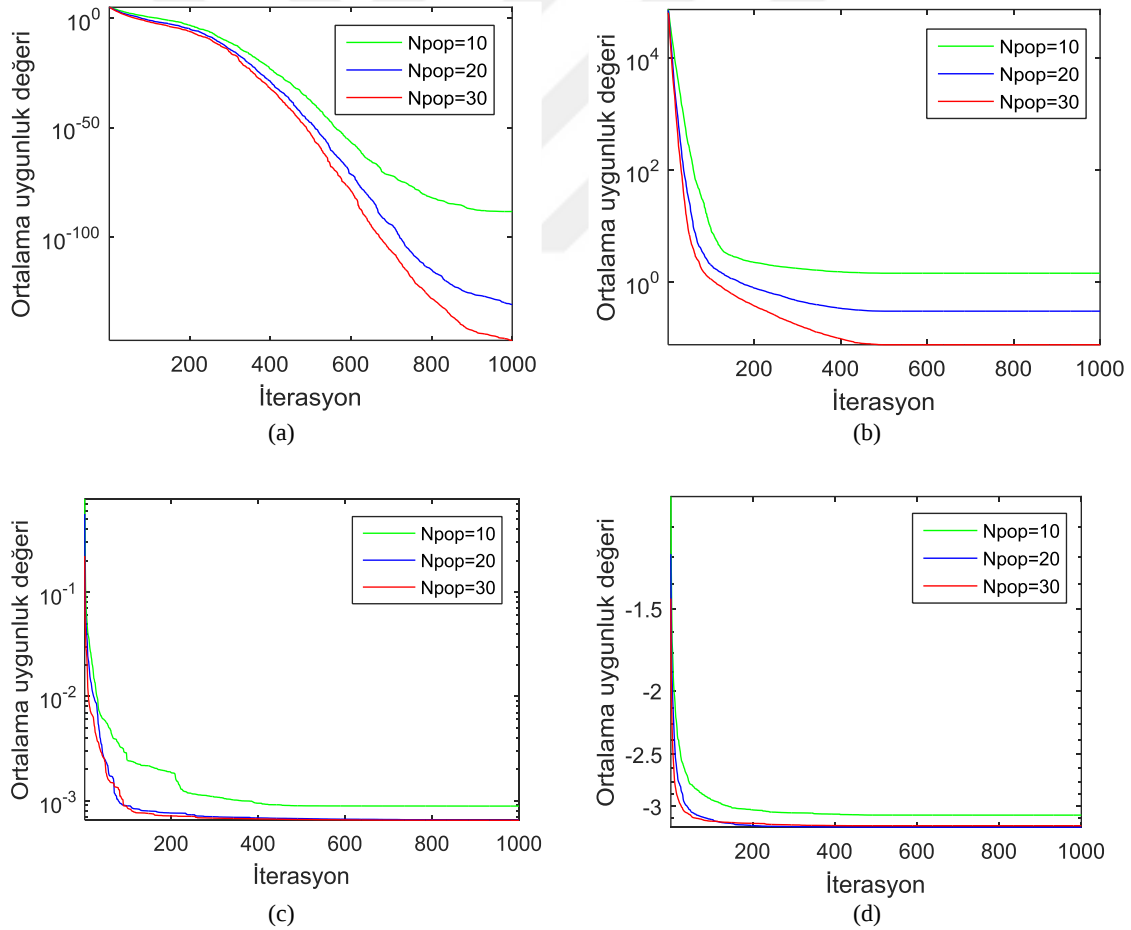
Tablo 3.7. Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları (p : istatistiksel anlamlılık değeri, R^+ pozitif rank toplamı, R^- negatif rank toplamı)

<i>F</i>	<i>BOA / DKA</i>			<i>BOA / GIA</i>			<i>DKA / GIA</i>		
	<i>p değeri</i>	R^+	R^-	<i>p değeri</i>	R^+	R^-	<i>p değeri</i>	R^+	R^-
<i>F1</i>	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0	1.73E-06	0	465
<i>F2</i>	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0	0.000359	406	59
<i>F3</i>	1.73E-06	0	465	1.73E-06	0	465	0.000359	406	59
<i>F4</i>	0.877403	225	240	2.88E-06	5	460	1.73E-06	0	465
<i>F5</i>	0.000261	410	55	0.643517	255	210	0.24519	176	289
<i>F6</i>	1.73E-06	0	465	1.73E-06	0	465	1.73E-06	0	465
<i>F7</i>	1.73E-06	465	0	0.001833	384	81	1.73E-06	0	465
<i>F8</i>	4.73E-06	455	10	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0
<i>F9</i>	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0
<i>F10</i>	1.73E-06	465	0	0.072661	137.5	327.5	3.18E-06	6	459
<i>F11</i>	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0	1.73E-06	0	465
<i>F12</i>	1.73E-06	0	465	0.975387	234	231	0.975387	234	231
<i>F13</i>	1.73E-06	0	465	1.73E-06	0	465	0.102011	312	153
<i>F14</i>	2.6E-06	461	4	0.360039	188	277	1.9E-06	1	464
<i>F15</i>	0.003162	376	89	0.004992	369	96	0.765519	247	218
<i>F16</i>	1.73E-06	465	0	1.73E-06	0	465	4.32E-08	0	465
<i>F17</i>	1.92E-06	464	1	1.73E-06	465	0	4.32E-08	0	465
<i>F18</i>	1.73E-06	0	465	1.73E-06	0	465	6.8E-08	0	465
<i>F19</i>	1.73E-06	0	465	1.73E-06	465	0	4.32E-08	0	465
<i>F20</i>	0.942611	229	236	0.490798	199	266	0.332984	186	279
<i>F21</i>	0.000571	400	65	0.089718	315	150	0.158293	164	301
<i>F22</i>	0.781264	219	246	0.289477	181	284	0.202998	171	294
<i>F23</i>	0.042767	331	134	0.628843	209	256	0.007616	103	362

3.4.1. Duyarluluk Analizi

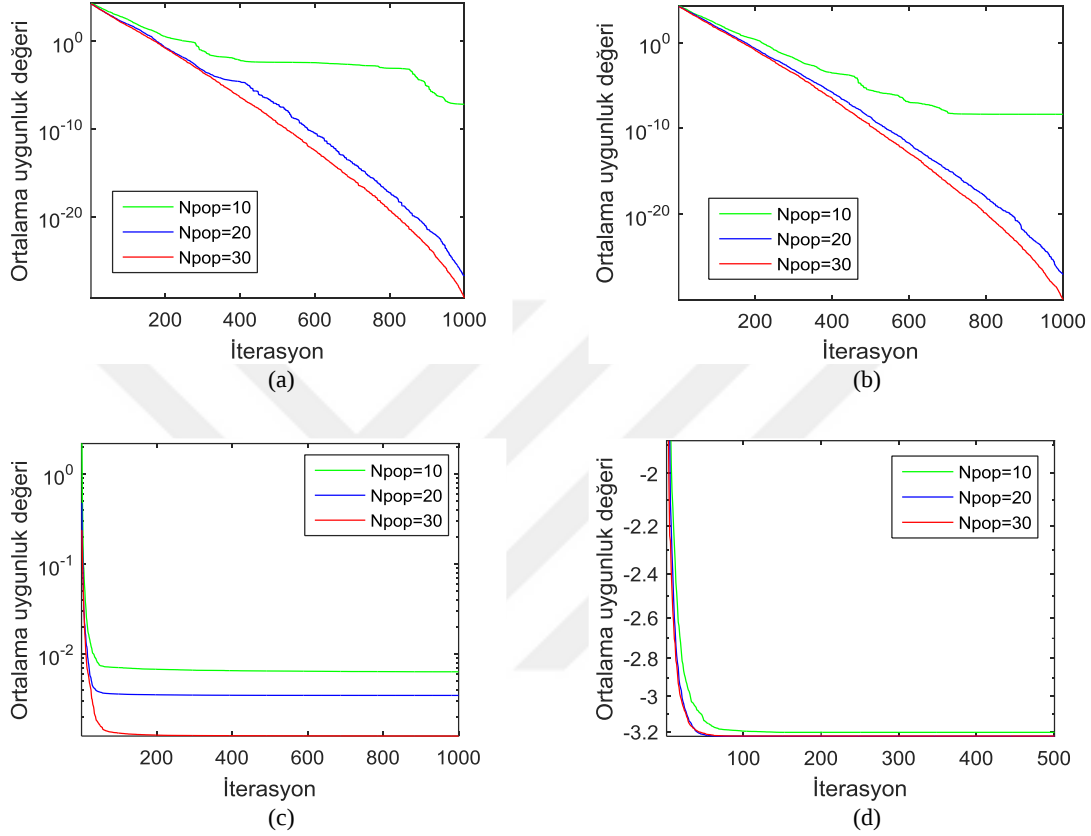
Algoritmaların sağlamlığını test etmek amacı ile algoritmalar F1, F6, F15 ve F20 fonksiyonları üzerinde farklı popölasyon sayıları ile çalıştırılarak yakınsama grafikleri oluşturulmuştur. Kontrol parametreleri üzerindeki değişikliklere ne kadar az hassasiyetle cevap verdiği algoritmaların sağlamlığını göstermektedir. şekil 3.3'te BOA, şekil 3.4'te GIA ve şekil 3.5'te DKA için yakınsama grafikleri verilmiştir.

şekil 3.3'te verilen BOA yakınsama grafiklerinde F1 ve F6 tek modlu fonksiyonlarında popölasyon sayısı sonucu pozitif yönde etkilemiştir. Çok modlu fonksiyonlarda ise 10 popölasyon sayılı algoritma küçük bir farkla optimuma daha az yakınsamıştır. Grafiklerde N_{pop} popölasyon sayısını ifade etmektedir.



şekil 3.3. (a) F1, (b) F6, (c) F15, (d) F20 fonksiyonları için BOA'nın yakınsama grafikleri

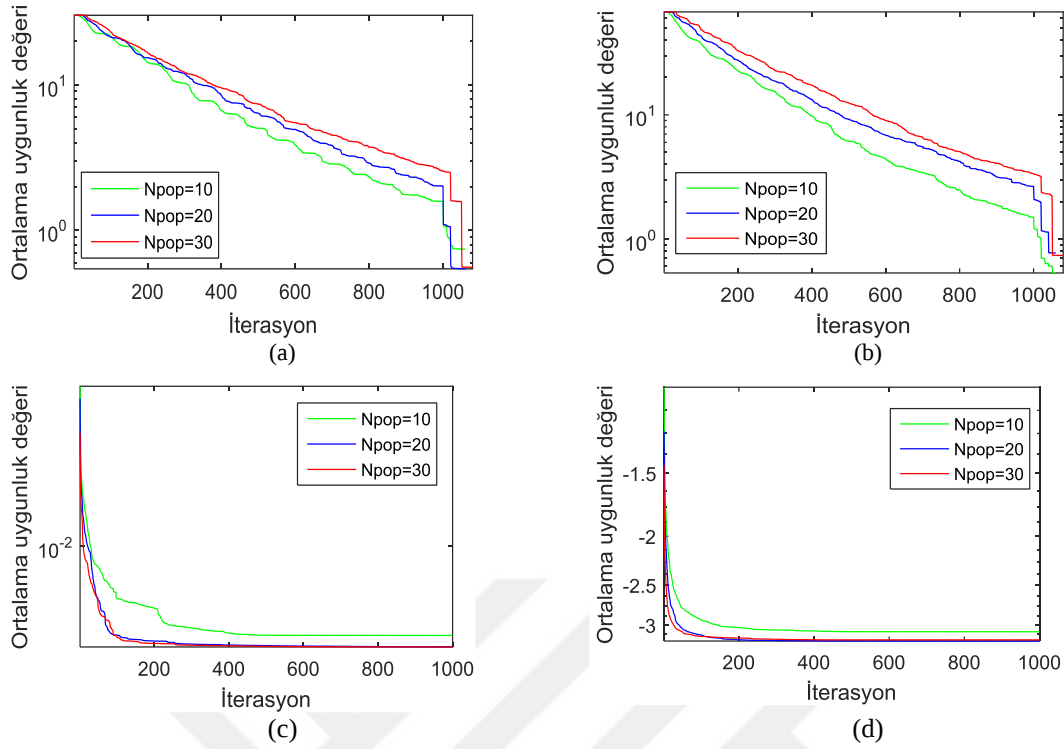
Şekil 3.4'te verilen GIA yakınsama grafiklerine popülasyon sayıları çözüm üzerinde etkili olmuştur. Özellikle 10 popülasyon sayılı algoritma çok daha az yakınsamıştır. Sadece F20 fonksiyonunda popülasyon sayısının çözüm üzerinde olmamıştır.



Şekil 3.4. (a) F1, (b) F6, (c) F15, (d) F20 fonksiyonları için GIA'nın yakınsama grafikleri

Şekil 3.5'te DKA yakınsama grafiklerine göre, tek modlu fonksiyonlarda popülasyon sayısı çözümü değiştirmemiş fakat yakınsamayı yavaşlatmıştır. Çok modlu fonksiyonlarda 10'dan büyük popülasyon sayılarında çözümü değiştirmiştir.

Genel olarak bakıldığında BOA ve GIA tek modlu fonksiyonlarda popülasyon sayısına yüksek hassasiyetle cevap vermişler ve bu durum DKA'da görülmemiştir. Çok modlu fonksiyonlarda bütün algoritmalar popülasyon sayısına çok düşük hassasiyetle cevap vermişlerdir.



Şekil 3.5. (a) F1, (b) F6, (c) F15, (d) F20 fonksiyonları için DKA'nın yakınsama grafikleri

3.5. Mühendislik Problemleri ile Yapılan Deneyler

Mühendislik tasarım problemi için performans ölçtümüz algoritmaların problem maliyetlerini minimize etmesidir. Algoritmalar maksimum 10000 fonksiyon değerlendirme sayısı ve 200 popülasyon ile 30'ar kez çalıştırılmış ve alınan en iyi sonuçlar karşılaştırmada kullanılmıştır. Mühendislik tasarım problemlerinin kısıtlayıcıları vardır ve problemlerin optimize edilmesi sırasında kısıtların ihlal edilmemesi gerekmektedir. Bu çalışmadaki deneylerde kısıtlı problemleri ardışık kısıtsız problemlere dönüştüren yöntemlerden biri olan ceza metodu kullanılmıştır. Basınçlı kap problemi için elde edilen sonuçlar Tablo 3.8'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde belirlenen parametreler ile en düşük maliyete GIA'nın ulaştığı ve en kötü sonucun ise DKA'ya ait olduğu görülmektedir. Ancak GIA ile alınan sonuçlarda $g1$ kısıtı ihlal edilmiştir.

Tablo 3.8. Basınçlı kap problemi test sonuçları

Algoritma	Optimum değişkenler				Optimum Maliyet
	T_s	T_h	R	L	
DKA	0.824914	0.4073811	42.61044	170.3938	5985.3372
GIA	0.7781686	0.3846492	40.31962	200	5885.3328
BOA	0.779933	0.3926534	40.37387	199.2462	5914.0175

Yay germe / sıkıştırma problemi için elde edilen sonuçlar ise Tablo 3.9’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en düşük maliyete BOA’nın ulaştığı ve en kötü sonucun ise DKA’ya ait olduğu görülmektedir. Ancak BOA yöntemi $g1$ kısıtını, GIA yöntemi ise $g2$ kısıtını ihlal etmiştir.

Tablo 3.9. Yay germe / sıkıştırma problemi test sonuçları

Algoritma	Optimum değişkenler			Optimum Maliyet
	w	d	L	
DKA	0.05	0.317281	14.047	0.012729
GIA	0.051885	0.361452	11.0167	0.012666
BOA	0.0516384	0.3555	11.3607	0.012665

Tablo 3.10’da mühendislik problemleri için algoritma çiftleri arasında yapılan Wilcoxon işaretli sıralar test sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.10. Mühendislik tasarım problemleri Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları

Problem	GIA - DKA			BOA - DKA			BOA - GIA		
	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-
Basınçlı kap problemi sonuçları	0.00006	419	46	0,08226	300	165	0.0032	100	365
Yay germe / sıkıştırma problemi	2.6984E-06	462	3	0,00052	369	66	5.6292E-06	440	25

Basınçlı kap problemi için Wilcoxon işaretli sıralar test sonuçlarına göre; GIA-DKA ve BOA-GIA sütununda $p < 0.05$ olduğundan sonuçlar arasındaki farkın anlamlı olduğu ve bu problem için GIA’nın daha iyi olduğu istatistiksel olarak ta desteklenmektedir. DKA ve BOA sonuçları için yapılan Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçlarında $p=0.08226$ sonucu alınmıştır ve bu sonuç eşik değerimiz olan %95’in altındadır. Bu nedenle, en kötü sonucu DKA’nın vermesine rağmen BOA’dan daha kötü olduğu kesin olarak söylenemez.

Yay germe / sıkıştırma problemi için Wilcoxon işaretli sıralar test sonuçlarına göre; bütün testlerde $p < 0.05$ olduğu için sonuçlar arasında anlamlı bir fark vardır. Bu problem için BOA en iyi, DKA ise en kötü algoritma olmuştur.

3.6. Bulgular ve Tartışma

Optimizasyon alanında algoritmaların performansını karşılaştırmak için global optimizasyon olarak bilinen matematiksel fonksiyonları kullanmak ortak bir fikirdir. Bu fonksiyonlar gerçek arama alanlarına son derece benzerdir ve algoritma karşılaştırması için uygundur. Tezin bu bölümünde DKA, GIA ve BOA algoritmaları incelenerek kalite test fonksiyonları ve mühendislik tasarım problemleri üzerinde karşılaştırılmıştır.

Kalite test fonksiyonları ile yapılan deneylerde BOA 23 kalite test fonksiyonunun 13 tanesinde optimum sonuca daha iyi yakınsayarak en iyi algoritma olmuştur. DKA 5 ve GIA ise 4 fonksiyonda daha optimum sonuç vermişlerdir. Her algoritma çifti için 23 fonksiyon üzerinden yapılan %95 duyarlılıklı Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçlarına göre BOA; DKA'ya karşı 14/6, GIA'ya karşı 9/6 daha başarılı olmuştur. DKA ise GIA'ya karşı 12/4 daha başarılı olmuştur.

Mühendislik tasarım problemlerinden basınçlı kap tasarımı için yapılan testlerde GIA kısıt ihlali yapmış ve en küçük maliyete BOA ulaşmıştır. Yay / germe sıkıştırma probleminde ise BOA ve GIA kısıt ihlali yapmış, en küçük maliyete DKA ulaşmıştır. Sonuçlar arasında istatistiksel olarak da anlamlı fark olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak BOA'nın diğer algoritmalara göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Bu durum sezgisel algoritmaların performanslarının problem türlerine göre değiştiğini göstermektedir. Ayrıca GIA ile alınan sonuçlarda standart sapmanın büyük olması ve DKA'nın giriş parametrelerinin fazla olması bu algoritmaların dezavantajlarıdır.

4. KAOTİK HARİTALI BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Sezgisel yöntemlerin çoğunda uzun periyotlu rastgele sayı dizileri önemli bir yer tutmaktadır. Rastgele üretilen sayıların belli bir alanda toplanması veya aynı değerler üretilmesi ile algoritmanın lokal optimumlara takılma riski artabilmektedir. Bu nedenle üretilen sayıların aynı olmaması, yayılmış spektruma sahip olması sezgisel algoritmaların performansını etkileyen durumlardır. Ayrıca sayılar oluşturulurken fazla zamana gereksinim duyulmaması ve saklanma maliyetinin düşük olması da istenilen durumlardan bazılarıdır.

Kaotik haritalar kaotik davranış sergileyen ayrık zamanlı sistemlerdir ve kaotik haritalarla üretilen sayıların tahmin edilemez, yayılmış spektrumlu karakteristiğe sahip olduğu ve periyodik olmadığı teorik olarak kanıtlanmıştır [41]. Bu nedenle, sezgisel algoritmalarda kaotik harita kullanarak optimum noktalardan kaçmak ya da yerel optimuma takılma riskini azaltmak mümkün olabilmektedir. Sezgisel algoritmaların performansını arttırmak için kaotik haritaları kullanan çalışmalar literatürde mevcuttur. Global optimizasyon için Kaotik Arı Kolonisi Algoritmaları [41], Kaotik Haritalı Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmaları [42], Kaotik Haritalı Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması [43], Kaotik Ateş Böceği Algoritması [44], Kaotik Gri Kurt Optimizasyon Algoritması [45], Kaotik Big-Bang Optimizasyonu [46], Kaotik Armoni Arama Algoritmaları [47], Kaotik Haritalı Balina Optimizasyon Algoritması [48] bu çalışmalara örnek olarak verilebilir.

Bu kısımda BOA'nın kaotik versiyonları oluşturularak kaotik haritaların sezgisel algoritma üzerindeki etkisi incelenmiştir. BOA'nın seçilme sebebi ise bölüm üç'teki yapılan deneylerde diğer algoritmalarından daha başarılı sonuçlar vermesi ve daha az başlangıç parametresine sahip olmasıdır.

4.1. Kaotik Haritalar

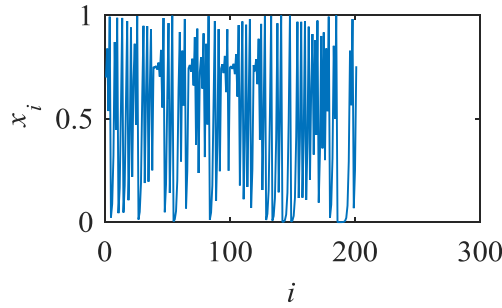
Literatürde birçok kaotik harita tanımlanmıştır [49]. Bu çalışmada kullanılan kaotik haritalar aşağıda açıklanmıştır.

