ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YAPAY ZEKA VE EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ KULLANILARAK TAŞIT YAPISAL BİLEŞENLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet Umut ERDAŞ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YAPAY ZEKA VE EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ KULLANILARAK TAŞIT YAPISAL BİLEŞENLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet Umut ERDAŞ
0000-0002-5663-6759

Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2026
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN YAPAY ZEKA VE EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ KULLANILARAK TAŞIT YAPISAL BİLEŞENLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet Umut ERDAŞ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ

Elektrikli araçların (EA) yaygınlaşmasıyla birlikte, araç güvenliği ve hafifletme çalışmaları otomotiv endüstrisinin en kritik araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında, elektrikli araçların çarpışma performansını artırmak amacıyla daha düşük kütleli ve yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip yenilikçi bir çarpışma kutusu tasarımı geliştirilmiştir. Çarpışma kutusu geliştirilmesinde doğadan ilham alan çok hücreli bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Çarpışma kutusunun performansını artırmak amacıyla kristal yapı algoritması, kaotik haritalar kullanılarak hibrit optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmalar kısıtlı ve kısıtsız mühendislik problemleri ile test edilmiş ve literatürdeki algoritmalar ile kıyaslanmıştır. Tasarlanan çarpışma kutuları eklemeli imalat yöntemi ile PLA ve ABS malzeme kullanılarak üretilmiş ve basma testi ile enerji sönümleme davranışları karşılaştırılmıştır. Basma testi sonuçları sonlu elemanlar analizi yöntemi ile sayısal simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları kullanılarak vekil modelleme yöntemi ile çarpışma kutusu analizleri gerçekleştirilmiş. Vekil modellerin sonuçları optimizasyon algoritmasında amaç ve kısıt fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Geliştirilen optimizasyon algoritması ile düşük kütleli ve yüksek enerji sönümlemesini sahip çarpışma kutusu tasarımı oluşturulmuştur. Tasarımlar boyutsal yakınlığı TOGG T10X elektrikli aracına benzer bir araç üzerinde sonlu elemanlar analizi ile kıyaslanmıştır. Bu çalışma, elektrikli araçların tasarımı ve güvenliği için yapay zekâ, eklemeli imalat ve sonlu elemanlar analizi yöntemlerini kullanarak disiplinler arası çalışma ve potansiyeli açısından literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Yapay Zeka, Eklemeli imalat, Çarpışma kutusu, Kristal yapı optimizasyon algoritması, Kaotik haritalar

2026, xxi + 214 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DESIGN AND OPTIMIZATION OF PASSIVE SAFETY ELEMENTS USING ADDITIVE MANUFACTURING METHOD FOR ELECTRIC VEHICLES

Mehmet Umut ERDAŞ

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

Supervisor: Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ

With the increasing adoption of electric vehicles (EVs), vehicle safety and lightweighting studies have become one of the most critical research areas in the automotive industry. In this thesis, an innovative crash box design with reduced mass and enhanced energy absorption capacity is developed to improve the crashworthiness performance of electric vehicles. A nature-inspired multi-cellular structure is proposed for the crash box design. To enhance the performance of the crash box, hybrid optimization algorithms based on the Crystal Structure Algorithm integrated with chaotic maps are developed. The proposed algorithms are evaluated using both constrained and unconstrained engineering benchmark problems and are compared with state-of-the-art optimization algorithms reported in the literature.The designed crash boxes are manufactured using additive manufacturing techniques with PLA and ABS materials, and their energy absorption behaviors are experimentally investigated through quasi-static compression tests. The compression test results are also simulated using the finite element analysis method. Based on the simulation results, crash box analyses are carried out using surrogate modeling techniques, and the outputs of the surrogate models are employed as objective and constraint functions within the optimization framework. Using the developed optimization algorithm, a lightweight crash box design with high energy absorption capability is achieved. The designs were compared using finite element analysis on a vehicle with a volumetric structure similar to the TOGG T10X electric vehicle. This study provides an original contribution to the literature by demonstrating the interdisciplinary potential of artificial intelligence, additive manufacturing, and finite element analysis methods in the design and safety optimization of electric vehicles.
.

Keywords: Electric vehicles, Artificial Intelligence, Additive manufacturing, Crash boxes, Crystal structure optimization algorithm, Chaotic maps

2026, xxi + 214 pages.