4.1.1. Lojistik Harita

Lojistik harita ayırık zamanlı dinamik bir sistemdir. Tek boyutludur ve doğrusal değildir. Lojistik haritanın matematiksel ifadesi Denklem 4.1’de verilmiştir [50].

$$X_n + 1 = aX_n(1 - X_n) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de n iterasyon sayısı, X_n n.kaotik sayı, a ise lojistik harita sabitidir ve [1,3] aralığında değer aldığında sistem kaotik olmamaktadır. $a=4$ ve 0.7 başlangıç noktası ile 200 iterasyon sonunda lojistik haritanın verdiği değerlerin grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

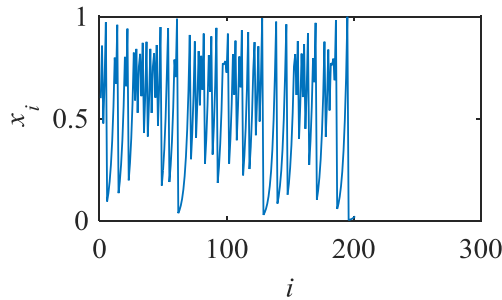


Şekil 4.1. Lojistik harita grafiği

4.1.2. Çadır Harita

Matematiksel ifadesi Denklem 4.2’de verilmiştir [50]. Başlangıç noktası 0.7 ve 200 iterasyon ile çalıştırılarak alınan çadır harita grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

$$X_n + 1 = \begin{cases} X_n/0.7 & X_n < 0.7 \\ 10/3X_n(1 - X_n) & X_n \geq 0.7 \end{cases} \quad (4.2)$$

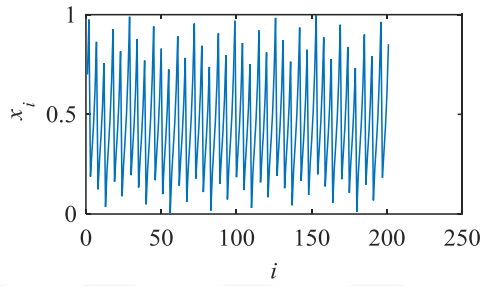


Şekil 4.2. Çadır harita grafiği

4.1.3. Çember Harita

İlk olarak Andrey Kolmogorov tarafından geliştirilen Çember harita denklemi aynı zamanda elektronikteki faz kilitlemeli döngü denklemini de ifade etmektedir [49]. Denklem 4.3'te matematiksel ifadesi verilmiştir. Kontrol parametreleri $a=0.5$, $b=0.2$, $X_0=0.7$ ve 200 iterasyon ile çalıştırılarak alınan çember harita grafiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

$$X_{n+1} = X_n + b - (a/2\pi)\sin(2\pi X_n) \bmod(1) \quad (4.3)$$

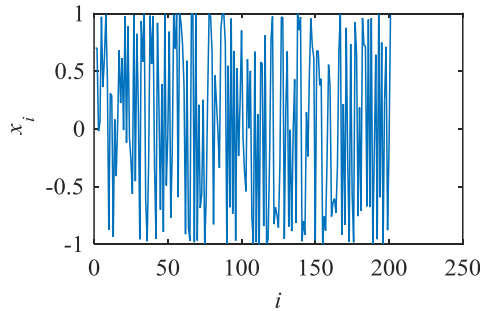


Şekil 4.3. Çember harita grafiği

4.1.4. Çebişev Haritası

Matematikte Pafnuty Chebysev'in adını taşıyan çebişev polinomları moivre formülü ile ilişkili ve iteratif şekilde tanımlanabilen ortogonal polinomlar dizisidir [51]. Denklem 4.4'te bu haritanın matematiksel ifadesi gösterilmiştir. Başlangıç noktası 0.7 ve 200 iterasyon ile çalıştırılarak alınan çebişev harita grafiği Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

$$X_{n+1} = \cos(n \times \arccos(X_n)) \quad (4.4)$$

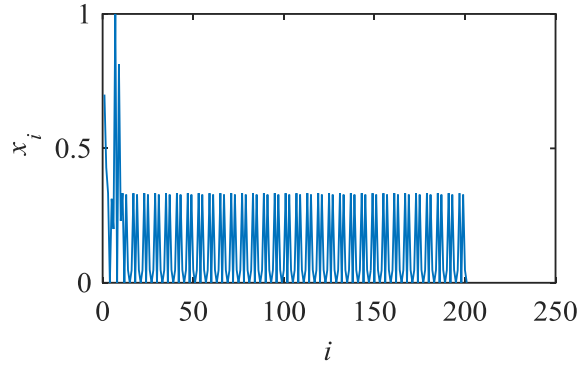


Şekil 4.4. Çebişev harita grafiği

4.1.5. Gaus Harita

Matematiksel ifadesi Denklem 4.5'te gösterilmiştir. Başlangıç noktası 0.7 ve 200 iterasyon ile çalıştırılarak alınan gaus harita grafiği Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

$$X_n + 1 = \begin{cases} 0 & , X_n = 0 \\ \frac{1}{X_n} \bmod(1) & , X_n \in (0,1) \end{cases} \quad (4.5)$$

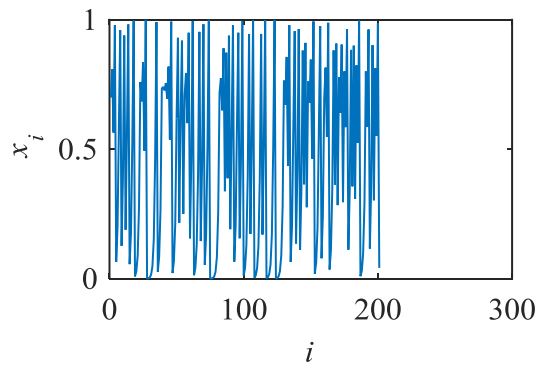


Şekil 4.5. Gaus harita grafiği

4.1.6. Sinüs Harita

Sinus harita Denklem 4.6'da gösterildiği gibi ifade edilmektedir [49]. Başlangıç noktası 0.7, $a=4$ ve 200 iterasyon ile çalıştırılarak alınan sinüs harita grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

$$0 < a \leq 4 \text{ olmak üzere, } X_n + 1 = \frac{a}{4} \sin(\pi X_n) \quad (4.6)$$

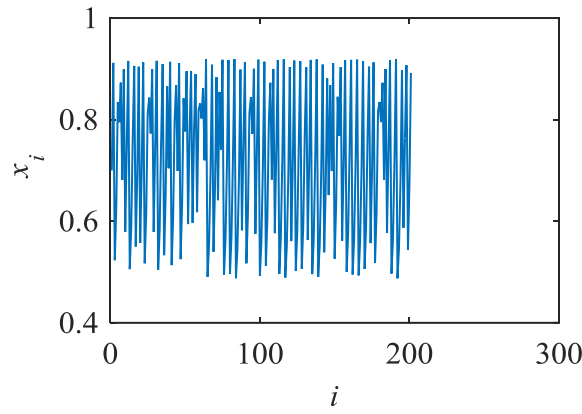


Şekil 4.6. Sinüs harita grafiği

4.1.7. Sinüzoidal Yineleyici

Sinüzoidal yineleyici Denklem 4.7'deki ifade edilmektedir. Başlangıç noktası 0.7, $a=2.3$ ve 200 iterasyon ile çalıştırılarak alınan sinüzoidal yineleyici grafiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

$$X_n + 1 = ax_n^2 \sin(\pi X_n) \quad (4.7)$$

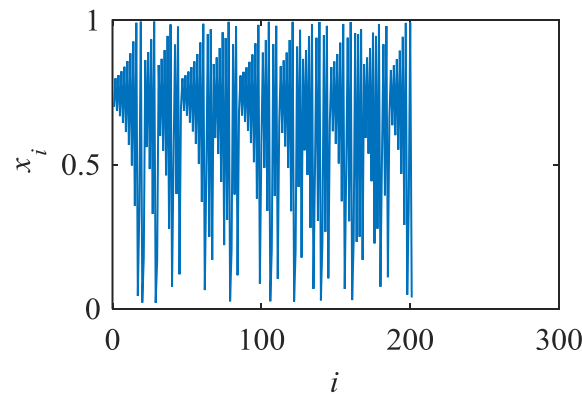


Şekil 4.7. Sinüzoidal yineleyici harita grafiği

4.1.8. Singer Harita

Singer harita formülasyonu Denklem 4.8'deki gibi ifade edilmektedir. Başlangıç noktası 0.7 ve $\mu=1.07$ olarak 200 iterasyon ile alınan grafik Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

$$X_n + 1 = \mu(7.86x_n - 23.31x_n^2 + 28.75x_n^3 - 13.302875x_n^4) \quad (4.8)$$

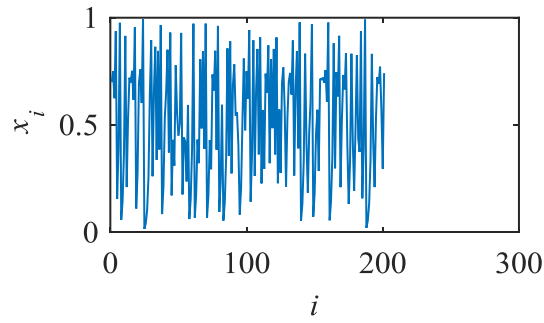


Şekil 4.8. Singer harita grafiği

4.1.9. Parçalı Harita

Parçalı haritanın matematiksel ifadesi Denklem 4.9’da gösterilmiştir. Başlangıç noktası 0.7, $P=0.4$ olarak 200 iterasyon ile alınan grafik Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

$$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{P} & 0 \leq x_i < P \\ \frac{x_i - P}{0.5 - P} & P \leq x_i < 0.5, \\ \frac{1 - P - x_i}{0.5 - P} & 0.5 \leq x_i < 1 - P, 1 - P \leq x_i < 1 \\ \frac{1 - x_i}{P} & \end{cases} \quad (4.9)$$

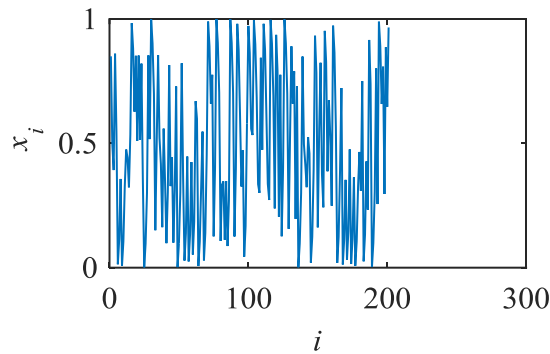


Şekil 4.9. Parçalı harita grafiği

4.1.10. İteratif Harita

İteratif harita matematiksel ifadesi Denklem 4.10’da verilmiştir. Başlangıç noktası 0.7, $a=0.7$ ve 200 iterasyon ile çalıştırıldığında alınan grafik Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

$$x_{i+1} = \sin\left(\frac{a\pi}{x_i}\right) \quad (4.10)$$



Şekil 4.10. İteratif harita grafiği

4.2. Kaotik Haritalı BOA Yöntemleri

BOA'da rastgele değerler kullanan kısımlar kaotik harita denklemleri ile değiştirilerek BOA'nın beş farklı kaotik versiyonu oluşturulmuştur. Her bir kaotik versiyona yukarıda incelenen 10 adet kaotik harita ayrı ayrı uygulanarak 50 adet farklı algoritma elde edilmiştir. Oluşturulan kaotik versiyonlar şu şekildedir;

KHBOA1: Denklem 2.9'da r parametresi kaotik harita ile değiştirilerek Denklem 4.11 elde edilmiştir. Denklem 4.11'deki kh , kaotik harita tabanlı fonksiyondur ve çalışmanın devamındaki denklemlerde de bu ifade kullanılmıştır.

$$\vec{A} = 2\vec{a}.kh - \vec{a} \quad (4.11)$$

KHBOA2: Denklem 2.10'da r parametresi kaotik harita fonksiyonu ile değiştirilerek Denklem 4.12 elde edilmiştir.

$$\vec{C} = 2.kh \quad (4.12)$$

KHBOA3: Denklem 2.11'de l parametresi kaotik harita fonksiyonu ile değiştirilerek Denklem 4.13 elde edilmiştir. kh $[-1,1]$ arasında değer alacak şekilde kaotik harita algoritması çalıştırılmıştır.

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{D}' . e^{b(kh)} . \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (4.13)$$

KHBOA4: Denklem 2.13'de p parametresi kaotik harita fonksiyonu ile değiştirilerek Denklem 4.14 elde edilmiştir.

$$\vec{X}(t + 1) = \begin{cases} \vec{X}^x(t) - \vec{A} . \vec{D} , & kh < 0.5 \\ \vec{D}' . e^{bl} . \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t), & kh \geq 0.5 \end{cases} \quad (4.14)$$

KHBOA5: Başlangıç popülasyon değerleri kaotik haritanın yinelenmesi ile oluşturulmuştur.

4.3. Deneyler

Kaotik haritaların algoritma üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 23 adet kalite test fonksiyonu ve iki adet gerçek mühendislik problemi üzerinde testler yapılmıştır.

4.3.1. Kalite Test Fonksiyonları ile Yapılan Deneyler

Bu deneylerde algoritmalar rastgele başlangıç popülasyonu ile her kalite test fonksiyonu için 500 iterasyon çalıştırılmıştır. Algoritmalar her iterasyonda aynı fonksiyon değerlendirme sayısına sahip olduğundan dolayı sonlandırma kriteri olarak iterasyon sayısı kabul edilmiştir. Her bir fonksiyon için 30’ar kez bağımsız olarak çalıştırmanın ardından elde edilen istatistiksel sonuçlar değerlendirmelerde kullanılmıştır. KHBOA1 için 10 adet kaotik harita ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. KHBOA1 için kalite test fonksiyonları sonuçları (İ: istatistik, F: Fonksiyon)

F	İ	Çebişev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F1	Ortalama	3.3674E-62	6.51E-83	8000	1.41E-66	1.12E-58	7.14E-74	1.8E-57	3.76E-65	1.03E-58	1.14E-70
	En iyi	1.1085E-70	2.63E-97	1.03578E-70	1.76E-77	7.11E-71	2.09E-82	1.58E-70	9.36E-76	2.8E-73	1.52E-83
	En kötü	6.8512E-61	1.74E-81	30000	4.17E-65	3.35E-57	1.29E-72	5.18E-56	8.28E-64	2.46E-57	1.92E-69
	Std	1.3035E-61	3.19E-82	9965.457582	7.6E-66	6.11E-58	2.53E-73	9.46E-57	1.53E-64	4.58E-58	4.3E-70
F2	Ortalama	2.3355E-43	8E-57	54.33333333	6.37E-47	1.36E-41	3.95E-51	7.82E-41	4.28E-45	2.06E-42	3.81E-51
	En iyi	8.3235E-50	2.1E-63	1.03848E-48	5.32E-53	8.95E-48	1.02E-57	2.05E-46	5.8E-50	1.05E-51	1.34E-59
	En kötü	6.1064E-42	1.95E-55	130	1.57E-45	1.45E-40	1.11E-49	1.07E-39	1.07E-43	4.6E-41	6.42E-50
	Std	1.1116E-42	3.59E-56	32.9768292	2.87E-46	3.76E-41	2.03E-50	2.6E-40	1.94E-44	8.43E-42	1.24E-50
F3	Ortalama	51251.1762	39927.8	60522.83496	44539.9	49777.7	43507.23	51861.97	46631.9	41262.95	41202.26
	En iyi	19848.6393	13283.99	24747.0158	23028.61	17984.3	12862.54	29961.05	10429.72	6308.981	5829.335
	En kötü	92345.2873	57761.53	96057.2506	68202.06	92899.49	67429.09	73513.92	72565.84	73391.11	63450.89
	Std	15887.2044	10305.22	18503.40166	11343.52	17244.16	11353.76	10583.97	17149.01	13816.1	14262.71
F4	Ortalama	54.1834491	43.75935	66.76466441	53.56689	59.64366	54.64245	48.83883	55.74407	74.49472	50.77051
	En iyi	0.01241523	0.070546	0.632568425	0.530479	0.198623	0.148625	0.001069	2.662888	37.45144	0.650029
	En kötü	88.7611551	87.8721	92.15015991	86.45728	86.9765	90.18434	89.50804	90.24794	89.68891	89.51895
	Std	27.62047	29.49969	24.40127521	30.19509	26.8499	30.49159	29.29555	29.89155	14.55426	29.4189
F5	Ortalama	28.1269726	27.82043	2665441.797	28.03054	28.34846	28.07624	28.36506	28.2189	28.32987	27.83638
	En iyi	27.6289191	26.93402	0.025165928	27.12011	27.68825	27.59571	27.84854	27.63421	27.30808	27.03237
	En kötü	28.7803729	28.76742	79960057.85	28.77581	28.75657	28.75298	28.78317	28.76654	28.79327	28.75793
	Std	0.37116609	0.566168	14598622.34	0.448854	0.343985	0.406236	0.31899	0.415293	0.473716	0.524205
F6	Ortalama	0.15698486	0.637588	3366.916432	0.282896	0.304268	0.434945	0.245795	0.252186	0.877193	0.020885
	En iyi	0.05297428	0.226692	0.092302638	0.1082	0.089311	0.099349	0.071647	0.087108	0.179843	0.092366
	En kötü	0.38307177	1.208076	20200.70974	0.81596	0.590611	0.873817	0.617413	0.784051	2.461332	1.192201
	Std	0.09394003	0.228134	6125.582025	0.170733	0.148598	0.207534	0.13566	0.169944	0.477971	0.261562
F7	Ortalama	0.00331587	0.001732	0.540157269	0.003066	0.002826	0.003496	0.004832	0.003767	0.008501	0.002882
	En iyi	7.158E-05	2.04E-06	5.64676E-05	3.34E-05	0.000214	9.94E-05	6.12E-05	0.00014	0.000326	0.000279
	En kötü	0.01143523	0.007822	8.060338418	0.014782	0.010104	0.01479	0.028346	0.01134	0.050931	0.017691
	Std	0.00351272	0.001932	1.784781233	0.00349	0.002514	0.00381	0.006805	0.003087	0.010587	0.003505
F8	Ortalama	-11176.719	-9823.08	-11756.2425	-10524.6	-11063.9	-10740.4	-11197.2	-10334.4	-5605.04	-10890
	En iyi	-12569.443	-12568.1	-12569.1004	-12569.3	-12566.4	-12566.1	-12569.4	-12569.4	-6132	-12569.5
	En kötü	-8459.1186	-6706.71	-10169.8959	-7837.21	-8300.29	-7615.37	-8523.32	-7585.36	-5417.67	-7863.14
	Std	1522.16649	2327.316	832.9944872	1575.665	1616.312	1688.082	1336.511	1865.189	182.0205	1764.951
F9	Ortalama	4.77358431	2.976016	68.45515582	3.79E-15	0	1.89E-15	1.89E-15	0.43058	53.46906	0
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	143.207529	89.28049	173.5482824	1.14E-13	0	5.68E-14	5.68E-14	12.91741	250.214	0
	Std	26.1459981	16.30031	56.06823737	2.08E-14	0	1.04E-14	1.04E-14	2.358385	69.39335	0
F10	Ortalama	4.204E-15	5.03E-15	10.44217113	4.8E-15	4.56E-15	4.2E-15	4.68E-15	5.15E-15	1.98561	5.51E-15
	En iyi	8.8818E-16	8.88E-16	8.88178E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16
	En kötü	7.9936E-15	7.99E-15	19.96676885	1.51E-14	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	19.96677	7.99E-15
	Std	2.9405E-15	2.3E-15	9.477303803	3E-15	2.38E-15	2.46E-15	2.07E-15	2.54E-15	6.058866	2.49E-15
F11	Ortalama	0.0110511	0.002154	63.2442742	0.007234	0	0	0.028057	0.011638	0.010357	0.002877
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0.23162972	0.064606	270.6666676	0.217012	0	0	0.344883	0.196242	0.158238	0.086324
	Std	0.04547421	0.011795	75.57664088	0.039621	0	0	0.087689	0.044654	0.039422	0.015761
F12	Ortalama	0.18702918	0.03679	8533333.961	0.031552	0.061886	0.033534	0.074966	0.024624	0.049556	0.085398
	En iyi	0.00257551	0.014602	0.001650647	0.003214	0.003037	0.005487	0.001303	0.004228	0.003172	0.006097
	En kötü	4.42585731	0.103918	256000018.5	0.202352	0.471297	0.410329	0.668182	0.11552	0.30178	2.043369
	Std	0.80265897	0.021726	46738994.96	0.045661	0.124678	0.072727	0.144165	0.02749	0.061119	0.370042
F13	Ortalama	0.30018898	0.850418	27337516.27	0.378825	0.331947	0.513418	0.281464	0.304241	0.799331	0.567999
	En iyi	0.02608094	0.190589	0.066629966	0.127475	0.083946	0.15744	0.05588	0.055719	0.251292	0.162202
	En kötü	0.7743452	1.737976	410062741.4	0.947818	1.105328	1.096686	0.934157	0.929237	1.450956	1.182936
	Std	0.15242843	0.362164	104036251.9	0.235689	0.213976	0.244556	0.198041	0.218823	0.348932	0.223369
F14	Ortalama	2.08350313	4.520974	3.063153813	2.309864	1.852604	2.309385	1.654331	1.829585	2.277381	2.475144
	En iyi	0.99800384	0.998004	0.998003838	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004
	En kötü	10.7631807	15.50382	10.76318067	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318
	Std	1.98156243	4.338919	3.009591274	2.532986	1.902071	2.585909	1.858425	1.989565	2.477702	2.512436

Tablo 4.1. KHBOA1 için kalite test fonksiyonları sonuçları (devamı)