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışmamın yürütülmesinde bana yol gösteren, bilgi ve tecrübeleriyle her adımda destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesindeki sayın hocalarım Prof. Dr. Rukiye ERTAN ve Dr. Öğretim Üyesi Emre DEMİRCİ'ye sağlamış oldukları katkı ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte destek sağlayarak araştırmalarımın sürdürülebilir olmasına olanak tanıyan YÖK 100/2000 Öncelikli Alanlar Burs Programı ve TÜBİTAK BİDEB 2211/A Yurtiçi Genel Doktora Burs Programı'na içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde katkı sunan hocam sayın Prof. Dr. Betül Sultan YILDIZ'a ve yürüttüğümüz BUÜ BAP GAP FGA-2022-1252 kodlu projeye desteklerini veren Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte verdiği büyük desteklerle, beni bu günlere getiren annem Melek ELÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Doktora çalışmalarımın tüm zorlu anlarında yanımda olan ve beni motive eden hayat arkadaşım Elif SOĞANCI'ya, teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Umut ERDAŞ
24/03/2026

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ…..	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Kuramsal Temeller	5
2.1.1. Elektrikli Araçlar	5
2.1.2. Çarpışma Kutusu	9
2.1.3. Eklemeli imalat	13
2.1.4. Optimizasyon	16
2.1.6. Kristal Yapı Algoritması	20
2.1.6. Kaotik haritalı mekanizmalar	24
2.2. Kaynak Araştırması	32
3. MATERYAL ve YÖNTEM	41
3.1. Test Numuneleri Üretim Süreci ve Testler	41
3.1.1. Çekme Testi	41
3.1.2. Üç Nokta Eğme Testi	42
3.1.3. Izod Testi	42
3.1.4. Bası Testi	43
3.2. Çarpışma Kutusu Tasarımları	43
3.3. Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretim	46
3.4. Optimizasyon algoritmaları için test problemleri	48
3.4.1. Basınçlı Kap Tasarım problemi	49
3.4.2. Çeki-Bası yayı tasarım problemi	50
3.4.3. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi	51
3.4.4. Dişli güç iletim problemi	53
3.4.5. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi	54
3.5. Kaotik Optimizasyon Algoritmaları	55
3.6. Sonlu Elemanlar Analizi	56
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	60
4.1. Eklemeli İmalat Test Sonuçları	60
4.1.1.Çekme Testi Sonuçları	60
4.1.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	61
4.1.3. Izod Testi Sonuçları	62
4.1.4. Bası Testi Sonuçları	63
4.2. Optimizasyon Algoritması Sonuçları	63
4.2.1. F1 Test fonksiyonu	63
4.2.2. F2 Test Fonksiyonu	68
4.2.3. F3 Test Fonksiyonu	72
4.2.4. F4 Test Fonksiyonu	77
4.2.5. F5 Test Fonksiyonu	81
4.2.6. F6 Test Fonksiyonu	85
4.2.7. F7 Test Fonksiyonu	90
4.2.8. F8 Test Fonksiyonu	94
4.2.9. F9 Test Fonksiyonu	98

4.2.10. F10 Test Fonksiyonu 102
4.2.11. F11 Test Fonksiyonu 106
4.2.12. F12 Test Fonksiyonu 110
4.2.13. F13 Test Fonksiyonu 115
4.2.14. F14 Test Fonksiyonu 119
4.2.15. F15 Test Fonksiyonu 122
4.2.16. F16 Test Fonksiyonu 127
4.2.17. F17 Test Fonksiyonu 130
4.2.18. F18 Test Fonksiyonu 134
4.2.19. F19 Test Fonksiyonu 138
4.2.20. F20 Test Fonksiyonu 143
4.2.21. F21 Test Fonksiyonu 147
4.2.22. F22 Test Fonksiyonu 150
4.2.23. F23 Test Fonksiyonu 154
4.2.24. Basınçlı Kap Tasarım Problemi 158
4.2.25. Çeki-Bası yayı tasarım problemi 160
4.2.25. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi 162
4.2.26. Dişli Takımı Tasarım Problemi 165
4.2.27. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi 167
4.3. Çarpışma kutuları test ve analizleri 169
4.4. Kafes Yapılı Tasarım 177
4.5. Köpük Modelleri 181
4.6. Çarpışma Kutularının Optimizasyonu 182
4.6.1. İncir Model 1 Optimizasyon 183
4.6.2. İncir Model 2 Optimizasyon 188
4.6.3. İncir Model 3 Optimizasyon 193
4.7. Elektrikli Araç Çarpışma Analizi 198
5. SONUÇ 205
KAYNAKLAR 207
ÖZGEÇMİŞ 214

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
EA	Toplam enerji emilimi
SEA	Özgül enerji emilimi
MCF	Ortalama çarpma kuvveti
PCF	Tepe çarpma kuvveti
CFE	Çarpma kuvveti verimliliği
F	Kuvvet
s	Yer değiştirme
σ	Gerilme
ε	Birim Şekil değiştirme
E	Elastisite modülü
ρ	Yoğunluk
m	Kütle
v	Hız
t	Zaman
L	Uzunluk
A	Kesit alanı
V	Hacim
k	Yay sabiti
τ	Kayma gerilmesi
δ	Yer değiştirme
ω	Açısal frekans