F	İ	Çebişev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F15	Ortalama	0.00080187	0.000612	0.005316772	0.000474	0.000857	0.000738	0.000564	0.000709	0.004266	0.000648
	En iyi	0.00030941	0.000314	0.00064889	0.000308	0.000308	0.000308	0.000308	0.000308	0.000318	0.00031
	En kötü	0.00202857	0.002053	0.008333703	0.00078	0.002252	0.002252	0.001537	0.002252	0.056543	0.00144
	Std	0.00050539	0.000405	0.003467511	0.00013	0.000534	0.000522	0.000325	0.000564	0.011067	0.000326
F16	Ortalama	-1.0316285	-1.03163	-1.03162845	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En iyi	-1.0316285	-1.03163	-1.03162845	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En kötü	-1.0316284	-1.03163	-1.03162843	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	Std	7.6961E-09	1.24E-09	5.96997E-09	2.34E-09	1.82E-09	5.66E-10	2.25E-09	2.64E-09	5.21E-10	4.1E-09
F17	Ortalama	0.39789221	0.397894	0.39790708	0.397895	0.397894	0.397898	0.397898	0.397896	0.397915	0.397889
	En iyi	0.39788736	0.397887	0.397887358	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887
	En kötü	0.39791853	0.397974	0.397970313	0.397944	0.397957	0.397956	0.397965	0.39797	0.398121	0.397896
	Std	8.1309E-06	1.59E-05	2.31561E-05	1.36E-05	1.45E-05	1.63E-05	1.72E-05	1.67E-05	5.9E-05	2.95E-06
F18	Ortalama	3.00000227	3.902106	5.700028433	3.000009	3.000005	3.000065	3.000005	3.000009	5.712283	3.000047
	En iyi	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	En kötü	3.00001977	30.05766	84	3.000099	3.000053	3.000548	3.00007	3.000129	30.32492	3.000267
	Std	4.0713E-06	4.939995	14.78850368	1.92E-05	1.06E-05	0.000122	1.27E-05	2.42E-05	8.276016	6.51E-05
F19	Ortalama	-3.8588451	-3.85096	-3.7996999	-3.85693	-3.85773	-3.85504	-3.8562	-3.8585	-3.82873	-3.85655
	En iyi	-3.8627749	-3.86278	-3.86278185	-3.86273	-3.86272	-3.86276	-3.86278	-3.86278	-3.86278	-3.86278
	En kötü	-3.8411472	-3.71435	-3.51466079	-3.77363	-3.83932	-3.79019	-3.82888	-3.84391	-3.08972	-3.79516
	Std	0.00470332	0.030052	0.10716387	0.016163	0.005974	0.016193	0.009214	0.0045	0.140111	0.012387
F20	Ortalama	-3.2229931	-3.21532	-3.1964961	-3.17471	-3.18167	-3.20459	-3.20799	-3.18557	-3.16516	-3.23742
	En iyi	-3.3215536	-3.32183	-3.32019949	-3.32197	-3.32157	-3.32175	-3.32194	-3.32181	-3.32046	-3.32182
	En kötü	-2.4317685	-2.9824	-2.84792005	-2.43135	-2.83717	-2.43168	-2.63804	-2.63519	-2.39084	-2.83939
	Std	0.17225685	0.11481	0.123969378	0.171845	0.14694	0.183027	0.14018	0.168539	0.216117	0.12302
F21	Ortalama	-7.4855747	-7.83879	-7.5130537	-8.3557	-8.27809	-7.79534	-9.24336	-7.42603	-7.51142	-8.39213
	En iyi	-10.151925	-10.1514	-10.1440752	-10.1529	-10.1528	-10.1515	-10.1527	-10.153	-10.1515	-10.1529
	En kötü	-2.6299513	-2.61449	-2.58344567	-2.62735	-5.03348	-2.62851	-2.63021	-5.04905	-2.62873	-0.88199
	Std	2.89796066	2.679396	2.999066814	2.584485	2.495963	2.653028	2.035878	2.578653	2.698857	2.82526
F22	Ortalama	-8.6634267	-6.27133	-8.4179025	-7.32288	-9.17683	-7.42001	-7.76668	-6.87966	-5.72367	-7.25329
	En iyi	-10.402784	-10.4012	-10.395771	-10.4022	-10.4027	-10.3999	-10.4026	-10.4025	-10.3936	-10.4017
	En kötü	-2.7655896	-2.76322	-1.83314452	-2.76387	-2.75969	-2.76527	-1.83513	-2.75741	-2.76067	-1.83616
	Std	2.69199826	2.854589	3.03363631	2.982373	2.432477	2.827889	3.186034	2.990215	2.218417	3.735821
F23	Ortalama	-7.3850603	-5.81699	-7.60434386	-7.13946	-7.73621	-6.61705	-8.38458	-7.18998	-5.90845	-7.57345
	En iyi	-10.53613	-10.5343	-10.5356463	-10.5359	-10.5359	-10.5354	-10.5361	-10.5351	-10.5353	-10.535
	En kötü	-2.4213792	-1.67608	-1.6718483	-1.67626	-2.42062	-2.4213	-1.85947	-3.82755	-1.51488	-1.67262
	Std	3.291306	3.306109	3.745055398	3.578636	3.09696	3.369277	3.166808	2.767524	3.028357	3.311965

KHBOA2 için 10 adet kaotik harita ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. KHBOA2 için kalite test fonksiyonları sonuçları

F	İ	Çebişev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F1	Ortalama	1.07E-79	2.93E-69	3.87E-92	1.56E-72	5.18E-80	5.3E-71	2.56E-83	1.28E-75	3.21E-67	1.26E-73
	En iyi	5.64E-96	6.26E-87	1.5E-109	1.28E-89	1.45E-93	8.89E-84	9.86E-98	1.68E-86	3.63E-77	3.67E-85
	En kötü	3.04E-78	8.75E-68	6.51E-91	3.38E-71	1.02E-78	1.56E-69	6.67E-82	3.01E-74	3.18E-66	3.66E-72
	Std	5.54E-79	1.6E-68	1.29E-91	6.42E-72	2.01E-79	2.85E-70	1.22E-82	5.58E-75	8.09E-67	6.67E-73
F2	Ortalama	1.15E-54	7.9E-50	8.29E-63	1.3E-52	1.25E-53	7.65E-51	1.34E-55	1.46E-49	1.67E-44	1.53E-49
	En iyi	7.09E-62	5.74E-57	1.22E-73	8.74E-58	1.1E-63	1.52E-57	4.92E-62	6.69E-56	3.37E-49	1.93E-57
	En kötü	2.88E-53	2.32E-48	1.28E-61	3.2E-51	3.15E-52	9.57E-50	1.91E-54	4.25E-48	1.61E-43	4.31E-48
	Std	5.23E-54	4.23E-49	2.67E-62	5.81E-52	5.75E-53	2.23E-50	4.01E-55	7.75E-49	3.79E-44	7.86E-49
F3	Ortalama	44570.3	45188.42	58394.27	50429.78	47411.41	44653.72	47512.79	45883.69	43980	40868.48
	En iyi	18355.39	23870.34	34604.26	9207.364	15690.68	20703.8	21105.02	14481.49	20899.17	6234.418
	En kötü	73288.82	73015.66	85478.25	80213.49	76276.44	65888.71	87237.22	70069.66	74148.04	78661.58
	Std	13517.44	11717.78	13313.08	14903.07	15412.03	10979.49	15244.36	14513.26	11168.6	15233.54
F4	Ortalama	45.59582	54.58453	65.04983	54.62901	47.5268	45.79934	56.16986	34.81931	41.49587	54.2784
	En iyi	0.989848	5.850915	1.935475	2.846566	0.008155	0.020728	2.3E-07	0.118034	0.790549	3.03392
	En kötü	89.92764	89.50871	92.0798	87.96457	87.49964	90.96658	89.89432	85.61851	82.81934	87.42289
	Std	31.69771	26.48783	26.96377	27.48296	31.09539	31.69327	30.95956	26.40811	26.85305	25.9085
F5	Ortalama	27.96512	27.98504	27.91441	28.01613	27.98308	28.00299	28.01837	28.03509	27.93867	27.93165
	En iyi	27.26283	26.82727	27.16771	27.22519	26.9146	27.09566	27.39546	27.36538	27.14319	26.95774
	En kötü	28.73031	28.76609	28.77231	28.76862	28.77209	28.76283	28.55577	28.7701	28.7547	28.76859
	Std	0.403737	0.575627	0.487511	0.489866	0.452136	0.548405	0.332429	0.446215	0.41377	0.405333
F6	Ortalama	0.389748	0.469047	0.611853	0.360259	0.336114	0.424498	0.37289	0.251445	0.227333	0.44815
	En iyi	0.154365	0.126948	0.140825	0.107855	0.088003	0.065577	0.086015	0.053512	0.047558	0.096268
	En kötü	0.741383	1.09445	1.769884	0.925394	0.815179	0.964048	0.913373	0.694153	0.77373	1.500131
	Std	0.154764	0.265733	0.373463	0.121267	0.183139	0.245817	0.224047	0.149121	0.150509	0.29938
F7	Ortalama	0.001577	0.003764	0.001993	0.002458	0.002459	0.003613	0.003334	0.003047	0.005535	0.003183
	En iyi	1.6E-05	9E-05	5.84E-05	0.000123	1.81E-05	5.08E-05	2.2E-05	0.0001	0.000146	4.18E-05
	En kötü	0.005351	0.014378	0.008198	0.017217	0.021975	0.017461	0.025739	0.018634	0.017906	0.017023
	Std	0.001505	0.003577	0.002009	0.003483	0.003982	0.003943	0.005798	0.003963	0.004819	0.004145

Tablo 4.2. KHBOA2 için kalite test fonksiyonları sonuçları (devamı)

F	İ	Çeşev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F8	Ortalama	-11092.9	-9570.44	-10621.8	-10743.1	-11211.6	-10673.2	-11462	-11040.9	-10711	-11049.1
	En iyi	-12569.4	-12568.8	-12560.2	-12569.5	-12569.5	-12569.5	-12569.5	-12569.4	-12569.3	-12569.5
	En kötü	-8189.1	-7318.38	-7047.93	-7555.66	-8297.28	-5708.24	-8525.59	-7982.74	-7138.6	-8202.64
	Std	1613.46	1493.319	1821.039	1740.868	1539.299	1974.516	1366.401	1577.562	1869.132	1527.531
F9	Ortalama	1.89E-15	3.79E-15	0	5.68E-15	1.89E-15	5.68E-15	3.79E-15	3.79E-15	0	3.79E-15
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	5.68E-14	5.68E-14	0	5.68E-14	5.68E-14	5.68E-14	5.68E-14	1.14E-13	0	5.68E-14
	Std	1.04E-14	1.44E-14	0	1.73E-14	1.04E-14	1.73E-14	1.44E-14	2.08E-14	0	1.44E-14
F10	Ortalama	4.68E-15	4.8E-15	3.85E-15	4.68E-15	4.56E-15	4.68E-15	3.38E-15	3.85E-15	3.73E-15	4.91E-15
	En iyi	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16
	En kötü	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15
	Std	2.63E-15	2.53E-15	2.65E-15	2.63E-15	2.55E-15	2.07E-15	2.49E-15	2.3E-15	2.7E-15	2.59E-15
F11	Ortalama	0.003444	0.011854	0.007732	0.006047	0.015256	0.008077	0	0	0.022365	0.026606
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0.103335	0.185437	0.231967	0.181396	0.287148	0.157223	0	0	0.410784	0.278169
	Std	0.018866	0.045156	0.042351	0.033118	0.060045	0.032164	0	0	0.080495	0.07185
F12	Ortalama	0.020408	0.029493	0.026527	0.021278	0.017273	0.029995	0.015913	0.020588	0.024857	0.018625
	En iyi	0.009077	0.006597	0.006075	0.004838	0.003858	0.006003	0.005031	0.003082	0.003817	0.005439
	En kötü	0.061248	5.264872	0.118041	0.144449	0.056467	0.131645	0.034029	0.139834	0.244035	0.03955
	Std	0.010291	0.962932	0.019833	0.024443	0.012564	0.025664	0.006937	0.027154	0.043343	0.009256
F13	Ortalama	0.459621	0.666223	0.680842	0.505551	0.463412	0.528262	0.462115	0.293768	0.442322	0.499775
	En iyi	0.154242	0.231454	0.249034	0.122816	0.091855	0.129769	0.090993	0.096526	0.139329	0.143494
	En kötü	1.139272	1.302499	1.430073	1.177614	0.852836	1.21179	1.125985	0.588505	0.887146	1.21994
	Std	0.282474	0.281267	0.293271	0.267465	0.231668	0.239871	0.253841	0.135014	0.202428	0.228732
F14	Ortalama	2.833253	2.960544	3.187761	3.355472	2.63602	3.84199	2.635107	2.701243	3.124841	2.634843
	En iyi	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004
	En kötü	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318
	Std	2.945697	3.315181	3.549763	3.312284	2.894639	3.76285	2.974432	2.958795	3.336851	2.997089
F15	Ortalama	0.00071	0.000859	0.000816	0.000774	0.00075	0.000533	0.001044	0.00099	0.000685	0.000819
	En iyi	0.000309	0.000308	0.000308	0.000312	0.000309	0.000308	0.000314	0.000309	0.00031	0.000315
	En kötü	0.002252	0.002252	0.002192	0.002435	0.002252	0.00149	0.010609	0.008706	0.002252	0.004077
	Std	0.000496	0.000584	0.000578	0.00051	0.000509	0.000244	0.001862	0.001541	0.000508	0.000774
F16	Ortalama	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En iyi	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En kötü	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	Std	1.53E-09	2.5E-09	6.01E-08	4.74E-10	5.49E-09	1.51E-09	2.47E-09	7.71E-10	4.66E-10	1.05E-09
F17	Ortalama	0.397898	0.397899	0.397913	0.3979	0.3979	0.397895	0.397898	0.397899	0.397895	0.397894
	En iyi	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887
	En kötü	0.397979	0.397974	0.398054	0.398132	0.398051	0.397943	0.397965	0.397955	0.397967	0.397937
	Std	1.94E-05	1.94E-05	4.27E-05	4.44E-05	3.11E-05	1.25E-05	1.87E-05	1.68E-05	1.8E-05	1.18E-05
F18	Ortalama	3.000038	3.000119	3.000258	3.00003	3.000034	3.000068	3.000895	3.000087	3.00001	3.00003
	En iyi	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	En kötü	3.000439	3.002054	3.002037	3.000356	3.00039	3.000852	30.02616	3.001081	3.000043	3.000425
	Std	9.24E-05	0.000385	0.000526	7.1E-05	8.51E-05	0.000164	4.934274	0.000229	1.31E-05	7.69E-05
F19	Ortalama	-3.85585	-3.85495	-3.86103	-3.85387	-3.85573	-3.85792	-3.85363	-3.84484	-3.85916	-3.85075
	En iyi	-3.86276	-3.86277	-3.86278	-3.86276	-3.86278	-3.86278	-3.86277	-3.86278	-3.86278	-3.86278
	En kötü	-3.80436	-3.80011	-3.85451	-3.75474	-3.80015	-3.82468	-3.80388	-3.65089	-3.84891	-3.78768
	Std	0.013	0.01292	0.003048	0.019707	0.013858	0.00804	0.012995	0.040948	0.00396	0.018254
F20	Ortalama	-3.22566	-3.15183	-3.23632	-3.19426	-3.23724	-3.25612	-3.24569	-3.18916	-3.2601	-3.22107
	En iyi	-3.32156	-3.32168	-3.32188	-3.32129	-3.32135	-3.32176	-3.32171	-3.32164	-3.32191	-3.3217
	En kötü	-2.42939	-2.26652	-2.4317	-2.46714	-2.84029	-3.01864	-3.06387	-2.83944	-2.84034	-3.03241
	Std	0.173739	0.242728	0.169805	0.171658	0.11505	0.094401	0.08449	0.139671	0.115209	0.110376
F21	Ortalama	-7.42206	-8.94698	-9.00911	-8.43651	-8.55035	-7.51431	-8.0578	-8.13379	-8.02658	-7.41547
	En iyi	-10.1515	-10.1524	-10.151	-10.1513	-10.1516	-10.1529	-10.1529	-10.151	-10.1529	-10.1516
	En kötü	-2.62914	-2.62893	-2.63016	-5.05458	-4.30889	-2.6196	-2.62982	-2.6301	-2.62943	-2.62536
	Std	2.80024	2.272358	2.258972	2.432096	2.390105	2.919176	2.781862	2.603582	2.670877	2.794832
F22	Ortalama	-7.53775	-7.56449	-7.84435	-8.04937	-8.80017	-7.55782	-8.36714	-7.60727	-8.11075	-6.36868
	En iyi	-10.4026	-10.402	-10.4023	-10.4019	-10.3997	-10.401	-10.4011	-10.4004	-10.4028	-10.401
	En kötü	-2.76531	-0.90807	-1.83725	-2.76453	-2.76488	-1.83757	-0.92275	-2.76281	-3.72073	-1.83669
	Std	2.86563	3.105761	3.186819	2.78523	2.609057	3.166514	2.956128	2.854416	2.822177	3.243896
F23	Ortalama	-6.8092	-6.82368	-8.05033	-8.00614	-7.97517	-6.12579	-8.29989	-7.70814	-6.65433	-6.27879
	En iyi	-10.5358	-10.535	-10.5359	-10.5343	-10.5348	-10.536	-10.5313	-10.5347	-10.5355	-10.5358
	En kötü	-1.67461	-1.65587	-2.41996	-2.4209	-1.67647	-1.85922	-2.419	-1.67572	-1.859	-1.67627
	Std	3.214739	3.221156	3.586124	3.139058	3.224009	3.373005	2.926438	3.348764	3.372293	2.951336

KHBOA3 için 10 adet kaotik harita ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. KHBOA3 için kalite test fonksiyonları sonuçları

F	İ	Cebisev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F1	Ortalama	7.68E-74	7.73E-69	3.31E-44	1.99E-74	1.77E-73	3.69E-72	7.83E-71	1.11E-76	5.63E-68	7.54E-75
	En iyi	8.59E-87	2.41E-83	1.14E-54	1.56E-89	3.84E-84	3.01E-86	1.6E-84	6.09E-89	7.54E-83	4.19E-84
	En kötü	1.96E-72	2.32E-67	8.03E-43	2.53E-73	2.17E-72	1.1E-70	2.31E-69	3.15E-75	1.69E-66	2.01E-73
	Std	3.59E-73	4.23E-68	1.49E-43	5.74E-74	5.49E-73	2E-71	4.22E-70	5.74E-76	3.09E-67	3.66E-74
F2	Ortalama	1.34E-49	5.38E-49	2.04E-30	1.11E-50	6.88E-49	2.73E-50	5.91E-47	2.35E-56	4.84E-51	3.77E-51
	En iyi	1.73E-56	9.44E-56	8.68E-35	5.85E-59	4.81E-57	3.68E-57	4.2E-54	1.09E-68	7.71E-60	1.1E-56
	En kötü	3.5E-48	6.3E-48	1.68E-29	2.54E-49	1.97E-47	4.72E-49	1.07E-45	6.72E-55	6.4E-50	9.11E-50
	Std	6.38E-49	1.45E-48	4.02E-30	4.74E-50	3.59E-48	1.01E-49	2.04E-46	1.23E-55	1.27E-50	1.67E-50
F3	Ortalama	47175.38	41575.02	70556.16	48156.91	40452.08	44110.65	45839.53	43870.56	43691.49	42559.72
	En iyi	17380.46	6066.114	47149.31	22263.66	19487.2	18856.48	18967.84	16931.18	14619.53	17427.09
	En kötü	71004.95	75289.38	113507.9	79062.23	55339.68	69500.28	80687.03	79114.46	61834.11	69079.18
	Std	12722.8	17599.37	16944.11	13828.13	9505.83	11799.46	15613.56	14447.41	11658.7	12398.72
F4	Ortalama	53.02592	42.34057	21.68624	51.3708	52.64319	50.85399	47.33229	48.31296	43.52767	46.90641
	En iyi	0.001874	0.065946	0.005807	10.56032	4.160626	0.956124	0.222503	8.288038	1.023992	1.119067
	En kötü	89.97459	87.183	86.99769	88.58156	92.92286	88.71266	92.64177	82.66809	86.08985	86.42777
	Std	30.34166	30.25805	19.26073	24.95921	28.64201	28.77364	28.87061	26.2515	30.58574	29.33161
F5	Ortalama	27.95717	28.19574	0.657752	27.89723	27.88263	27.99527	28.02452	27.69832	28.01611	27.94046
	En iyi	26.90987	27.21827	0.026565	27.02064	27.20887	27.2273	27.28721	26.87848	27.01331	27.00437
	En kötü	28.72998	28.77285	3.012226	28.78187	28.75539	28.76058	28.7648	28.7833	28.79371	28.74688
	Std	0.493348	0.46883	0.720654	0.440704	0.435325	0.436793	0.413206	0.560984	0.514299	0.528081
F6	Ortalama	0.279765	0.415459	0.035329	0.414145	0.354892	0.34396	0.239048	0.75909	0.812136	0.39817
	En iyi	0.073767	0.106451	0.004746	0.101364	0.09568	0.130533	0.038209	0.153559	0.164107	0.08496
	En kötü	0.831807	0.970332	0.120477	0.980075	0.690688	0.730259	0.672734	1.473191	1.391701	0.66522
	Std	0.191764	0.215445	0.026418	0.210378	0.179195	0.171774	0.142141	0.302301	0.390869	0.181992
F7	Ortalama	0.002582	0.00531	0.003791	0.003699	0.003795	0.002943	0.003945	0.005061	0.006894	0.003893
	En iyi	0.000127	0.000116	5.09E-05	1.14E-05	4.56E-05	3.31E-05	0.000136	2.4E-05	9.35E-05	1.2E-05
	En kötü	0.0099	0.023988	0.01978	0.018164	0.019506	0.01714	0.019719	0.017812	0.025096	0.023789
	Std	0.002665	0.006464	0.004702	0.004637	0.00435	0.004149	0.005347	0.005501	0.007196	0.004914
F8	Ortalama	-11687.5	-9980.56	-12508.3	-11076.6	-11895.3	-9757.13	-11986.7	-9190.18	-8564.58	-11131.4
	En iyi	-12569.1	-12569	-12569.4	-12568.9	-12569.4	-12569.2	-12568.5	-12569.4	-11953.7	-12569.3
	En kötü	-8202.4	-8417.03	-11904.8	-7460.42	-8596.55	-6826.86	-8487.24	-7076.54	-6526.51	-7447.88
	Std	1335.494	1569.558	160.2498	1849.514	1197.36	1651.741	922.6559	1534.248	1126.674	1563.112
F9	Ortalama	5.68E-15	1.89E-15	0	1.89E-15	0	0	1.89E-15	1.89E-15	6.403844	2.652461
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	5.68E-14	5.68E-14	0	5.68E-14	0	0	5.68E-14	5.68E-14	159.6786	79.57384
	Std	1.73E-14	1.04E-14	0	1.04E-14	0	0	1.04E-14	1.04E-14	29.54781	14.52813
F10	Ortalama	4.2E-15	4.44E-15	4.8E-15	4.09E-15	3.73E-15	4.56E-15	4.09E-15	3.85E-15	4.2E-15	4.32E-15
	En iyi	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16
	En kötü	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15
	Std	2.46E-15	2.29E-15	2.7E-15	2.53E-15	2.54E-15	2.72E-15	2.35E-15	2.3E-15	2.63E-15	2.72E-15
F11	Ortalama	0.013781	0.017804	0	0.011816	0.012386	0.023827	0.01196	0.003353	0.005529	0.003813
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0.155767	0.328564	0	0.188852	0.221558	0.225135	0.20099	0.100588	0.104324	0.114387
	Std	0.042249	0.069654	0	0.045071	0.048063	0.063794	0.045866	0.018365	0.021777	0.020884
F12	Ortalama	0.018293	0.027149	0.003823	0.022165	0.017827	0.021491	0.017774	0.058908	0.058361	0.025432
	En iyi	0.006042	0.007178	0.001474	0.002792	0.003887	0.003287	0.003288	0.006685	0.018931	0.008375
	En kötü	0.087375	0.091238	0.012671	0.081143	0.054321	0.059288	0.100401	0.584142	0.542542	0.089917
	Std	0.015552	0.021974	0.002839	0.020457	0.013465	0.013159	0.019369	0.106292	0.096072	0.017529
F13	Ortalama	0.389728	0.529693	0.047	0.562727	0.403912	0.49642	0.284326	0.813529	1.017652	0.517347
	En iyi	0.11214	0.212688	0.000902	0.202148	0.114064	0.137517	0.065603	0.421269	0.312544	0.109856
	En kötü	1.145311	1.084507	0.121594	1.014917	0.952276	1.182467	1.12789	1.340201	1.788391	0.943616
	Std	0.227238	0.212933	0.031255	0.185125	0.187358	0.265791	0.228349	0.235488	0.355456	0.239574
F14	Ortalama	2.702648	2.827948	1.725424	2.111191	3.416869	2.178373	2.404608	4.628492	4.818041	2.602109
	En iyi	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004
	En kötü	10.76318	10.76318	5.928845	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	12.67051	10.76318
	Std	2.878245	3.372587	1.068007	2.577283	3.671609	2.466965	2.932385	3.758691	4.183728	2.97594
F15	Ortalama	0.000719	0.000652	0.000904	0.000664	0.000741	0.000789	0.000758	0.000554	0.000669	0.000651
	En iyi	0.000311	0.000308	0.000309	0.00031	0.00031	0.000308	0.000317	0.000309	0.000309	0.00031
	En kötü	0.002237	0.001838	0.00224	0.002252	0.002252	0.002217	0.002252	0.001568	0.002237	0.002252
	Std	0.000423	0.000398	0.000613	0.000518	0.000591	0.0005	0.000459	0.000236	0.000491	0.000402
F16	Ortalama	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En iyi	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En kötü	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	Std	1.12E-09	4.88E-09	8.98E-08	1.83E-09	2.73E-09	2.14E-09	1.62E-09	2.52E-10	1.63E-10	1.57E-09
F17	Ortalama	0.397902	0.397903	0.397989	0.397894	0.397895	0.397898	0.397899	0.397892	0.397892	0.397895
	En iyi	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887
	En kötü	0.39801	0.397987	0.398465	0.397949	0.397951	0.398026	0.398007	0.397929	0.397916	0.397935
	Std	3.35E-05	2.37E-05	0.000142	1.34E-05	1.34E-05	2.64E-05	8.87E-06	7.36E-06	1.29E-05	
F18	Ortalama	3.000163	3.000053	3.000029	3.000031	3.000032	3.000073	3.902686	3.000387	3.000151	3.000092
	En iyi	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	En kötü	3.003219	3.000459	3.000709	3.000396	3.000575	3.000572	30.07961	3.010524	3.001727	3.001217
	Std	0.000589	9.32E-05	0.000129	7.54E-05	0.000105	0.000143	4.944031	0.001915	0.000323	0.000229
F19	Ortalama	-3.85251	-3.85313	-3.85102	-3.85725	-3.85247	-3.85914	-3.85342	-3.85412	-3.85063	-3.85405
	En iyi	-3.86274	-3.86276	-3.86274	-3.86276	-3.86278	-3.86278	-3.86278	-3.86278	-3.86278	-3.86274
	En kötü	-3.75909	-3.79395	-3.74787	-3.83655	-3.8216	-3.84618	-3.78946	-3.74286	-3.78183	-3.80619
	Std	0.021493	0.014097	0.024759	0.007	0.012465	0.003896	0.017831	0.022041	0.01705	0.0135

Tablo 4.3. KHBOA3 için kalite test fonksiyonları sonuçları (devamı)

F	İ	Çebişev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F20	Ortalama	-3.22917	-3.20827	-3.22894	-3.27617	-3.2294	-3.25737	-3.2253	-3.19861	-3.20164	-3.21572
	En iyi	-3.32161	-3.32184	-3.32147	-3.32179	-3.32192	-3.32155	-3.32181	-3.32184	-3.32195	-3.32187
	En kötü	-2.96896	-2.83101	-2.83573	-3.0857	-2.4283	-3.0048	-2.95221	-2.84054	-3.03441	-2.84036
	Std	0.106626	0.12997	0.121131	0.075623	0.174775	0.09436	0.104201	0.119187	0.089582	0.134994
F21	Ortalama	-9.16272	-7.76598	-10.1097	-9.27101	-8.98591	-8.20399	-9.5766	-8.24965	-7.60794	-7.76442
	En iyi	-10.1528	-10.1524	-10.1532	-10.152	-10.1511	-10.1528	-10.1517	-10.1528	-10.1531	-10.1526
	En kötü	-2.62815	-2.62076	-9.94773	-2.62159	-0.88199	-2.62713	-2.62773	-4.13832	-2.63001	-2.62587
	Std	2.136043	2.806641	0.043882	2.215461	2.692932	3.068455	1.904832	2.541985	2.82138	3.014113
F22	Ortalama	-8.99659	-6.53625	-10.3483	-8.03312	-9.00267	-8.31135	-9.26573	-8.32235	-7.64017	-7.23526
	En iyi	-10.4017	-10.4005	-10.4016	-10.4013	-10.4011	-10.4016	-10.4028	-10.4029	-10.4029	-10.4017
	En kötü	-2.74121	-2.76342	-10.129	-1.83697	-1.8375	-2.76452	-2.7533	-2.76539	-1.83755	-1.83384
	Std	2.824143	2.714383	0.059659	3.12893	2.846605	2.698587	2.579324	2.806715	3.076537	3.175602
F23	Ortalama	-9.06963	-6.6085	-10.503	-7.05102	-9.43828	-6.6254	-8.97364	-5.84182	-5.77378	-6.99029
	En iyi	-10.5358	-10.5355	-10.5361	-10.5347	-10.5361	-10.5356	-10.5361	-10.5358	-10.5361	-10.5352
	En kötü	-1.8563	-1.66094	-10.4254	-1.67496	-2.42668	-1.85886	-1.67446	-1.67651	-1.67654	-2.42082
	Std	2.865331	3.380206	0.029907	3.691914	2.479711	3.175232	3.160835	3.286046	3.125035	3.251433

KHBOA4 için 10 adet kaotik harita ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. KHBOA4 için kalite test fonksiyonları sonuçları

F	İ	Çebişev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F1	Ortalama	7.56E-73	5.05E-70	1.75E-62	2.26E-74	3.35E-75	3.08E-73	8.11E-71	1.47E-66	2.62E-41	1.32E-73
	En iyi	4.4E-85	1.02E-82	1.3E-73	5.39E-89	2.56E-87	1.71E-87	3.04E-88	3.95E-83	4.75E-51	1.79E-90
	En kötü	2.24E-71	1.51E-68	4.8E-61	6.66E-73	7.07E-74	8.47E-72	2.42E-69	2.54E-65	7.85E-40	2.04E-72
	Std	4.09E-72	2.76E-69	8.76E-62	1.22E-73	1.35E-74	1.54E-72	4.41E-70	5.66E-66	1.43E-40	4.3E-73
F2	Ortalama	3.35E-51	8.68E-50	8.17E-40	4.61E-49	1.95E-50	7.94E-51	1.41E-51	3.36E-48	2.04E-35	3.86E-50
	En iyi	7.82E-59	8.27E-57	3.08E-45	5.14E-58	6.33E-57	2.52E-57	3.24E-58	2.74E-55	3.96E-43	5.01E-57
	En kötü	6.16E-50	1.36E-48	2.15E-38	1.34E-47	5.39E-49	1.9E-49	1.25E-50	6.84E-47	5.53E-34	1.14E-48
	Std	1.16E-50	2.64E-49	3.92E-39	2.44E-48	9.83E-50	3.47E-50	3.33E-51	1.3E-47	1.01E-34	2.08E-49
F3	Ortalama	41176.24	53947.67	52348.53	42622.96	50688.31	46860.76	44232.87	42075.74	51241.62	43483.57
	En iyi	23964.71	14756.25	14921.7	16951.44	28501.62	13879.76	12810.01	13394.8	19325.27	27891.53
	En kötü	65272.98	86238.63	95391.99	65297.64	73898.72	71178.79	80925.44	62868.78	87521.57	72172.61
	Std	11529.72	17683.32	14840.27	14200.27	12048.01	13512.8	15818.27	12219.94	14096.35	10283.29
F4	Ortalama	54.14009	13.57438	7.051643	58.98537	43.96968	59.44644	42.73604	69.95293	79.89797	45.81519
	En iyi	2.41E-05	2.63E-06	2.52E-12	4.39573	2.090165	0.028301	0.02099	25.88297	62.84956	0.014216
	En kötü	91.65749	71.70452	76.60286	89.88423	80.93819	89.70992	85.73972	91.32865	93.0662	88.64245
	Std	30.30847	19.83472	17.60845	24.27901	23.15337	27.22311	32.14731	20.04028	7.816244	27.03032
F5	Ortalama	27.94228	28.05399	28.31536	27.82501	27.99879	28.07148	27.99099	28.02394	28.23113	28.04822
	En iyi	27.06197	27.23673	27.89296	27.04163	26.99285	27.3846	27.4268	27.28108	27.224	27.25598
	En kötü	28.74382	28.7487	28.76056	28.7688	28.77958	28.75677	28.75814	28.74613	28.8114	28.77342
	Std	0.510344	0.454677	0.317739	0.47319	0.557435	0.463231	0.382436	0.399886	0.457571	0.378956
F6	Ortalama	0.407669	0.335235	0.272684	0.464709	0.43841	0.361983	0.316554	0.679767	1.089805	0.460523
	En iyi	0.070527	0.140022	0.108129	0.139719	0.039889	0.107275	0.087058	0.097263	0.386877	0.135139
	En kötü	1.037623	0.755468	0.589835	1.02571	1.446774	1.083743	0.90104	1.462017	2.141922	1.391787
	Std	0.227269	0.174752	0.10618	0.270823	0.302224	0.197394	0.200168	0.343365	0.46475	0.247012
F7	Ortalama	0.002935	0.003145	0.001448	0.005349	0.005111	0.004218	0.003454	0.007052	0.073202	0.002776
	En iyi	0.000175	2.64E-05	6.52E-05	6.94E-05	1.52E-05	0.0001	6.87E-05	1.18E-05	0.000527	0.000187
	En kötü	0.013631	0.016938	0.010054	0.019518	0.021682	0.021747	0.01917	0.037357	0.362527	0.007443
	Std	0.003056	0.004031	0.001995	0.005773	0.005909	0.005725	0.004695	0.008013	0.0912	0.002111
F8	Ortalama	-10048.8	-10033.9	-9577	-10759.1	-11094.5	-10429.4	-10309.7	-10509.2	-9572.09	-10779
	En iyi	-12567.1	-12569.4	-12566.8	-12569.4	-12569.4	-12568.4	-12567.4	-12567.5	-12569.5	-12569.5
	En kötü	-6660.09	-7673.87	-7719.46	-8454.09	-7828.31	-7804.57	-7886.4	-7473.35	-6520.02	-8369.5
	Std	1864.751	1751.633	1522.561	1675.045	1639.962	1751.388	1776.237	1727.946	1907.523	1578.982
F9	Ortalama	0	1.89E-15	1.89E-15	1.89E-15	3.79E-15	0	1.89E-15	3.951842	29.33802	0
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0	5.68E-14	5.68E-14	5.68E-14	5.68E-14	0	5.68E-14	118.5553	218.8758	0
	Std	0	1.04E-14	1.04E-14	1.04E-14	1.44E-14	0	1.04E-14	21.64513	64.39498	0
F10	Ortalama	4.44E-15	4.09E-15	3.85E-15	4.44E-15	3.97E-15	4.2E-15	4.44E-15	4.09E-15	0.619003	4.32E-15
	En iyi	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16
	En kötü	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	1.51E-14	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	18.57009	7.99E-15
	Std	2.09E-15	2.35E-15	2.65E-15	3.23E-15	2.59E-15	2.27E-15	2.64E-15	2.53E-15	3.390418	2.87E-15
F11	Ortalama	0.017587	0.005835	0.024616	0.008157	0	0.012316	0.017873	0.004921	0.012617	0
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0.310283	0.175061	0.392653	0.130658	0	0.142173	0.246053	0.147617	0.378515	0
	Std	0.068034	0.031962	0.09388	0.031118	0	0.037854	0.057006	0.026951	0.069107	0

Tablo 4.4. KHBOA4 için kalite test fonksiyonları sonuçları (devamı)

F	İ	Çebişev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F12	Ortalama	0.019096	0.017673	0.01432	0.03776	0.019684	0.033394	0.018964	0.049671	0.731682	0.029534
	En iyi	0.004256	0.007042	0.006474	0.003444	0.004275	0.005038	0.004631	0.014244	0.020766	0.006754
	En kötü	0.066629	0.047869	0.042126	0.26508	0.055921	0.435819	0.056295	0.187149	19.12423	0.228548
	Std	0.012714	0.009388	0.009518	0.046809	0.013399	0.077258	0.014209	0.034725	3.475777	0.040735
F13	Ortalama	0.541669	0.380241	0.231999	0.743329	0.667395	0.499012	0.43941	0.910473	2.787466	0.547394
	En iyi	0.19398	0.123052	0.105685	0.18718	0.09963	0.07788	0.139508	0.424142	0.329591	0.144232
	En kötü	1.333789	0.711559	0.61242	1.412994	1.468943	0.992686	1.071414	1.783112	25.55497	1.264446
	Std	0.301845	0.163399	0.117228	0.338525	0.367328	0.214166	0.209939	0.419555	6.071862	0.279089
F14	Ortalama	2.669023	2.795205	1.26166	3.742719	3.549486	3.154496	3.062054	2.92813	6.292648	2.766465
	En iyi	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004
	En kötü	10.76318	10.76318	5.928845	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	20.15349	10.76318
	Std	2.892687	3.355761	0.967623	3.816169	3.550366	3.575347	3.097092	3.269321	5.461103	3.02013
F15	Ortalama	0.000569	0.000648	0.000921	0.000535	0.000762	0.000679	0.00062	0.000775	0.001518	0.000637
	En iyi	0.000308	0.000311	0.000316	0.000313	0.000315	0.000315	0.000308	0.00031	0.000307	0.000308
	En kötü	0.001542	0.001585	0.002252	0.001538	0.002252	0.002188	0.001691	0.003962	0.019091	0.002252
	Std	0.000297	0.000342	0.000615	0.000241	0.000541	0.000443	0.000396	0.000726	0.003619	0.000362
F16	Ortalama	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En iyi	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En kötü	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	Std	1.09E-09	4.38E-09	1.61E-07	2.41E-09	3.85E-09	2E-09	2.62E-09	2.76E-11	2.02E-14	9.32E-10
F17	Ortalama	0.397893	0.397983	0.398036	0.397892	0.397897	0.397897	0.397894	0.39789	0.397887	0.397899
	En iyi	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887
	En kötü	0.39793	0.399489	0.398606	0.397936	0.398009	0.398074	0.397916	0.397939	0.397887	0.397986
	Std	8.9E-06	0.000292	0.000203	1.07E-05	2.24E-05	3.39E-05	9.07E-06	9.44E-06	4.01E-10	2.27E-05
F18	Ortalama	3.000096	3.00016	3.000131	3.000085	3.000022	3.000065	3.000077	3.900054	8.400007	3.000064
	En iyi	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	En kötü	3.001395	3.001606	3.001026	3.001259	3.000155	3.000484	3.000698	30.00005	30.0001	3.000588
	Std	0.000268	0.000334	0.000257	0.000235	3.99E-05	0.000123	0.00016	4.929503	10.98464	0.000136
F19	Ortalama	-3.85205	-3.85426	-3.85407	-3.85622	-3.85757	-3.85648	-3.85545	-3.85729	-3.83701	-3.85643
	En iyi	-3.86277	-3.86278	-3.86275	-3.86278	-3.86278	-3.86277	-3.86276	-3.86277	-3.86277	-3.86278
	En kötü	-3.71003	-3.76589	-3.80503	-3.823	-3.82182	-3.80496	-3.82707	-3.82219	-3.08976	-3.80707
	Std	0.027485	0.018994	0.011855	0.008383	0.008051	0.010833	0.00996	0.00804	0.141132	0.010668
F20	Ortalama	-3.23234	-3.19437	-3.21223	-3.18421	-3.2381	-3.20501	-3.20045	-3.20325	-3.25538	-3.23434
	En iyi	-3.32197	-3.32185	-3.32009	-3.32179	-3.321	-3.32161	-3.32159	-3.32172	-3.32199	-3.32035
	En kötü	-3.06913	-2.8375	-3.01801	-2.84283	-2.83972	-1.84023	-2.95977	-2.8404	-3.02884	-3.01557
	Std	0.093431	0.126217	0.106262	0.116988	0.116342	0.280448	0.099648	0.130876	0.083859	0.096164
F21	Ortalama	-7.85174	-7.16961	-8.14728	-8.10957	-7.69007	-7.57927	-8.5239	-7.42437	-7.70987	-8.86296
	En iyi	-10.1519	-10.1518	-10.146	-10.1523	-10.1506	-10.1487	-10.1512	-10.1532	-10.1532	-10.1514
	En kötü	-2.62937	-2.62397	-4.93502	-5.05493	-2.62868	-2.62702	-2.62851	-2.63045	-2.63041	-2.62908
	Std	2.68894	2.718068	2.411792	2.536592	2.922899	2.795684	2.525698	3.014075	3.139241	2.368771
F22	Ortalama	-7.77917	-6.93202	-6.57668	-7.65237	-8.04304	-7.52873	-7.61673	-7.21715	-7.04122	-7.54591
	En iyi	-10.4027	-10.3974	-10.3649	-10.4028	-10.4023	-10.4022	-10.4026	-10.4029	-10.4029	-10.4011
	En kötü	-1.83715	-2.7646	-1.82562	-1.83637	-3.72388	-1.83756	-2.75894	-1.83749	-1.83759	-2.76375
	Std	3.057734	2.667734	2.651305	3.51153	2.73321	3.14298	2.798162	3.322355	3.478475	2.877854
F23	Ortalama	-6.67092	-7.46477	-7.67538	-8.12324	-7.93509	-7.66696	-7.71448	-6.21961	-6.02929	-7.7836
	En iyi	-10.5352	-10.5271	-10.5111	-10.5352	-10.5341	-10.5354	-10.5312	-10.5362	-10.5364	-10.5331
	En kötü	-2.42087	-2.79588	-2.4036	-1.85852	-1.67594	-1.67602	-2.41983	-1.67646	-2.47642	-2.42153
	Std	3.110264	3.021853	3.022066	3.33175	3.311695	3.417701	3.334468	3.482457	3.600242	3.217332

KHBOA5 için 10 adet kaotik harita ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. KHBOA5 için kalite test fonksiyonları sonuçları

F	İ	Çebişev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F1	Ortalama	6.61E-75	9.14E-73	8.06E-73	7.1E-73	3.18E-75	1.33E-74	1.26E-71	4.43E-73	1.21E-71	3.58E-74
	En iyi	9.22E-85	3.2E-90	1.16E-90	2.78E-84	1.77E-84	2.31E-85	5.22E-84	9.99E-87	3.36E-89	1.04E-83
	En kötü	8.88E-74	1.66E-71	2.26E-71	1.5E-71	5.56E-74	3.48E-73	3.75E-70	9.29E-72	3.56E-70	7.82E-73
	Std	2.13E-74	3.54E-72	4.13E-72	2.78E-72	1.06E-74	6.35E-74	6.84E-71	1.75E-72	6.5E-71	1.49E-73
F2	Ortalama	7.87E-50	1.62E-50	8.8E-51	3.61E-51	7.37E-50	4.11E-51	9.72E-51	4.22E-50	1.33E-50	2.86E-50
	En iyi	1.61E-58	1.65E-57	1.94E-57	4.35E-56	2.6E-57	1.4E-57	1.38E-58	8.13E-57	1.93E-59	7.56E-57
	En kötü	1.98E-48	4.25E-49	1.28E-49	4.5E-50	1.05E-48	3.97E-50	2.42E-49	9.13E-49	1.66E-49	4.36E-49
	Std	3.63E-49	7.73E-50	2.84E-50	9.88E-51	2.37E-49	1.15E-50	4.41E-50	1.68E-49	3.63E-50	9.05E-50
F3	Ortalama	70529.09	41213.86	11348.01	45227.62	81384.51	35772.27	70236.13	87252.36	17882.33	33786.04
	En iyi	55499.99	27046.8	0.31961	33443.11	68855.89	27891	56341.57	9467.567	25.9175	25852.97
	En kötü	79971.96	59214.81	82216.65	61845.25	91789.93	45248.57	96370.76	108995.2	89204.33	42332.33
	Std	5858.558	6933.587	18274.87	7789.721	6324.605	4547.845	9322.069	17304.72	17351.97	4400.468
F4	Ortalama	58.00227	50.74394	4.732095	55.08262	43.90027	37.6693	63.25048	18.64073	21.97119	37.28495
	En iyi	0.031584	1.902373	9.21E-05	0.704285	1.280108	0.251161	0.33298	0.211963	0.234864	0.980029
	En kötü	96.59139	93.8824	35.75507	89.77469	92.45228	85.31365	91.47926	41.78837	49.72307	73.75063
	Std	31.75719	30.05943	9.017003	27.0861	27.9411	27.31489	28.24704	14.30813	15.3139	19.89998

Tablo 4.5. KHBOA5 için kalite test fonksiyonları sonuçları (devamı)

F	İ	Cebisev	Çember	Gaus	İteratif	Lojistik	Parçalı	Sinüs	Singer	Sinüzoidal	Çadır
F5	Ortalama	27.96489	27.97014	27.98267	28.03871	27.93521	27.89205	27.87101	27.88329	28.00151	27.8814
	En iyi	27.05967	27.28194	27.04117	27.15964	26.90086	26.80048	27.11218	27.0769	27.16662	27.19144
	En kötü	28.75948	28.76422	28.79319	28.78123	28.77719	28.76705	28.75823	28.78363	28.75431	28.74375
	Std	0.489315	0.390364	0.436779	0.555421	0.542817	0.461185	0.436445	0.498227	0.48409	0.391433
F6	Ortalama	0.33994	0.4168	0.460154	0.425583	0.379227	0.4344	0.429763	0.338373	0.419733	0.354455
	En iyi	0.089528	0.059232	0.094165	0.048736	0.09708	0.077559	0.089806	0.040007	0.123449	0.081812
	En kötü	0.770935	0.983827	0.965377	0.887717	0.989279	1.046589	1.120435	0.909712	1.060537	0.813797
	Std	0.176745	0.25698	0.264883	0.185167	0.190814	0.249631	0.26744	0.199176	0.246791	0.195575
F7	Ortalama	0.002283	0.002333	0.002889	0.003125	0.002983	0.003312	0.003141	0.003127	0.004159	0.002677
	En iyi	8.03E-05	4.45E-05	7.8E-05	0.000217	0.000133	0.000281	6.46E-05	0.000141	0.000206	0.00012
	En kötü	0.010271	0.01619	0.013747	0.011272	0.014548	0.00834	0.024616	0.017937	0.021805	0.011786
	Std	0.002496	0.003359	0.003068	0.003118	0.003587	0.002223	0.00532	0.003696	0.005185	0.002832
F8	Ortalama	-9857.45	-10487.3	-10259.4	-10704.1	-10207.8	-9888.15	-9883.11	-10199.9	-10844.2	-10490.5
	En iyi	-12568.1	-12569.5	-12568.1	-12568.9	-12569.3	-12567	-12345.5	-12569.5	-12568.7	-12569.1
	En kötü	-7675.43	-7578.07	-7070.46	-7628.44	-6696.03	-6897.7	-7882.65	-7196.93	-6232.97	-8199.56
	Std	1729.142	1905.554	1791.967	1839.241	1894.555	1804.055	1477.111	2025.715	1715.581	1695.132
F9	Ortalama	0	0	1.89E-15	5.68E-15	1.89E-15	0	1.89E-15	1.89E-15	0	0
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0	0	5.68E-14	1.14E-13	5.68E-14	0	5.68E-14	5.68E-14	0	0
	Std	0	0	1.04E-14	2.29E-14	1.04E-14	0	1.04E-14	1.04E-14	0	0
F10	Ortalama	4.2E-15	4.44E-15	3.85E-15	3.85E-15	4.68E-15	4.91E-15	4.2E-15	4.32E-15	4.44E-15	3.85E-15
	En iyi	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16
	En kötü	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15
	Std	2.07E-15	2.29E-15	2.65E-15	2.65E-15	2.63E-15	1.8E-15	2.63E-15	2.55E-15	2.64E-15	2.65E-15
F11	Ortalama	0.007642	0.007226	0.013094	0.019115	0	0.008263	0.004709	0.007752	0	0.010101
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0.229251	0.108868	0.146451	0.252598	0	0.150376	0.141277	0.232549	0	0.161588
	Std	0.041855	0.027499	0.040116	0.059978	0	0.032202	0.025794	0.042457	0	0.038531
F12	Ortalama	0.019828	0.023558	0.028474	0.028818	0.029029	0.020655	0.024458	0.019843	0.018235	0.028283
	En iyi	0.006695	0.003029	0.002663	0.003288	0.004966	0.006016	0.004207	0.003729	0.001922	0.005596
	En kötü	0.08372	0.061122	0.124506	0.178289	0.186074	0.044727	0.081444	0.05615	0.041927	0.19349
	Std	0.015106	0.015157	0.030116	0.033781	0.033256	0.010867	0.019389	0.012526	0.009213	0.035219
F13	Ortalama	0.516898	0.524276	0.529959	0.587136	0.492222	0.476936	0.482202	0.544051	0.517412	0.531139
	En iyi	0.10727	0.103615	0.192385	0.071241	0.074724	0.168416	0.087358	0.123531	0.198777	0.15297
	En kötü	1.048525	1.072956	0.971867	1.051015	0.905327	1.161878	1.03145	1.055728	1.112066	1.228257
	Std	0.25996	0.265569	0.245626	0.261268	0.232632	0.236104	0.244168	0.20647	0.208144	0.270406
F14	Ortalama	3.091839	1.723102	3.127144	2.58024	5.369507	2.249425	5.427991	2.993878	3.642666	1.195503
	En iyi	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004
	En kötü	10.76318	5.928845	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	10.76318	5.928845
	Std	3.343201	1.553558	3.158828	1.791428	4.415173	1.888869	4.780453	3.279268	3.917749	0.912199
F15	Ortalama	0.000737	0.000631	0.000776	0.000547	0.00099	0.000604	0.000746	0.000685	0.000497	0.000514
	En iyi	0.000358	0.000308	0.00031	0.000308	0.000317	0.000311	0.000309	0.000308	0.000324	0.000308
	En kötü	0.001224	0.002176	0.002776	0.000782	0.002252	0.002252	0.002252	0.002252	0.000744	0.000723
	Std	0.000126	0.000319	0.000529	0.000143	0.000528	0.000466	0.000372	0.000331	0.000118	0.000112
F16	Ortalama	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En iyi	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En kötü	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	Std	1.86E-09	2.59E-09	4.45E-10	7E-10	4.6E-09	3.12E-09	3.42E-09	2.7E-09	2.28E-09	4.86E-10
F17	Ortalama	0.552639	0.552638	0.397895	0.397899	0.397903	0.397897	0.397892	0.397897	0.397894	0.397908
	En iyi	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887
	En kötü	5.040107	5.040107	0.397939	0.398059	0.398011	0.397943	0.397914	0.39797	0.397941	0.398174
	Std	0.847547	0.847548	1.3E-05	3.17E-05	3.13E-05	1.47E-05	7.24E-06	1.98E-05	1.6E-05	5.54E-05
F18	Ortalama	3.000029	3.000085	3.000054	3.000033	3.000045	3.000058	3.900504	3.90016	3.000065	3.900095
	En iyi	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	En kötü	3.00013	3.000814	3.000338	3.000393	3.000351	3.000297	30.01322	30.00345	3.000442	30.0006
	Std	3.5E-05	0.00016	9.03E-05	8.01E-05	7.22E-05	7.61E-05	4.931904	4.930124	9.78E-05	4.929598
F19	Ortalama	-3.85703	-3.85531	-2.96259	-3.85019	-3.85986	-3.85489	-3.8477	-3.8486	-3.85691	-3.85893
	En iyi	-3.86278	-3.86255	-3.86278	-3.86265	-3.86278	-3.86278	-3.86276	-3.86273	-3.86271	-3.86278
	En kötü	-3.82285	-3.83175	-0.87222	-3.78364	-3.8549	-3.83188	-3.75356	-3.72845	-3.83114	-3.85263
	Std	0.007948	0.007712	1.391865	0.017319	0.003266	0.008574	0.021846	0.02867	0.007892	0.003146
F20	Ortalama	-3.29797	-3.13273	-2.66813	-3.17283	-3.02747	-3.15702	-3.05795	-2.93069	-3.25721	-3.3179
	En iyi	-3.32181	-3.32186	-3.31907	-3.32006	-3.12995	-3.20239	-3.18488	-3.32179	-3.32164	-3.32192
	En kötü	-3.09617	-2.26793	-2.42877	-3.01251	-2.91848	-3.06382	-2.86583	-1.41184	-2.63797	-3.30591
	Std	0.060309	0.258272	0.367372	0.050591	0.06066	0.03946	0.05593	0.653592	0.160253	0.004204
F21	Ortalama	-7.41986	-6.74514	-6.46226	-5.05095	-9.28208	-9.97189	-7.4182	-8.87009	-9.11851	-6.54969
	En iyi	-10.1517	-10.1521	-10.1528	-10.1519	-10.1531	-10.1527	-10.1507	-10.152	-10.1514	-10.1457
	En kötü	-5.05286	-5.05249	-0.88098	-0.88199	-5.05456	-5.05434	-5.05271	-5.05461	-5.05468	-5.05404
	Std	2.571887	2.431542	2.823512	3.07987	1.922948	0.928858	2.570242	2.191436	2.666603	2.325492
F22	Ortalama	-7.72909	-6.96848	-4.62747	-5.99007	-10.0361	-8.55077	-5.84898	-9.68086	-8.52522	-6.67639
	En iyi	-10.4023	-10.3962	-10.4016	-10.4027	-10.4027	-10.4026	-10.4028	-10.4022	-10.402	-10.4027
	En kötü	-5.08728	-0.52243	-0.90807	-2.76167	-5.08749	-3.72403	-2.76534	-5.08692	-3.72399	-5.08617
	Std	2.686935	2.960681	3.431005	3.282656	1.345214	2.604161	2.123082	1.832586	2.597174	2.468983
F23	Ortalama	-7.63871	-8.00106	-4.04403	-6.19122	-9.79972	-8.94553	-7.45516	-9.54522	-8.98195	-8.16865
	En iyi	-10.5362	-10.5361	-10.5019	-10.5355	-10.536	-10.5358	-10.5363	-10.5349	-10.536	-10.5327
	En kötü	-5.12103	-5.1268	-0.94631	-2.41573	-5.1277	-2.42662	-5.12667	-2.80465	-2.41843	-5.12772
	Std	2.730331	2.733535	3.107519	3.553978	1.863707	2.692988	2.706796	2.253879	2.614319	2.704737

Tablo 4.1 - Tablo 4.5'te verilen sonuçlar incelenerek özet tablosu Tablo 4.6'da verilmiştir. Bu tabloda sütunlar BOA'nın kaotik versiyonlarını ve satırlar ise her bir kaotik haritanın diğerlerinden daha başarılı olduğu fonksiyonların isimlerini göstermektedir.

Tablo 4.6. Her kaotik algoritma için kaotik haritaların başarılı oldukları fonksiyonlar

	<i>KHBOA1</i>	<i>KHBOA2</i>	<i>KHBOA3</i>	<i>KHBOA4</i>	<i>KHBOA5</i>
<i>Çeşişev</i>	F6,F10,F18,F19	F7	F7	F3, F9	F7, F9, F17, F18
<i>Çember</i>	F1 - F5, F7	-	-	-	-
<i>Gaus</i>	F8, F16	F1, F2, F5, F9, F16, F17, F19 F21	F4-F6, F8, F9, F11-F14, F16-F18, F21-F23	F4, F6, F7, F10, F12-F14, F16, F17	F3, F4, F10
<i>İteratif</i>	F15	-	F20	F5, F15, F23	F2
<i>Lojistik</i>	F9, F11, F22	F22	F3, F10	F1, F8, F11, F18, F19, F22	F1, F11, F16, F19, F22, F23
<i>Parçalı</i>	-	F15	F19	-	F13, F21
<i>Sinüs</i>	F13, F14, F21, F23	F8, F10, F11, F12, F23	-	F2	F5
<i>Singer</i>	F12	F4, F13	F1, F2, F15	-	F6
<i>Sinuzoidal</i>	F17	F6, F18, F20	-	F20	F8, F12, F15
<i>Çadır</i>	F20	F3, F14	-	F21	F14, F20

Kaotik algoritmaların ayrı ayrı incelenmesi ile elde edilen gözlemler şu şekildedir;

KHBOA1: Bu algoritmada çember harita 23 fonksiyonun altı tanesinde daha iyi sonuç vererek diğer haritalardan daha başarılı olmuştur. Bu altı fonksiyonun da tek modlu fonksiyon olmasından dolayı KHBOA1 için çember haritanın tek modlu fonksiyonlarda gayet başarılı olduğu söylenebilir. Çok modlu fonksiyonlarda dört fonksiyonla en iyi kaotik harita sinüs harita olmuştur.

KHBOA2: Bu algoritmada gaus harita kullanan algoritma sekiz fonksiyonda diğerlerinden daha optimum değerlere ulaşarak en iyi kaotik harita olmuştur.

KHBOA3: Bu algoritmada gaus harita 15 fonksiyonda diğer kaotik haritalardan daha iyi sonuca ulaşarak bu algoritma için en iyi kaotik harita olmuştur.

KHBOA4: Gaus harita dokuz fonksiyonda diğer kaotik haritalardan daha iyi sonuca ulaşarak bu algoritma için en iyi kaotik harita olmuştur.

KHBOA5: Lojistik harita altı fonksiyonda daha iyi sonuca ulaşarak bu algoritma için en iyi kaotik harita olmuştur.

Tablo 4.6'daki fonksiyon sayısına göre başarılı olan kaotik haritaların kullanıldığı kaotik algoritmalar ile ve temel algoritma ile alınan sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 4.7'de verilmiştir. Tabloda kaotik algoritma isimlerinin altında hangi kaotik haritanın kullanıldığı yazmaktadır. Tablo 4.7'de ortalama değerler incelendiğinde;

KHBOA1'in iki fonksiyonda, KHBOA2'nin üç fonksiyonda, KHBOA3'ün 11 fonksiyonda, KHBOA4'ün üç fonksiyonda ve KHBOA5'in bir fonksiyonda diğer algoritmalarla göre başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca KHBOA2 ve KHBOA3 F9 fonksiyonunda, KHBOA2 ve KHBOA4 F10 fonksiyonunda, KHBOA3 ve KHBOA5 F11 fonksiyonunda aynı ortalama değere sahiptirler ve diğer algoritmalarından daha optimum sonuca ulaşmışlardır. Sonuç olarak, gaus harita kullanan KHBOA3 algoritması 11 fonksiyonda diğerlerine göre daha optimum sonuca ulaşarak en başarılı algoritma olmuştur.

Tablo 4.7. Başarılı kaotik algoritmalar ile temel algoritmanın karşılaştırmalı sonuçları

F	Istatistik	Temel Algoritma	KHBOA1 (Çember)	KHBOA2 (Gaus)	KHBOA3 (Gaus)	KHBOA4 (Gaus)	KHBOA5 (Lojistik)
F1	Ortalama	1.059E-69	6.51E-83	3.87E-92	3.31E-44	1.75E-62	3.18E-75
	En iyi	2.018E-85	2.63E-97	1.5E-109	1.14E-54	1.3E-73	1.77E-84
	En kötü	5.296E-68	1.74E-81	6.51E-91	8.03E-43	4.8E-61	5.56E-74
	Std	7.489E-69	3.19E-82	1.29E-91	1.49E-43	8.76E-62	1.06E-74
F2	Ortalama	1.2756E-50	8E-57	8.29E-63	2.04E-30	8.17E-40	7.37E-50
	En iyi	2.3876E-58	2.1E-63	1.22E-73	8.68E-35	3.08E-45	2.6E-57
	En kötü	2.8602E-49	1.95E-55	1.28E-61	1.68E-29	2.15E-38	1.05E-48
	Std	5.0675E-50	3.59E-56	2.67E-62	4.02E-30	3.92E-39	2.37E-49
F3	Ortalama	49081.7010	39927.8	58394.27	70556.16	52348.53	81384.51
	En iyi	20723.4497	13283.99	34604.26	47149.31	14921.7	68855.89
	En kötü	101365.611	57761.53	85478.25	113507.9	95391.99	91789.93
	Std	16849.4697	10305.22	13313.08	16944.11	14840.27	6324.605
F4	Ortalama	51.1163	43.75935	65.04983	21.68624	7.051643	43.90027
	En iyi	0.00451	0.070546	1.935475	0.005807	2.52E-12	1.280108
	En kötü	89.5215	87.8721	92.0798	86.99769	76.60286	92.45228
	Std	28.9977	29.49969	26.96377	19.26073	17.60845	27.9411
F5	Ortalama	28.1195	27.82043	27.91441	0.657752	28.31536	27.93521
	En iyi	27.1397	26.93402	27.16771	0.026565	27.89296	26.90086
	En kötü	28.7798	28.76742	28.77231	3.012226	28.76056	28.77719
	Std	0.4912	0.566168	0.487511	0.720654	0.317739	0.542817
F6	Ortalama	0.41129	0.637588	0.611853	0.035329	0.272684	0.379227
	En iyi	0.053468	0.226692	0.140825	0.004746	0.108129	0.09708
	En kötü	1.3303	1.208076	1.769884	0.120477	0.589835	0.989279
	Std	0.28541	0.228134	0.373463	0.026418	0.10618	0.190814
F7	Ortalama	0.003845	0.001732	0.001993	0.003791	0.001448	0.002983
	En iyi	2.05E-04	2.04E-06	5.84E-05	5.09E-05	6.52E-05	0.000133
	En kötü	0.034175	0.007822	0.008198	0.01978	0.010054	0.014548
	Std	0.0054157	0.001932	0.002009	0.004702	0.001995	0.003587
F8	Ortalama	-10374.76	-9823.08	-10621.8	-12508.3	-9577	-10207.8
	En iyi	-12569.439	-12568.1	-12560.2	-12569.4	-12566.8	-12569.3
	En kötü	-7243.0724	-6706.71	-7047.93	-11904.8	-7719.46	-6696.03
	Std	1819.3514	2327.316	1821.039	160.2498	1522.561	1894.555
F9	Ortalama	2.27E-15	2.976016	0	0	1.89E-15	1.89E-15
	En iyi	0	0	0	0	0	0
	En kötü	5.68E-14	89.28049	0	0	5.68E-14	5.68E-14
	Std	1.13E-14	16.30031	0	0	1.04E-14	1.04E-14

Tablo 4.7. Başarılı kaotik algoritmalar ile temel algoritmanın karşılaştırmalı sonuçları (devamı)

F	İstatistik	Temel Algoritma	KHBOA1 (Çember)	KHBOA2 (Gaus)	KHBOA3 (Gaus)	KHBOA4 (Gaus)	KHBOA5 (Lojistik)
F10	Ortalama	4.7962E-15	5.03E-15	3.85E-15	4.8E-15	3.85E-15	4.68E-15
	En iyi	8.8818E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16	8.88E-16
	En kötü	7.9936E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15	7.99E-15
	Std	2.5121E-15	2.3E-15	2.65E-15	2.7E-15	2.65E-15	2.63E-15
	Ortalama	0.0032259	0.002154	0.007732	0	0.024616	0
F11	En iyi	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0.16129	0.064606	0.231967	0	0.392653	0
	Std	0.02281	0.011795	0.042351	0	0.09388	0
F12	Ortalama	0.048549	0.03679	0.026527	0.003823	0.01432	0.029029
	En iyi	0.004413	0.014602	0.006075	0.001474	0.006474	0.004966
	En kötü	1.368900	0.103918	0.118041	0.012671	0.042126	0.186074
	Std	0.191000	0.021726	0.019833	0.002839	0.009518	0.033256
F13	Ortalama	0.56822	0.850418	0.680842	0.047	0.231999	0.492222
	En iyi	0.058122	0.190589	0.249034	0.000902	0.105685	0.074724
	En kötü	1.1896	1.737976	1.430073	0.121594	0.61242	0.905327
	Std	0.24793	0.362164	0.293271	0.031255	0.117228	0.232632
F14	Ortalama	3.3877	4.520974	3.187761	1.725424	1.26166	5.369507
	En iyi	0.998	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004	0.998004
	En kötü	10.7632	15.50382	10.76318	5.928845	5.928845	10.76318
	Std	3.7997	4.338919	3.549763	1.068007	0.967623	4.415173
F15	Ortalama	0.00085463	0.000612	0.000816	0.000904	0.000921	0.00099
	En iyi	0.00030914	0.000314	0.000308	0.000309	0.000316	0.000317
	En kötü	0.010872	0.002053	0.002192	0.00224	0.002252	0.002252
	Std	0.0015656	0.000405	0.000578	0.000613	0.000615	0.000528
F16	Ortalama	-1.0316	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En iyi	-1.0316	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	En kötü	-1.0316	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163	-1.03163
	Std	1.030E-09	1.24E-09	6.01E-08	8.98E-08	1.61E-07	4.6E-09
F17	Ortalama	0.39797	0.397894	0.397913	0.397989	0.398036	0.397903
	En iyi	0.39794	0.397974	0.398054	0.398465	0.398606	0.398011
	En kötü	0.39789	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887	0.397887
	Std	1.18E-05	1.59E-05	4.27E-05	0.000142	0.000203	3.13E-05
F18	Ortalama	3.0001	3.902106	3.000258	3.000029	3.000131	3.000045
	En iyi	3	3	3	3	3	3
	En kötü	3.0012	30.05766	3.002037	3.000709	3.001026	3.000351
	Std	0.0003	4.939995	0.000526	0.000129	0.000257	7.22E-05
F19	Ortalama	-3.8561	-3.85096	-3.86103	-3.85102	-3.85407	-3.85986
	En iyi	-3.8628	-3.86278	-3.86278	-3.86274	-3.86275	-3.86278
	En kötü	-3.8218	-3.71435	-3.85451	-3.74787	-3.80503	-3.8549
	Std	0.0094423	0.030052	0.003048	0.024759	0.011855	0.003266
F20	Ortalama	-3.2297	-3.21532	-3.23632	-3.22894	-3.21223	-3.02747
	En iyi	-3.3219	-3.32183	-3.32188	-3.32147	-3.32009	-3.12995
	En kötü	-2.8395	-2.9824	-2.4317	-2.83573	-3.01801	-2.91848
	Std	0.10698	0.11481	0.169805	0.121131	0.106262	0.06066
F21	Ortalama	-8.0564	-7.83879	-9.00911	-10.1097	-8.14728	-9.28208
	En iyi	-10.1525	-10.1514	-10.151	-10.1532	-10.146	-10.1531
	En kötü	-2.6286	-2.61449	-2.63016	-9.94773	-4.93502	-5.05456
	Std	2.7328	2.679396	2.258972	0.043882	2.411792	1.922948
F22	Ortalama	-7.124	-6.27133	-7.84435	-10.3483	-6.57668	-10.0361
	En iyi	-10.4029	-10.4012	-10.4023	-10.4016	-10.3649	-10.4027
	En kötü	-2.7638	-2.76322	-1.83725	-10.129	-1.82562	-5.08749
	Std	2.8983	2.854589	3.186819	0.059659	2.651305	1.345214
F23	Ortalama	-6.9931	-5.81699	-8.05033	-10.503	-7.67538	-9.79972
	En iyi	-10.5361	-10.5343	-10.5359	-10.5361	-10.5111	-10.536
	En kötü	-1.6756	-1.67608	-2.41996	-10.4254	-2.4036	-5.1277
	Std	3.2634	3.306109	3.586124	0.029907	3.022066	1.863707

Temel algoritma ile kaotik algoritmalar arasındaki farkların istatistiki anlamlılık düzeyini gözlemlemek amacıyla Wilcoxon işaretli sıralar testi uygulanmıştır. Bu test her bir kaotik versiyon için en iyi algoritma ile temel algoritma çiftleri arasında uygulanmıştır.

Sonuçlar Tablo 4.8’de verilmiştir. Tabloda p değeri anlamlılık düzeyini göstermektedir ve başarı ölçütümüz bu değerin 0.05’ten küçük olmasıdır. Ayrıca R^+ kaotik algoritmaların ve R^- ise temel algoritmanın rank toplamalarını göstermektedir.

Tablo 4.8. Wilcoxon işaretli sıralar testi karşılaştırma sonuçları

F	KHBOA1 / BOA			KHBOA2 / BOA			KHBOA3 / BOA			KHBOA4 / BOA			KHBOA5 / BOA		
	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-
F1	1.7344E-06	465	0	1.73E-06	465	0	1.7344E-06	0	465	2.8786E-06	5	460	0.0936756	151	314
F2	1.7344E-06	465	0	1.73E-06	465	0	1.7344E-06	0	465	1.7344E-06	0	465	0.3493456	187	278
F3	0.011079229	356	109	0.089718	150	315	0.00159270	79	386	0.7343253	216	249	6.9838E-06	451	14
F4	0.082206466	317	148	0.360039	188	277	0.00014773	417	48	2.1267E-06	463	2	2.6034E-06	461	4
F5	0.040702311	332	133	0.062683	323	142	1.7344E-06	465	0	0.17790739	167	298	0.1588555	301	164
F6	0.000615641	66	399	0.018519	118	347	1.7344E-06	465	0	0.19152211	296	169	0.1986102	170	295
F7	0.07190333	320	145	0.075213	319	146	0.82901304	243	222	0.00241470	380	85	0.6883593	252	213
F8	0.765519292	218	247	0.213358	293	172	3.8822E-06	457	8	0.33885616	186	279	0.3388562	279	186
F9	1	1	464	1	464	1	1	464	1	1	463.5	1.5	1	463.5	1.5
F10	0.844580221	110	355	0.051955	117	348	0.62023838	141.5	323.5	0.02870283	148	317	0.0777142	195	270
F11	0.75	4	461	1	3	462	0.5	3	462	0.5	4.5	460.5	0.8125	6	459
F12	0.010444401	108	357	0.338856	186	279	2.8786E-06	460	5	0.00385424	373	92	0.7970984	245	220
F13	0.001197338	75	390	0.047162	136	329	1.7344E-06	465	0	2.5968E-05	437	28	0.6288431	256	209
F14	0.001392727	70	395	0.125941	147	318	0.64822067	140.5	324.5	0.06966013	153.5	311.5	0.1210312	146	319
F15	0.991794564	232	233	0.253644	177	288	0.06871364	144	321	0.01656553	116	349	0.0544626	139	326
F16	1	0	465	1	0	465	1	0	465	1	0	465	1	0	465
F17	0.08026123	90	375	0.179067	85.5	379.5	0.00223556	432.5	32.5	0.00129088	23	442	0.3734131	105.5	359.5
F18	0.548159012	129	336	0.275758	47	418	0.00805665	361	104	0.68196156	105	360	0.2204717	102	363
F19	0.410597641	272.5	192.5	0.004382	371	94	0.83724368	227	238	0.73429149	216	249	0.0544498	139	326
F20	0.803618522	206	259	0.440522	270	195	0.94261052	236	229	0.38203417	190	275	1.7995E-05	24	441
F21	0.325186491	172	293	0.503833	265	200	0.15582529	301.5	163.5	0.12044473	157	308	0.0053197	97	368
F22	0.238597769	163	302	0.171377	299	166	0.00014767	417	48	0.22102158	173	292	0.0104445	108	357
F23	0.115608188	156	309	0.718888	250	215	0.0038533	373	92	0.7655193	218	247	9.7111E-05	43	422

Tablo 4.8’deki sonuçlara göre temel algoritma ve kaotik versiyonlar arasında %95 oranında anlamlı fark olan ve kaotik versiyonların başarılı olduğu fonksiyon sayıları şu şekildedir;

KHBOA1: Sekiz fonksiyonda anlamlı fark bulunmakta ve kaotik algoritma dört fonksiyonda sonucu iyileştirmiştir.

KHBOA2: Beş fonksiyonda anlamlı fark bulunmakta ve kaotik algoritma üç fonksiyonda sonucu iyileştirmiştir.

KHBOA3: 13 fonksiyonda anlamlı fark bulunmakta ve kaotik algoritma dokuz fonksiyonda sonucu iyileştirmiştir.

KHBOA4: Dokuz fonksiyonda anlamlı fark bulunmakta ve kaotik algoritma dört fonksiyonda sonucu iyileştirmiştir.

KHBOA5: Altı fonksiyonda anlamlı fark bulunmakta ve kaotik algoritma iki fonksiyonda sonucu iyileştirmiştir.

Bu sonuçlara göre gaus harita kullanan KHBOA3 diğer algoritmalarından daha iyi başarı göstermiştir ve en iyi algoritma olduğu kesin olarak söylenebilir.

4.3.2. Mühendislik Problemleri ile Yapılan Deneyler

Kaotik algoritmalar ile temel algoritma Basıncılı kap tasarım problemi ve yay germe / sıkıştırma problemi üzerinde test edilerek karşılaştırılmıştır. Bu problemler için performans ölçtüğümüz algoritmaların problem maliyetlerini minimize etmesidir. Testlerde her algoritma 10000 iterasyon ve 200 popülasyon ile 30’ar kez bağımsız olarak çalıştırılarak alınan en iyi sonuçlar karşılaştırma için kullanılmıştır. Kısıtları kontrol etmek için ceza metodu kullanılmıştır.

Basıncılı kap tasarım problemi için elde edilen en iyi sonuçlar Tablo 4.9’da verilmiştir. Bu sonuçlara göre basıncılı kap tasarım problemi için en düşük maliyet KHBOA2’ye aittir ancak kısıtları ihlal etmiştir. Bu nedenle en düşük maliyet KHBOA1’e ve en yüksek maliyet KHBO4’e aittir.

Tablo 4.9. Basıncılı kap tasarım problemi test sonuçları

Algoritma	Optimum değişkenler				Optimum Maliyet
	T_s	T_h	R	L	
BOA	0.779933	0.3926534	40.37387	199.2462	5914.0175
KHBOA1	0.786231983	0.390291907	40.69287042	194.8685084	5910.05728
KHBOA2	0.783293664	0.388630615	40.58501735	196.3381549	5898.41182
KHBOA3	0.784939133	0.390117857	40.53583612	197.0118408	5921.17975
KHBOA4	0.783329177	0.396571946	40.57489151	196.4766945	5923.26348
KHBOA5	0.779308112	0.389283992	40.32473625	199.9287726	5906.30632

Yay germe / sıkıştırma problemi için elde edilen en iyi sonuçlar Tablo 4.10’da verilmiştir. Sonuçlara göre en düşük maliyet temel algoritmaya ve en yüksek maliyetler, aynı sonucu veren KHBOA2 ve KHBOA3’e aittir. Ancak bütün algoritmalar bir problem kısıtını ihlal etmişlerdir.

Tablo 4.10. Yay germe / sıkıştırma problemi test sonuçları

Algoritma	Optimum değişkenler			Optimum Maliyet
	w	d	L	
BOA	0.0516384	0.3555	11.3607	0.012665
KHBOA1	0.051502	0.35224	11.55641	0.012666
KHBOA2	0.052263	0.370672	10.51544	0.012671
KHBOA3	0.052259	0.370586	10.51992	0.012671
KHBOA4	0.051273	0.346795	11.89549	0.012669
KHBOA5	0.051497	0.352125	11.56342	0.012666

Mühendislik problemleri için alınan sonuçlar arasında anlamlı fark olup olmadığını gözlemlemek için Wilcoxon işaretli sıralar testi her bir kaotik algoritma ve temel algoritma arasında uygulanmıştır. Sonuçlar Tablo 4.11’de verilmiştir. Tabloda p değerleri incelendiğinde sonuçlar arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir.

Tablo 4.11. Mühendislik problemleri için Wilcoxon işaretli sıralar test sonuçları (M: mühendislik problemi, M1: basınçlı kap tasarım problemi, M2: yay germe / sıkıştırma problemi)

M	KHBOA1 / BOA			KHBOA2 / BOA			KHBOA3 / BOA			KHBOA4 / BOA			KHBOA5 / BOA		
	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-	p	R^+	R^-
M1	0.08914	150	315	0.19706	170	295	0.39532	191	274	0.9124	227	238	0.12602	157	307
M2	0.17702	167	298	0.42952	194	271	0.09296	314	151	0.07508	319	146	0.30772	282	183

4.4. Bulgular ve Tartışma

Bu kısımda kaotik haritalar incelenerek BOA’nın beş farklı kaotik versiyonu önerilmiştir. Ayrıca kaotik haritaların optimizasyon algoritması üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için de 10 farklı kaotik harita her bir kaotik versiyon üzerinde ayrı ayrı test edilmiştir. Testlerde 23 adet kalite test fonksiyonu ve iki adet gerçek mühendislik problemi kullanılmıştır.

Kalite test fonksiyonları için yapılan deneylerde kaotik versiyonlar algoritmanın performansını arttırabilmiştir. En başarılı kaotik versiyon ise gauss kaotik harita kullanan ve 23 fonksiyonun 11 tanesinde diğerlerine göre daha iyi sonuçlara ulaşan KHBOA3 algoritması olmuştur. KHBOA3 ile temel algoritma arasında yapılan Wilcoxon işaretli sıralar test sonuçlarına göre 13/23 fonksiyonda anlamlı fark gözlenmiştir. Bu fonksiyonların dokuz tanesinde KHBOA3 ve dört tanesinde temel algoritma daha başarılı olmuştur. Mühendislik problemleri için yapılan deneylerde, basınçlı kap tasarım problemi için KHBOA1 en iyi sonuca ulaşmıştır ama Wilcoxon işaretli sıralar testi ile yapılan deneylerde algoritmalar arasında anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Yay germe / sıkıştırma problemi için algoritmalar kısıtları ihlal etmişlerdir.

Sonuç olarak; kaotik haritalar algoritma performansını arttırmış ve lokal optimumdan kaçışı kolaylaştırmıştır. Ayrıca incelenen 10 adet kaotik harita içerisinde gauss harita algoritma performansını diğerlerinden daha fazla arttırabilmiştir.

5. META SEZGİSEL ALGORİTMALAR İÇİN SÜREKLİ ZAMANLI KAOTİK SİSTEMLER

2015'te Özkaynak "Kaos tabanlı evrim algoritmalarının performansını artırmak için yeni bir yöntem" isimli bir çalışma yayınlamıştır ve ilginç olabilecek bir takım sonuçlar ortaya koymuştur [52]. Özkaynak kaotik haritalar ve sürekli zamanlı kaotik sistemler kullanarak bir takım deneyler yapmış ve sürekli zamanlı kaotik sistemlerin daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Bu çalışmada temel amaç sezgisel algoritmaların performansını arttırmak için kullanılan kaotik haritaların yerine sürekli zamanlı kaotik sistemlerin kullanılmasının sonuçlarını incelemek ve aynı zamanda Özkaynak'ın iddiasını doğrulayabilmektir.

Tezin bu bölümünün özeti şu şekildedir;

- Özkaynak'ın çalışmasında önerilen rastgele sayı üretici (RSÜ) yaklaşımı optimizasyon problemlerine uygulanarak incelenmiştir.
- Optimizasyon algoritması olarak az sayıda kontrol parametresine sahip olması ve incelenen algoritmalar içerisinde en başarılı algoritma olması nedeniyle deneylerde BOA kullanılmıştır.
- Elde edilen sonuçlar optimizasyon alanında daha önce yapılan çalışmalara farklı bir bakış açısıyla yaklaşım imkânı sunmuştur. Kullanılan optimizasyon probleminin, kalite fonksiyonun ve optimizasyon parametrelerinin başarı üzerindeki etkisi üzerine çeşitli çıkarımlar yapma imkanı sunmuştur.
- Çalışma kaos tabanlı RSÜ yaklaşımların üzerine çeşitli sonuçlar ortaya koymuştur.

5.1. Sürekli Zamanlı Kaotik Sistemler

Özkaynak'ın çalışmasında, evrim algoritmalarında kullanılan birçok kaotik haritanın uniform dağılım göstermediği ve istatistiki testlerde başarısız olduğu deneysel sistemler ile gösterilmiştir. Ayrıca, bu soruna çözüm olarak dört farklı kaos tabanlı rastgele sayı üretici önermiştir. Önerilen yöntemlerin kaotik haritalardan daha iyi bir karakteristiğe sahip olduğu da deneysel olarak gösterilmiştir. Önerilen kaotik sistemler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Sürekli zaman kaotik sistemler [49]

Kaotik harita	Denklem	Başlangıç değerleri	Kontrol parametreleri
Chen system	$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = (c - a)x - xz + cy \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases}$		$(x_0, y_0, z_0) = (-3.2, 20)$ $a=35, b=3$ ve $c=28$
Chua circuit	$\begin{aligned} \frac{dV_{C1}}{dt} &= \frac{1}{C_1 R} (V_{C2} - V_{C1}) - f(V_{C1}) \\ \frac{dV_{C2}}{dt} &= \frac{1}{C_2 R} (V_{C1} - V_{C2}) - i_L \\ \frac{di_L}{dt} &= -\frac{V_{C2}}{L} \end{aligned}$	$1/L=25.58$	$1/C_1 R=15.6, 1/C_2 R=1,$ $a=-5/7$ ve $b=-8/7$
Lorenz system	$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a(y - x) \\ \frac{dy}{dt} &= (bx - xz) \\ \frac{dz}{dt} &= (xy - cz) \end{aligned}$	$-20 \leq x \leq 20,$ $-50 \leq y \leq 50$ $-50 \leq z \leq 50$	$a=10, b=28$ ve $c=8/3$
Van der Pol oscillator	$\begin{aligned} dx &= y \\ dy &= a \times (1 - x^2) \times \\ &\quad y - x^3 + b \times \cos(c \times z) \\ dz &= 1 \end{aligned}$	$x_0 = 0$ $y_0 = 0$ $z_0 = 0$	$a=0.2, b=5.8$ ve $c=3$

Bu çalışmada yapılan deneylerde Lorenz sistem kullanılmıştır. Lorenz sistem 1963 yılında meteorolog Ed Lorenz tarafından hidrodinamik sistemlerden ilham alınarak oluşturulan, belirli sınırlar içerisinde kaotik davranış sergileyen kaotik bir sistemdir [53]. Lorenz gibi sistemlerin kaotik davranış yetenekleri kontrol parametreleri değerlerinden oldukça etkilenmektedirler [54]. Bu nedenle deneylerde Özkaynak'ın çalışmasında ideal olarak belirlediği Tablo 5.1'de gösterilen kontrol parametreleri ve başlangıç değerleri kullanılmıştır. Önerilen sistem [0,256] aralığında değer üretmektedir ve deneylerde ihtiyaç duyulan aralığa dönüştürülerek kullanılmıştır.

5.2. Deneyler

Bu bölümdeki deneylerde BOA'nın kaotik harita kullanan versiyonları ile Lorenz sistem kullanan versiyonları karşılaştırılarak kaotik harita ile sürekli zamanlı kaotik sistemin algoritma üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bölüm 4'te oluşturulan kaotik BOA versiyonları aynı şekilde bu bölümde kullanılmıştır. Ek olarak algoritmalarındaki rastgele sayı üreteçleri olan kaotik haritalar yerine Lorenz sistem kullanılarak yeni algoritmalar oluşturulmuştur. Bundan sonraki kısımlarda Lorenz sistem kullanılan kaotik versiyonlar için "LSBOA" ifadesi kullanılmıştır.

Deneylerde Bölüm 3.1’de verilen kalite test fonksiyonları ve Bölüm 3.2’de verilen iki adet gerçek mühendislik problemi kullanılmıştır. Çalışmada amaç kaotik haritalar yerine sürekli zamanlı kaotik sistemlerin kullanımının algoritma üzerindeki etkisini incelemek olduğundan elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslanmamıştır.

5.2.1. Kalite Testi Fonksiyonları ile Yapılan Deneyler

Rastgele sayı üretici olarak Lorenz sistem kullanan algoritma versiyonları aynı şartlarda ve aynı başlangıç parametreleri ile 23 kalite test fonksiyonu üzerinde 500 iterasyon ile 30’ar kez çalıştırılmıştır. Lorenz sistem kullanılan algoritmalar ve temel algoritma sonuçları karşılaştırmalı olarak Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Tabloda her algoritma için 30 çalıştırmanın ardından alınan ortalama, en iyi, en kötü ve standart sapma (std) değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2. LSBOA versiyonları ve temel algoritmanın kalite test fonksiyonları sonuçları

F	İstatistik	Temel Algoritma	LSBOA1	LSBOA2	LSBOA3	LSBOA4	LSBOA5
F1	Ortalama	1.059E-69	2.43887E-72	1.93635E-71	3.92134E-73	2.13E-74	9.16643E-73
	En iyi	2.018E-85	1.49353E-85	3.46083E-87	1.1671E-82	5.39062E-84	6.14706E-86
	En kötü	5.296E-68	3.60487E-71	5.79632E-70	4.61817E-72	4.14306E-73	2.44359E-71
	Std	7.489E-69	8.88368E-72	1.05818E-70	1.01393E-72	7.6329E-74	4.46821E-72
F2	Ortalama	1.2756E-50	2.41775E-51	1.37001E-51	4.10061E-51	3.21E-51	3.42231E-51
	En iyi	2.3876E-58	1.36909E-56	7.52279E-58	3.90483E-57	1.12397E-58	2.24931E-56
	En kötü	2.8602E-49	4.27806E-50	2.19083E-50	6.77956E-50	2.45689E-50	9.39725E-50
	Std	5.0675E-50	8.08727E-51	4.38281E-51	1.40058E-50	7.25275E-51	1.71497E-50
F3	Ortalama	49081.7010	47038.376	46890.66641	47876.52251	47236.2914	43990.74977
	En iyi	20723.4497	16430.50071	16998.27243	23390.07244	20417.79373	34881.42497
	En kötü	101365.611	72489.48406	69811.76779	71699.65762	86622.89524	53106.3193
	Std	16849.4697	14394.05961	12752.15111	13853.78574	15969.23101	4576.741323
F4	Ortalama	51.1163	44.28442886	47.21019425	48.53677588	47.55344407	38.77348393
	En iyi	0.00451	1.80558819	0.002557829	0.152684307	0.208111939	0.027978002
	En kötü	89.5215	83.37940194	88.59311508	90.76516816	86.91536828	80.79421522
	Std	28.9977	26.52213868	29.48625383	28.61470074	30.07372816	24.88772153
F5	Ortalama	28.1195	27.98398833	27.95800136	28.01960114	27.98471407	27.97709947
	En iyi	27.1397	27.1738564	27.05366916	27.30128987	27.2975345	26.80450367
	En kötü	28.7798	28.76287381	28.78791071	28.75890038	28.76104276	28.78077542
	Std	0.4912	0.47194904	0.45471617	0.410015801	0.414756782	0.547913652
F6	Ortalama	0.41129	0.423944085	0.392869725	0.389015361	0.375774446	0.423592504
	En iyi	0.053468	0.127943114	0.119407838	0.103055663	0.063775863	0.101388471
	En kötü	1.3303	1.074861277	1.125493598	0.958523039	1.007610744	1.151167211
	Std	0.28541	0.201902441	0.240111618	0.211145696	0.21948585	0.24444902
F7	Ortalama	0.003845	0.003145441	0.00319366	0.005162472	0.004466886	0.002656777
	En iyi	2.05E-04	9.36571E-05	3.90192E-05	0.000184849	9.69098E-05	6.58824E-05
	En kötü	0.034175	0.011484675	0.013709429	0.032789808	0.017698022	0.008720747
	Std	0.0054157	0.003080876	0.003712189	0.006514744	0.004800934	0.002748643
F8	Ortalama	-10374.76	-10009.1763	-10424.668	-10392.6426	-10683.720	-11177.7231
	En iyi	-12569.439	-12569.4765	-12569.3241	-12568.7224	-12569.2579	-12568.9292
	En kötü	-7243.0724	-6902.33674	-7253.70824	-7486.50974	-8274.6881	-8289.47628
	Std	1819.3514	1861.724828	1994.022073	1847.782391	1707.757542	1464.662652
F9	Ortalama	2.27E-15	0	5.68434E-15	0	5.338475581	3.78956E-15
	En iyi	0	0	0	0	0	0
	En kötü	5.68E-14	0	5.68434E-14	0	160.1542674	1.13687E-13
	Std	1.13E-14	0	1.73446E-14	0	29.24003499	2.07563E-14

Tablo 5.2. LSBOA versiyonları ve temel algoritmanın kalite test fonksiyonları sonuçları (devamı)

F	İstatistik	Temel Algoritma	LSBOA1	LSBOA2	LSBOA3	LSBOA4	LSBOA5
F10	Ortalama	4.7962E-15	4.20404E-15	4.67774E-15	4.32247E-15	4.08562E-15	4.32247E-15
	En iyi	8.8818E-16	8.88178E-16	8.88178E-16	8.88178E-16	8.88178E-16	8.88178E-16
	En kötü	7.9936E-15	7.99361E-15	7.99361E-15	7.99361E-15	7.99361E-15	7.99361E-15
	Std	2.5121E-15	2.62787E-15	2.27261E-15	2.55225E-15	2.85287E-15	3.02083E-15
F11	Ortalama	0.0032259	3.70074E-18	0.011222393	0.010372063	0.015602781	0.012371607
	En iyi	0	0	0	0	0	0
	En kötü	0.16129	1.11022E-16	0.243525517	0.155943712	0.210367374	0.227588046
	Std	0.02281	2.02698E-17	0.047051931	0.039472267	0.049291741	0.048357198
F12	Ortalama	0.048549	0.022395121	0.037163946	0.026553951	0.021293021	0.022562354
	En iyi	0.004413	0.004209696	0.004864734	0.003491817	0.003780413	0.008826302
	En kötü	1.368900	0.158751271	0.354794363	0.097975298	0.057954853	0.067603706
	Std	0.191000	0.027627955	0.067622337	0.022601679	0.013364377	0.011568182
F13	Ortalama	0.56822	0.508607872	0.483049178	0.557298912	0.439022244	0.50552619
	En iyi	0.058122	0.099480995	0.112642278	0.153499448	0.105104507	0.117731656
	En kötü	1.1896	1.118329325	1.31241723	1.271055788	1.007333141	1.023881294
	Std	0.24793	0.246790914	0.280533522	0.279992998	0.266968968	0.272619611
F14	Ortalama	3.3877	2.211375364	3.22102769	2.956348674	2.829394697	4.069660708
	En iyi	0.998	0.998003838	0.998003838	0.998003838	0.998003838	0.998003838
	En kötü	10.7632	10.76318067	10.76318071	10.76318067	10.76318118	10.76318067
	Std	3.7997	2.471005111	3.523552809	3.617308832	3.260994424	3.900790093
F15	Ortalama	0.00085463	0.000607158	0.000615973	0.000722274	0.000806271	0.0006277
	En iyi	0.00030914	0.000309312	0.000308345	0.000310805	0.000308783	0.000308695
	En kötü	0.010872	0.002236898	0.001690221	0.002251949	0.002251949	0.001499314
	Std	0.0015656	0.000366561	0.000360784	0.00051105	0.00055845	0.000331382
F16	Ortalama	-1.0316	-1.03162846	-1.03162846	-1.03162846	-1.03162846	-1.03162846
	En iyi	-1.0316	-1.03162846	-1.03162846	-1.03162846	-1.03162846	-1.03162846
	En kötü	-1.0316	-1.03162845	-1.03162845	-1.03162844	-1.03162844	-1.03162845
	Std	1.030E-09	9.62404E-10	1.26329E-09	2.6298E-09	2.48344E-09	1.18369E-09
F17	Ortalama	0.39797	0.397893593	0.397891836	0.397902597	0.397893772	0.397893996
	En iyi	0.39794	0.397887358	0.397887358	0.397887358	0.397887358	0.397887358
	En kötü	0.39789	0.397925428	0.397913842	0.39805395	0.397926397	0.39791869
	Std	1.18E-05	9.9523E-06	6.82768E-06	3.33963E-05	9.90374E-06	8.60194E-06
F18	Ortalama	3.0001	3.000055519	3.000044952	3.000057971	3.000035873	3.000094361
	En iyi	3	3.000000001	3.000000059	3.000000002	3.000000425	3.000000097
	En kötü	3.0012	3.000341601	3.000394567	3.000470668	3.000244081	3.000724961
	Std	0.0003	9.00473E-05	9.62132E-05	0.000107592	6.31537E-05	0.000175439
F19	Ortalama	-3.8561	-3.85540694	-3.85438444	-3.85297694	-3.85802768	-3.86019755
	En iyi	-3.8628	-3.86277469	-3.86276891	-3.8627814	-3.86274694	-3.86274231
	En kötü	-3.8218	-3.82354384	-3.76650987	-3.81482309	-3.83671601	-3.85491624
	Std	0.0094423	0.010444657	0.017470023	0.013569326	0.005746985	0.002145369
F20	Ortalama	-3.2297	-3.22212016	-3.23885201	-3.23532475	-3.23329316	-3.31088914
	En iyi	-3.3219	-3.32185635	-3.32172880	-3.32186224	-3.32158888	-3.32175024
	En kötü	-2.8395	-2.60727399	-3.03244136	-2.84177799	-2.97249651	-3.08590307
	Std	0.10698	0.14086808	0.09795161	0.11905888	0.10800299	0.04258342
F21	Ortalama	-8.0564	-8.32068978	-8.77075953	-7.94983847	-9.04239515	-9.62769722
	En iyi	-10.1525	-10.1515192	-10.1526824	-10.1506313	-10.1516959	-10.1519993
	En kötü	-2.6286	-5.05469265	-5.05377603	-2.62598377	-2.62971393	-5.05447187
	Std	2.7328	2.42695719	2.27971261	3.01042267	2.27097433	1.55043578
F22	Ortalama	-7.124	-7.71980628	-7.09253675	-7.97366297	-7.33125705	-10.0257389
	En iyi	-10.4029	-10.4012094	-10.3998881	-10.4028439	-10.4016685	-10.4013177
	En kötü	-2.7638	-1.83718578	-1.83350722	-2.76524709	-1.83632040	-5.08685729
	Std	2.8983	3.39961043	3.25156861	3.06392128	3.19150318	1.34268453
F23	Ortalama	-6.9931	-7.13028855	-7.67451794	-8.20635181	-6.85290705	-9.07062690
	En iyi	-10.5361	-10.5359023	-10.5358338	-10.5354415	-10.5324715	-10.5350254
	En kötü	-1.6756	-1.67539558	-1.67499787	-1.85942461	-2.42148022	-5.12790755
	Std	3.2634	3.322543349	3.194303266	3.182456393	3.138257853	2.418723356

Tablo 5.2’de verilen kalite test fonksiyonları sonuçları incelendiğinde ortalama değerlere göre; Temel algoritma 2/23, LSBOA1 3/22, LSBOA2 2/23, LSBOA3 1/22, LSBOA4 6/23 fonksiyonda ve LSBOA5 ise 8/23 fonksiyonda diğerlerinden daha optimum sonuç vermiştir. LSBOA1 ve LSBOA3 algoritmaları F9 fonksiyonunda diğerlerine göre en iyi ve aynı sonuca ulaşmışlardır. Bu sonuçlara göre en iyi algoritma LSBOA5 olmuştur.

Bölüm 4'teki deneylerde başarılı olan çember haritalı KHBOA1, lojistik haritalı KHBOA5 ve gaus haritalı KHBOA2, KHBOA3, KHBOA4 yöntemleri ile LSBOA yöntemlerinin kalite test fonksiyonları sonuçları Tablo 5.3'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.3. En iyi sonucu veren kaotik harita kullanan ve Lorenz sistemi kullanan algoritmaların kalite test fonksiyonları için karşılaştırmalı sonuçları (Ort.: Ortalama, En K.: En Kötü)

F	İ	Kaotik versiyon 1		Kaotik versiyon 2		Kaotik versiyon 3		Kaotik versiyon 4		Kaotik versiyon 5	
		Çember	Lorenz	Gaus	Lorenz	Gaus	Lorenz	Gaus	Lorenz	Lojistik	Lorenz
F1	Ort.	6,5135E-83	2,4389E-72	3,8653E-92	1,9363E-71	3,3075E-44	3,9213E-73	1,7506E-62	2,1277E-74	3,1819E-75	9,1664E-73
	En iyi	2,6343E-97	1,4935E-85	1,4920E-109	3,4608E-87	1,1389E-54	1,1671E-82	1,2995E-73	5,3906E-84	1,7670E-84	6,1471E-86
	En K.	1,7405E-81	3,6049E-71	6,5094E-91	5,7963E-70	8,0298E-43	4,6182E-72	4,8016E-61	4,1431E-73	5,5629E-74	2,4436E-71
	Std	3,1854E-82	8,8837E-72	1,2916E-91	1,0582E-70	1,4898E-43	1,0139E-72	8,7635E-62	7,6329E-74	1,0575E-74	4,4682E-72
F2	Ort.	8,0045E-57	2,4178E-51	8,2889E-63	1,3700E-51	2,0393E-30	4,1006E-51	8,1709E-40	3,2076E-51	7,3716E-50	3,4223E-51
	En iyi	2,0979E-63	1,3691E-56	1,2198E-73	7,5228E-58	8,6809E-35	3,9048E-57	3,0761E-45	1,1240E-58	2,6028E-57	2,2493E-56
	En K.	1,9490E-55	4,2781E-50	1,2755E-61	2,1908E-50	1,6794E-29	6,7796E-50	2,1500E-38	2,4569E-50	1,0461E-48	9,3973E-50
	Std	3,5938E-56	8,0873E-51	2,6685E-62	4,3828E-51	4,0191E-30	1,4006E-50	3,9217E-39	7,2528E-51	2,3730E-49	1,7150E-50
F3	Ort.	39927,7957	47038,3760	58394,2721	46890,6664	70556,1585	47876,5225	52348,5299	47236,2914	81384,5133	43990,7498
	En iyi	13283,9911	16430,5007	34604,2562	16998,2724	47149,3121	23390,0724	14921,7028	20417,7937	68855,8937	34881,4250
	En K.	57761,5333	72489,4841	85478,2509	69811,7678	113507,9464	71699,6576	95391,9891	86622,8952	91789,9307	53106,3193
	Std	10305,2158	14394,0596	13313,0769	12752,1511	16944,1064	13853,7857	14840,2745	15969,2310	6324,6055	4576,7413
F4	Ort.	43,7593	44,2844	65,0498	47,2102	21,6862	48,5368	7,0516	47,5534	43,9003	38,7735
	En iyi	0,0705	1,8056	1,9355	0,0026	0,0058	0,1527	0,0000	0,2081	1,2801	0,0280
	En K.	87,8721	83,3794	92,0798	88,5931	86,9977	90,7652	76,6029	86,9154	92,4523	80,7942
	Std	29,4997	26,5221	26,9638	29,4863	19,2607	28,6147	17,6084	30,0737	27,9411	24,8877
F5	Ort.	27,8204	27,9840	27,9144	27,9580	0,6578	28,0196	28,3154	27,9847	27,9352	27,9771
	En iyi	26,9340	27,1739	27,1677	27,0537	0,0266	27,3013	27,8930	27,2975	26,9009	26,8045
	En K.	28,7674	28,7629	28,7723	28,7879	3,0122	28,7589	28,7606	28,7610	28,7772	28,7808
	Std	0,5662	0,4719	0,4875	0,4547	0,7207	0,4100	0,3177	0,4148	0,5428	0,5479
F6	Ort.	0,6376	0,4239	0,6119	0,3929	0,0353	0,3890	0,2727	0,3758	0,3792	0,4236
	En iyi	0,2267	0,1279	0,1408	0,1194	0,0047	0,1031	0,1081	0,0638	0,0971	0,1014
	En K.	1,2081	1,0749	1,7699	1,1255	0,1205	0,9585	0,5898	1,0076	0,9893	1,1512
	Std	0,2281	0,2019	0,3735	0,2401	0,0264	0,2111	0,1062	0,2195	0,1908	0,2444
F7	Ort.	0,0017	0,0031	0,0020	0,0032	0,0038	0,0052	0,0014	0,0045	0,0030	0,0027
	En iyi	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	En K.	0,0078	0,0115	0,0082	0,0137	0,0198	0,0328	0,0101	0,0177	0,0145	0,0087
	Std	0,0019	0,0031	0,0020	0,0037	0,0047	0,0065	0,0020	0,0048	0,0036	0,0027
F8	Ort.	-9823,0827	-10009,1762	-10621,8014	-10424,6677	-12508,3335	-10392,6426	-9576,9995	-10683,7203	-10207,7793	-11177,7231
	En iyi	-12568,1477	-12569,4765	-12560,1942	-12569,3241	-12569,4090	-12568,7224	-12566,7765	-12569,2579	-12569,3047	-12568,9292
	En K.	-6706,7052	-6902,3367	-7047,9329	-7253,7082	-11904,7907	-7486,5097	-7719,4575	-8274,6881	-6696,0284	-8289,4763
	Std	2327,3162	1861,7248	1821,0387	1994,0221	160,2498	1847,7824	1522,5612	1707,7575	1894,5551	1464,6627
F9	Ort.	2,9760	0	0	5,6843E-15	0	0	0,0000	5,3385	1,8948E-15	3,7896E-15
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En K.	89,2805	0	0	5,6843E-14	0	0	5,6843E-14	1,6015E+02	5,6843E-14	1,1369E-13
	Std	16,3003	0	0	1,7345E-14	0	0	1,0378E-14	2,9240E+01	1,0378E-14	2,0756E-14
F10	Ort.	5,0330E-15	4,2040E-15	3,8488E-15	4,6777E-15	4,7962E-15	4,3225E-15	3,8488E-15	4,0856E-15	4,6777E-15	4,3225E-15
	En iyi	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16	8,8818E-16
	En K.	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15	7,9936E-15
	Std	2,3012E-15	2,6279E-15	2,6526E-15	2,2726E-15	2,6960E-15	2,5523E-15	2,6526E-15	2,8529E-15	2,6279E-15	3,0208E-15
F11	Ort.	0,0022	3,7007E-18	0,0077	0,0112	0	0,0104	0,0246	0,0156	0	0,01237
	En iyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	En K.	0,0646	0	0,2320	0,2435	0	0,1559	0,3927	0,2104	0	0,2276
	Std	0,0118	0	0,0424	0,0471	0	0,0395	0,0939	0,0493	0	0,0484
F12	Ort.	0,0368	0,0224	0,0265	0,0372	0,0038	0,0266	0,0143	0,0213	0,02903	0,02256
	En iyi	0,0146	0,0042	0,0061	0,0049	0,0015	0,0035	0,0065	0,0038	0,00497	0,00883
	En K.	0,1039	0,1588	0,1180	0,3548	0,0127	0,0980	0,0421	0,0580	0,18607	0,06760
	Std	0,0217	0,0276	0,0198	0,0676	0,0028	0,0226	0,0095	0,0134	0,03326	0,01157
F13	Ort.	0,8504	0,5086	0,6808	0,4830	0,0470	0,5573	0,2320	0,4390	0,49222	0,50553
	En iyi	0,1906	0,0995	0,2490	0,1126	0,0009	0,1535	0,1057	0,1051	0,07472	0,11773
	En K.	1,7380	1,1183	1,4301	1,3124	0,1216	1,2711	0,6124	1,0073	0,90533	1,02388
	Std	0,3622	0,2468	0,2933	0,2805	0,0313	0,2800	0,1172	0,2670	0,23263	0,27262
F14	Ort.	4,5210	2,2114	3,1878	3,2210	1,7254	2,9563	1,2617	2,8294	5,36951	4,06966
	En iyi	0,9980	0,9980	0,9980	0,9980	0,9980	0,9980	0,9980	0,9980	0,99800	0,99800
	En K.	15,5038	10,7632	10,7632	10,7632	5,9288	10,7632	5,9288	10,7632	10,76318	10,76318
	Std	4,3389	2,4710	3,5498	3,5236	1,0680	3,6173	0,9676	3,2610	4,41517	3,90079
F15	Ort.	0,0006	0,0006	0,0008	0,0006	0,0009	0,0007	0,0009	0,0008	0,00099	0,00063
	En iyi	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,00032	0,00031
	En K.	0,0021	0,0022	0,0022	0,0017	0,0022	0,0023	0,0023	0,0023	0,00225	0,00150
	Std	0,0004	0,0004	0,0006	0,0004	0,0006	0,0005	0,0006	0,0006	0,00053	0,00033

Tablo 5.3. En iyi sonucu veren kaotik harita kullanan ve Lorenz sistemi kullanan algoritmaların kalite test fonksiyonları için karşılaştırmalı sonuçları (devamı)

F	İ	Kaotik versiyon 1		Kaotik versiyon 2		Kaotik versiyon 3		Kaotik versiyon 4		Kaotik versiyon 5	
		Çember	Lorenz	Gaus	Lorenz	Gaus	Lorenz	Gaus	Lorenz	Lojistik	Lorenz
F16	Ort.	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,03163	-1,03163
	En iyi	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,03163	-1,03163
	En K.	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,0316	-1,03163	-1,03163
	Std	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00000	0,00000
F17	Ort.	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,3980	0,3979	0,3980	0,3979	0,39790	0,39789
	En iyi	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,39789	0,39789
	En K.	0,3980	0,3979	0,3981	0,3979	0,3985	0,3981	0,3986	0,3979	0,39801	0,39792
	Std	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0000	0,00003	0,00001
F18	Ort.	3,9021	3,0001	3,0003	3,0000	3,0000	3,0001	3,0001	3,0000	3,00004	3,00009
	En iyi	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,00000	3,00000
	En K.	30,0577	3,0003	3,0020	3,0004	3,0007	3,0005	3,0010	3,0002	3,00035	3,00072
	Std	4,9400	0,0001	0,0005	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,00007	0,00018
F19	Ort.	-3,8510	-3,8554	-3,8610	-3,8544	-3,8510	-3,8530	-3,8541	-3,8580	-3,85986	-3,86020
	En iyi	-3,8628	-3,8628	-3,8628	-3,8628	-3,8627	-3,8628	-3,8627	-3,8627	-3,86278	-3,86274
	En K.	-3,7143	-3,8235	-3,8545	-3,7665	-3,7479	-3,8148	-3,8050	-3,8367	-3,85490	-3,85492
	Std	0,0301	0,0104	0,0030	0,0175	0,0248	0,0136	0,0119	0,0057	0,00327	0,00215
F20	Ort.	-3,2153	-3,2221	-3,2363	-3,2389	-3,2289	-3,2353	-3,2122	-3,2333	-3,02747	-3,31089
	En iyi	-3,3218	-3,3219	-3,3219	-3,3217	-3,3215	-3,3219	-3,3201	-3,3216	-3,12995	-3,32175
	En K.	-2,9824	-2,6073	-2,4317	-3,0324	-2,8357	-2,8418	-3,0180	-2,9725	-2,91848	-3,08590
	Std	0,1148	0,1409	0,1698	0,0980	0,1211	0,1191	0,1063	0,1080	0,06066	0,04258
F21	Ort.	-7,8388	-8,3207	-9,0091	-8,7708	-10,1097	-7,9498	-8,1473	-9,0424	-9,28208	-9,62770
	En iyi	-10,1514	-10,1515	-10,1510	-10,1527	-10,1532	-10,1506	-10,1460	-10,1517	-10,15310	-10,15200
	En K.	-2,6145	-5,0547	-2,6302	-5,0538	-9,9477	-2,6260	-4,9350	-2,6297	-5,05456	-5,05447
	Std	2,6794	2,4270	2,2590	2,2797	0,0439	3,0104	2,4118	2,2710	1,92295	1,55044
F22	Ort.	-6,2713	-7,7198	-7,8444	-7,0925	-10,3483	-7,9737	-6,5767	-7,3313	-10,03607	-10,02574
	En iyi	-10,4012	-10,4012	-10,4023	-10,3999	-10,4016	-10,4028	-10,3649	-10,4017	-10,40272	-10,40132
	En K.	-2,7632	-1,8372	-1,8372	-1,8335	-10,1290	-2,7652	-1,8256	-1,8363	-5,08749	-5,08686
	Std	2,8546	3,3996	3,1868	3,2516	0,0597	3,0639	2,6513	3,1915	1,34521	1,34268
F23	Ort.	-5,8170	-7,1303	-8,0503	-7,6745	-10,5030	-8,2064	-7,6754	-6,8529	-9,79972	-9,07063
	En iyi	-10,5343	-10,5359	-10,5359	-10,5358	-10,5361	-10,5354	-10,5111	-10,5325	-10,53604	-10,53503
	En K.	-1,6761	-1,6754	-2,4200	-1,6750	-10,4254	-1,8594	-2,4036	-2,4215	-5,12770	-5,12791
	Std	3,3061	3,3225	3,5861	3,1943	0,0299	3,1825	3,0221	3,1383	1,86371	2,41872

Tablo 5.3'te verilen sonuçlara göre algoritmaların 23 fonksiyon için başarı oranları şu şekildedir;

Kaotik versiyon 1: Kaotik harita kullanan algoritma 7/23, lorenz sistem kullanan algoritma 16/23 fonksiyonda daha optimum sonuca ulaşmıştır.

Kaotik versiyon 2: Kaotik harita kullanan algoritma 14/23, lorenz sistem kullanan algoritma 9/23 fonksiyonda daha optimum sonuca ulaşmıştır.

Kaotik versiyon 3: Kaotik harita kullanan algoritma 13/22, lorenz sistem kullanan algoritma 9/22 fonksiyonda daha optimum sonuca ulaşmıştır.

Kaotik versiyon 4: Kaotik harita kullanan algoritma 9/23, lorenz sistem kullanan algoritma 14/23 fonksiyonda daha optimum sonuca ulaşmıştır.

Kaotik versiyon 5: Kaotik harita kullanan algoritma 9/23, lorenz sistem kullanan algoritma 14/23 fonksiyonda daha optimum sonuca ulaşmıştır.

Sonuçlara göre, kaotik versiyon 2 ve kaotik versiyon 3'te gaus harita kullanan algoritmalar, diğerlerinde ise lorenz sistem kullanan algoritmalar daha başarılı olmuştur.

Kaotik versiyon 3'te F9 fonksiyonunda iki algoritma da aynı sonuca ulaştığından 22 fonksiyon üzerinden değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara Wilcoxon işaretli sıralar testi uygulanarak anlamlı farklılık olup olmadığı istatistiki olarak ölçülmüştür. Tablo 5.4'te her algoritma çifti için uygulanan Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu test %95 duyarlılık ile değerlendirilmiştir.

Tablo 5.4. Kaotik harita kullanan ve lorenz sistem kullanan algoritmalar için Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları

F	KAOTİK VERS. 1			KAOTİK VERS. 2			KAOTİK VERS. 3			KAOTİK VERS. 4			KAOTİK VERS. 5		
	Lorenz / Çember			Lorenz / Gaus			Lorenz / Gaus			Lorenz / Gaus/			Lorenz / Lojistik		
	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻
F1	3.18E-06	6	459	1.73E-06	0	465	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0	0.599936	258	207
F2	1.73E-06	0	465	1.73E-06	0	465	1.73E-06	465	0	1.73E-06	465	0	0.085896	316	149
F3	0.047162	136	329	0.002957	377	88	7.51E-05	425	40	0.19861	295	170	0.035009	335	130
F4	0.861213	224	241	0.00873	360	105	0.000222	53	412	9.32E-06	17	448	0.093676	314	151
F5	0.191522	169	296	0.829013	222	243	1.73E-06	0	465	0.001965	383	82	0.765519	218	247
F6	0.000283	409	56	0.007271	363	102	1.73E-06	0	465	0.025637	124	341	0.861213	224	241
F7	0.014795	114	351	0.236936	175	290	0.289477	181	284	0.002765	87	378	0.67328	212	253
F8	0.628843	256	209	0.658331	211	254	3.41E-05	31	434	0.013194	353	112	0.280214	285	180
F9	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
F10	0.220194	148.5	316.5	0.175016	80	385	0.480472	330	135	0.845252	100	365	0.842872	99.5	365.5
F11	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0.84375	12	453	1	0	0
F12	0.001709	385	80	0.360039	277	188	2.6E-06	4	461	0.025637	124	341	0.84508	242	223
F13	0.000716	397	68	0.006424	365	100	1.73E-06	0	465	0.000716	68	397	0.813017	244	221
F14	0.031603	337	128	0.452807	196	269	0.797098	245	220	0.106394	154	311	0.006836	364	101
F15	0.557743	204	261	0.110926	310	155	0.177907	298	167	0.338856	279	186	0.688359	252	213
F16	0.125438	158	307	0.000529	401	64	3.52E-06	458	7	0.001965	383	82	0.53044	263	202
F17	0.926255	237	228	0.051931	327	138	0.002957	377	88	0.000241	411	54	0.158855	301	164
F18	0.298944	283	182	0.22888	291	174	0.002957	88	377	0.014795	351	114	0.585712	206	259
F19	0.861213	241	224	0.001382	77	388	0.503833	200	265	0.14139	304	161	0.013194	353	112
F20	0.42843	271	194	0.67328	212	253	0.909931	238	227	0.404835	273	192	1.8E-05	441	24
F21	0.544006	262	203	0.942611	236	229	0.110926	155	310	0.007271	363	102	4.86E-05	430	35
F22	0.298944	283	182	0.360039	188	277	0.068714	144	321	0.152861	302	163	1.8E-05	24	441
F23	0.14704	303	162	0.877403	240	225	0.049498	137	328	0.688359	213	252	0.135908	305	160

Wilcoxon işaretli sıralar testine göre;

Kaotik versiyon 1: Sekiz fonksiyonda anlamlı fark vardır ve 4/8 fonksiyonda lorenz sistem kullanan algoritma diğer dört fonksiyonda çember harita kullanan algoritma optimuma daha iyi yakınsamıştır.

Kaotik versiyon 2: Sekiz fonksiyonda anlamlı fark vardır ve 5/8 fonksiyonda lorenz sistem kullanan algoritma daha başarılıdır.

Kaotik versiyon 3: 13 fonksiyonda anlamlı fark vardır ve 8/13 fonksiyonda gaus harita kullanan algoritma daha başarılıdır.

Kaotik versiyon 4: 13 fonksiyonda anlamlı fark vardır ve 8/13 fonksiyonda lorenz sistem kullanan algoritma daha başarılıdır.

Kaotik versiyon 5: Altı fonksiyonda anlamlı fark vardır ve 5/6 fonksiyonda lorenz sistem kullanan algoritma daha başarılıdır.

5.2.2. Mühendislik Problemleri ile Yapılan Deneyler

Bu kısımdaki deneylerde basınçlı kap tasarımı ve yay germe / sıkıştırma problemleri kullanılmıştır. Her iki problem için de algoritmalar 200 popülasyon ve 10000 iterasyon ile 30’ar kez çalıştırılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Kısıtları kontrol etmek için ceza metodu kullanılmıştır.

Basınçlı kap tasarım problemi için alınan en iyi sonuçlar Tablo 5.5’te verilmiştir. Tablodaki sonuçlara göre en düşük maliyete LSBOA2 ulaşmış ve kısıtları ihlal etmemiştir.

Tablo 5.5. Basınçlı kap tasarım problemi için alınan en iyi sonuçlar

Algoritma	Optimum değerler				Optimum maliyet
	T_s	T_h	R	L	
BOA	0.779933	0.392653	40.37387	199.2462	5914.0175
KHBOA1	0.786232	0.390292	40.69287	194.8685	5910.05728
KHBOA2	0.783294	0.388631	40.585017	196.3382	5898.41182
KHBOA3	0.784939	0.390118	40.535836	197.0118	5921.17975
KHBOA4	0.783329	0.396572	40.574892	196.4766	5923.26348
KHBOA5	0.783098	0.387129	40.40095	198.8709	5917.28327
LSBOA1	0.782027	0.403827	40.34621	199.63019	5965.234
LSBOA2	0.77928	0.385099	40.31962	200	5894.69
LSBOA3	0.77976	0.399875	40.33452	199.7927	5938.908
LSBOA4	0.778646	0.390738	40.34264	199.6798	5903.319
LSBOA5	0.778382	0.389437	40.32005	199.994	5900.6624

Yay germe / sıkıştırma problemi için alınan en iyi sonuçlar Tablo 5.6’da verilmiştir. Bu problem temel algoritma ve LSBOA5 aynı sonucu vermişlerdir ancak bütün algoritmalar bir problem kısıtı ihlal etmişlerdir.

Tablo 5.6. Yay germe / sıkıştırma problemi için alınan en iyi değerler

Algoritma	Optimum değerler			Optimum maliyet
	w	d	l	
BOA	0.0516384	0.3555	11.3607	0.012665
KHBOA1	0.0515022	0.35224	11.55641	0.012666
KHBOA2	0.0522625	0.3706717	10.5154435	0.0126712
KHBOA3	0.052259	0.370586	10.51992	0.012671
KHBOA4	0.0512732	0.3467954	11.8954906	0.0126686
KHBOA5	0.0518286	0.3600848	11.0942608	0.0126656
LSBOA1	0.0518740	0.3611837	11.0318633	0.0126659
LSBOA2	0.051984	0.363859	10.88225	0.012667
LSBOA3	0.0512758	0.3468562	11.8914318	0.0126684
LSBOA4	0.052006	0.364382	10.8534	0.012667
LSBOA5	0.05161	0.354811	11.4016	0.012665

Mühendislik problemleri ile yapılan deneylerde alınan sonuçlara Wilcoxon işaretli sıralar testi uygulanarak farklılık düzeyi ölçülmüştür. Basınçlı kap tasarım problemi için LSBOA2 ile KHBO1 ve KHBOA5 algoritmaları arasında yapılan testlerde LSBOA2'nin daha optimum sonuç verdiği ve algoritmalar arasında 95% oranında anlamlı fark olduğu gözlenmiştir. LSBOA2 ile BOA, KHBOA2, KHBOA3 ve KHBOA4 arasında anlamlı fark gözlenmemiştir. Yay germe / sıkıştırma problemi için uygulanan Wilcoxon işaretli sıralar testinde algoritmalar arasındaki anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Sonuçlar Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Mühendislik problemleri için Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları (M: mühendislik problemi, M1: basınçlı kap tasarım problemi, M2: yay germe / sıkıştırma problemi)

M	LSBOA / BOA			LSBOA / KHBOA1			LSBOA / KHBOA2			LSBOA / KHBOA3			LSBOA / KHBOA4			LSBOA / KHBOA5		
	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻	p	R ⁺	R ⁻
M1	0,7490	248	217	0.0124	354	111	0,1645	300	165	0,2983	283	182	0,8103	221	244	0.03846	333	132
M2	0,4284	271	194	0,0978	313	152	0,3286	280	185	0,1414	161	304	0,0859	149	316	0,9099	227	238

5.3. Bulgular ve Tartışma

Tezin bu bölümünde güncel meta sezgisel algoritmalarından olan BOA temel alınarak sürekli zamanlı kaotik sistemlerin kaotik haritalar yerine kullanılmasının sonuçları incelenmiştir. Kaotik haritalar ve lorenz sistem ile oluşturulan kaotik algoritmalar 23 kalite test fonksiyonu ve iki mühendislik tasarım problemin üzerinde analiz edilmiştir.

Kalite test fonksiyonları ile yapılan deneylerde sürekli zamanlı kaotik sistem kullanan algoritmaların kaotik harita kullanılan algoritmalarla göre daha fazla fonksiyonda başarılı olduğu ve bu fonksiyonların ağırlıklı olarak çok modlu fonksiyonlar olduğu gözlenmiştir. Basınçlı kap tasarım problemi için ile yapılan deneylerde lorenz sistem kullanan algoritmalar kaotik haritalı versiyonlara göre daha optimum sonuçlara ulaşmışlardır ve Wilcoxon işaretli sıralar testinde anlamlı farklılık gözlenmiştir. Yay germe / sıkıştırma problemi için alınan sonuçlarda bütün algoritmalar bir problem kısıtını ihlal etmişlerdir.

Bu bölümde yapılan çalışmalar sonucunda kullanılan algoritma yapısı ve problem türüne göre sürekli zamanlı sistemlerin meta sezgisel algoritma üzerindeki etkisinin değişebileceği ve sürekli zamanlı kaotik sistemlerinin kaotik haritalar yerine kullanılmasının fayda sağlayabileceği gözlenmiştir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiş olan meta sezgisel algoritmalarından Dal-Kök Algoritması, Güve-Işık Algoritması ve Balina Optimizasyon Algoritması ayrıntılı olarak incelenmiştir. Optimizasyon algoritmalarının karşılaştırılmasında sıkça kullanılan kalite testi fonksiyonları ve mühendislik tasarım problemleri kullanılarak algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda BOA'nın diğer algoritmalara göre daha optimum sonuçlar verdiği ve GIA'nın kısıtlı mühendislik problemlerinde başarılı olabileceği görülmüştür.

Kaotik haritalar meta sezgisel algoritmaların performansını arttırmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada literatürde sık kullanılan kaotik haritalar incelenerek BOA'nın kaotik versiyonlarını oluşturmak için kullanılmıştır. BOA'nın beş farklı kaotik versiyonu oluşturulmuş ve 10 adet kaotik harita her bir algoritma üzerinde ayrı ayrı test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda gaus haritanın diğerlerine göre daha başarılı olduğu ve kaotik haritaların meta sezgisel algoritmanın arama ve lokal optimumlardan kaçma yeteneğini geliştirdiği gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında ayrıca meta sezgisel algoritma performansını arttırabilmek amacıyla kaotik haritalara ek olarak sürekli zamanlı kaotik sistemler incelenmiştir. Bu amaçla kaotik BOA versiyonlarında lorenz sistem kullanılarak çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sürekli zamanlı kaotik sistemlerin kaotik haritalara göre daha başarılı sonuçlar verebildiği ve algoritmanın optimuma yakınsamasında daha etkili olduğu gözlenmiştir. Bu çalışma henüz yeni olup farklı algoritmalar üzerinde farklı kaotik haritalar ve farklı sürekli zamanlı kaotik sistemler uygulanarak ayrıntılı deneyler yapılabilir. Bu çalışma ile literatürde bir ilerleme kaydedileceği düşünülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Murty K. G., 2003. Optimization Models For Decision Making, Internet Edition, cilt 1(1), 1-7.
- [2] Türkay M. 2011. Optimizasyon modelleri ve çözüm metotları.
- [3] Yang X. S., 2010. Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2(2), 78-84.
- [4] Ebrahimi A., Khamsehchi, E., 2016. Sperm whale algorithm: an effective metaheuristic algorithm for production optimization problems. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 29, 211-222.
- [5] Alataş B., 2007. Kaotik Haritalı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmaları Geliştirme, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [6] Ronald L, UZSOY R. , 2001, Experimental Evaluation of Heuristic Optimization Algorithms, Journal of Heuristics 7: 261–304.
- [7] Yang, Xin-She, Suash Deb. "Engineering optimisation by cuckoo search." International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation 1.4 (2010): 330-343.
- [8] Rechenberg, 1965. Cybernetic solution path of an experimental problem, in: Royal Aircraft Establishment Translation No. 1122, B.F. Toms, Trans.
- [9] Goldberg D. E., Holland, J. H. 1988. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2), 95-99
- [10] Kennedy J. and Eberhart R.C., 1995. Particle swarm optimization, in: Proceedings of IVIEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, New Jersey, pp. 1942–1948.
- [11] Dorigo M. and Birattari M., 2010. Ant colony optimization, in: C. Sammut, I.G. Webb (Eds.), Encyclopedia of Machine Learning, Springer, pp. 36–39.
- [12] Karaboga D. ve Basturk B., 2008. on the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm, Appl. Soft Comput. 8 (1) 687–697.
- [13] Karaboğa D. ve Başturk B., 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, J. Glob. Optim. 39 (3) 459–471.
- [14] Cerny V., 1985. A thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm, J. Optim. Theory Appl. 45 41–51.
- [15] Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P., 1983. Optimization by simulated annealing, Science 220 (4598) 671–680.
- [16] Rao R.V, Savsani V.J, Vakharia D.P., 2012. Teaching learning based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems. Inf Sci;183:1–15.
- [17] Passino K.M., 2002. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control, IEEE Control Syst. Mag. 22 (3) 52–67.
- [18] Tanyildizi E., & Demir G. 2017. Golden Sine Algorithm; A Novel Math-Inspired Algorithm. Advances in Electrical and Computer Engineering, 17(2), 71-78.

- [19] Storn R. and Price K., 1997. Differential evolution—A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization* 11(4) 341-359.
- [20] Özdemir M. (2013). Zaman Kısıtı Altında Takım Oryantiring Problemlerinin Yapay Arı Kolonisi Yaklaşımı İle Çözümü, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü
- [21] Gilli M., Winker P. 2007, A review of heuristic optimization methods in econometrics. Research Paper, Swiss Finance Institute.
- [22] Glover F., Laguna M. (2013). Tabu Search*. In *Handbook of combinatorial optimization* (pp. 3261-3362). Springer New York.
- [23] Glover F., 1989 Tabu search – Part I, *ORSA Journal on computing*, 1(3), 190-206.
- [24] Ohashi, T., Aghbari, Z., & Makinouchi, A. (2003). Hill-climbing algorithm for efficient color-based image segmentation. In *IASTED International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications*, 17-22.
- [25] Kennedy J. & Eberhart R.C., 1995. Particle swarm optimization, in: *Proceedings of IVIEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, New Jersey, 1942–1948.
- [26] Meng X. B., Gao X. Z., Lu L., Liu Y., & Zhang H., 2016. A new bio-inspired optimisation algorithm: Bird Swarm Algorithm. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 28(4), 673-687.
- [27] Dorigo M., Birattari M. & Stutzle T., 2006. Ant colony optimization, *IEEE Comput. Intell. Mag.* 1 (4) 28–39.
- [28] He Q., Wang L., 2007. An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 20 89–99.
- [29] Merrikh-Bayat F., 2015. The runner-root algorithm: A metaheuristic for solving unimodal and multimodal optimization problems inspired by runners and roots of plants in nature, *Appl. Soft Comput* 33, 292-303.
- [30] Salhi A., Fraga E.S., 2011. Nature-inspired optimisation approaches and the new plant propagation algorithm, in: *Proceedings of the International Conference on Numerical Analysis and Optimization (ICeMATH 2011)*, vol. 1, Yogyakarta, Indonesia, 1–8.
- [31] Frank K.D., Rich C. & Longcore T. 2006. Effects of artificial night lighting on moths, in: *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, 305–344.
- [32] Mirjalili S., 2015. Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm, *Science* 89 228–249.
- [33] Mirjalili S., Lewis A., 2016, The Whale Optimization Algorithm, *Advances in Engineering Software*, 95:51,67
- [34] Hof P.R., Van Der Gucht E., 2007. Structure of the cerebral cortex of the humpback whale, *Megaptera novaeangliae* (Cetacea, Mysticeti, Balaenopteridae). *Anat Rec*;290:1–31.

- [35] Goldbogen J.A., Friedlaender A.S., Calambokidis J., Mckenna M.F., Simon M, Nowacek D.P., 2013. Integrative approaches to the study of baleen whale diving behavior, feeding performance, and foraging ecology. *BioScience*;63:90–100.
- [36] Derrac J., García S., Molina D., Herrera F., 2011. A practical tutorial on the use of non-parametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms, *Swarm Evol. Comput.* 1:3–18.
- [37] Yao X., Liu Y., Lin G., 1999. Evolutionary programming made faster. *IEEE Transactions on Evolutionary computation*, 3(2), 82-102.
- [38] Molga M., Smutnicki C., 2005. Test functions for optimization needs. 101.
- [39] Worasuchep C., 2008. Solving constrained engineering optimization problems by the constrained PSO-DD. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Information Technology and Telecommunications. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on* (Vol. 1, pp. 5-8). IEEE.
- [40] Afonso C.C., Helio J.C., Carlos C.H., 2010. Constrained optimization problems in mechanical engineering design using a real-coded steady-state genetic algorithm, *Mecánica Computacional Vol XXIX* 9287-9303
- [41] Alatas B., 2010. Chaotic bee colony algorithms for global numerical optimization. *Expert Systems with Applications*, 37(8), 5682-5687.
- [42] Alatas B., Akin E., & Ozer A. B. 2009. Chaos embedded particle swarm optimization algorithms. *Chaos, Solitons & Fractals*, 40(4), 1715-1734.
- [43] Tan Y. Tan G. Deng S., 2014. Hybrid particle swarm optimization with chaotic search for solving integer and mixed integer programming problems, *Journal of Central University*, Volume 21, Issue 7, 2731-2742
- [44] Gandomi A. H., Yang X. S., Talatahari S., & Alavi A. H. 2013. Firefly algorithm with chaos. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18(1), 89-98.
- [45] Kohli M. & Arora S. 2017. Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems. *Journal of Computational Design and Engineering*.
- [46] Alatas B. 2011. Uniform big bang–chaotic big crunch optimization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16(9), 3696-3703.
- [47] Alatas B. 2010. Chaotic harmony search algorithms. *Applied Mathematics and Computation*, 216(9), 2687-2699.
- [48] Tanyıldızı E. & Cigal T. 2017. Kaotik Haritalı Balina Optimizasyon Algoritması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1).
- [49] Caponetto R., Fortuna L., Fazzino S. & Xibilia, M. G., 2003. Chaotic sequences to improve the performance of evolutionary algorithms. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 7(3), 289-304.
- [50] Tavazoei M. S. & Haeri M., 2007. Comparison of different one-dimensional maps as chaotic search pattern in chaos optimization algorithms. *Applied Mathematics and Computation*, 187(2), 1076-1085.

- [51] Stoyanov B., 2014. Pseudo-random Bit Generation Algorithm Based on Chebyshev Polynomial and Tinkerbell Map, *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 8, 2014, no. 125, 6205 – 6210.
- [52] Özkaynak F., 2015. A novel method to improve the performance of chaos based evolutionary algorithms. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 126 (24), 5434-5438
- [53] Lorenz E. N., 1963. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 20(2), 130-141.
- [54] Grigorenko I. & Grigorenko E. 2003. Chaotic dynamics of the fractional Lorenz system. *Physical review letters*, 91(3), 034101.



ÖZGEÇMİŞ

Tuncay CİGAL	
KİŞİSEL BİLGİLER	
ADRES :	Fırat Üniversitesi, 23119 – Elazığ
TELEFON :	+90 (5 302460006)
EPOSTA :	cigaltuncay@gmail.com
DOĞUM YERİ/TARİHİ:	Besni / 16.08.1985
MEDENİ HALİ:	Evli
EĞİTİM BİLGİLERİ	
LİSANSÜSTÜ	2014-2018, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fak., Yazılım Müh., Elazığ
LİSANS :	2003-2007, Selçuk Üniversitesi, Teknik Eğitim Fak., Bilgisayar Sistemleri Öğr., Konya
LİSE :	2003, Besni Süper Lisesi, Adıyaman
İŞ DENEYİMİ	
2008 – 2018	Milli Eğitim Bakanlığı/Adıyaman Öğretmen
BİLDİĞİ YABANCI DİLLER	
	İngilizce (B1, C2)
ARAŞTIRMA DENEYİMİ	
✓ C-C++, C#, MATLAB, PHP, JAVA, MSSQL, MYSQL ✓ CAT/CAM, PROTEUS	
İLGİLENDİĞİ DİĞER BİLİMLER	
✓ Spor, Ekonomi, Sosyoloji	