Kısaltmalar	**Açıklama**
EA	Elektrikli Araç
HEV	Hibrit Elektrikli Araç
PHEV	Plug-in Hibrit Elektrikli Araç
FCEV	Yakıt Hücreli Elektrikli Araç
BMS	Batarya Yönetim Sistemi
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik
AM	Eklemeli İmalat
FFF	Ergitilmiş Filament ile Üretim
FDM	Ergitilmiş Biriktirme Modelleme
SLM	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
LPBF	Lazer Toz Yatağı Füzyonu
EBM	Elektron Işını Ergitme
PLA	Polilaktik Asit
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
PETG	Polietilen Tereftalat Glikol
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimer
LHS	Latin Hiperküp Örnekleme

DOE	Deney Tasarımı
ANN	Yapay Sinir Ağları
RBF	Radyal Tabanlı Fonksiyon
GP	Gauss Süreci
GA	Genetik Algoritma
DE	Diferansiyel Evrim
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
GWO	Gri Kurt Optimizasyonu
WOA	Balina Optimizasyon Algoritması
SSA	Salp Sürü Algoritması
MPA	Deniz Yırtıcıları Algoritması
MFO	Güve-Alev Optimizasyonu
ABC	Yapay Arı Kolonisi
NSGA-II	Hızlı Elitist Çok Amaçlı Genetik Algoritma
MOPSO	Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
V2G	Araçtan Şebekeye Enerji Aktarımı
SDG	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri
SLA	Stereolitografi
PA	Poliamid
PA6 / PA66	Poliamid 6 / Poliamid 66
PU	Poliüretan
FGF	Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Köpük
RMSE	Kök Ortalama Kare Hata
MSE	Ortalama Kare Hata
MAE	Ortalama Mutlak Hata

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Elektrikli araçların gelişimi	6
Şekil 2.2.	Elektrikli aracın temel bileşenleri	8
Şekil 2.3.	Kuvvet Yer Değiştirme Grafiği	10
Şekil 2.4.	Kristal Yapı Algoritması Akış Şeması (Talatahari vd., 2021)	23
Şekil 2.5.	Chebyshev harita grafiği	26
Şekil 2.6.	Çember harita grafiği	27
Şekil 2.7.	Gauss harita grafiği	27
Şekil 2.8.	İteratif harita grafiği	28
Şekil 2.9.	Lojistik harita grafiği	29
Şekil 2.10.	Parçalı harita grafiği	29
Şekil 2.11.	Sinüs harita grafiği	30
Şekil 2.12.	Singer harita grafiği	30
Şekil 2.13.	Sinüzoidal harita grafiği	31
Şekil 2.14.	Çadır harita grafiği	31
Şekil 3.1.	ISO 527-3 çekme deneyi standardı	41
Şekil 3.2.	TS EN 178 üç nokta eğme standardı	42
Şekil 3.3.	ISO 179 Izod testi standardı	42
Şekil 3.4.	ASTM D695-15 Basma Testi Standarttı	43
Şekil 3.5.	İncir Yaprağı Modeli	43
Şekil 3.6.	İncir Model 1	44
Şekil 3.7.	İncir Model 2	45
Şekil 3.8.	İncir Model 3	46
Şekil 3.9.	a) Zortrax M300 Dual Yazıcı b) Üretim Aşaması	47
Şekil 3.10.	PLA a) İncir Model 1 b) İncir Model 2 c) İncir Model 3	47
Şekil 3.11.	ABS a) İncir Model 1 b) İncir Model 2 c) İncir Model 3	48
Şekil 3.12.	Basınçlı kap problemi	50
Şekil 3.13.	Çeki-Bası yayı tasarım problemi	51
Şekil 3.14.	Üç çubuk kafes yapısı tasarım problemi	52
Şekil 3.15.	Dişli güç iletim tasarım problemi	53
Şekil 3.16.	Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi	54
Şekil 3.17.	Kaotik Kristal Yapı Algoritması sözde kodu	56
Şekil 3.18.	Çarpışma Kutusu Sonlu Elemanlar Analizi	57
Şekil 3.19.	Araç Yandan Direk Çarpışma	58
Şekil 3.20.	Araç Batarya Paketi Konumu	58
Şekil 3.21.	Araç Batarya Paketi ve Çarpışma Kutusu Konumu	59
Şekil 4.1.	Gerilme-Gerinim eğrileri	60
Şekil 4.2.	Üç nokta eğme test sonuçları	61
Şekil 4.3.	Basma testi Kuvvet-Yer değiştirme Grafiği	63
Şekil 4.4.	F1 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları	64
Şekil 4.5.	F1 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi	64
Şekil 4.6.	F1 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı	65
Şekil 4.7.	F1 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri	66
Şekil 4.8.	F1 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi	67
Şekil 4.9.	F1 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi	67

Şekil 4.10. F2 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları 68
Şekil 4.11. F2 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 68
Şekil 4.12. F2 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 70
Şekil 4.13. F2 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 70
Şekil 4.14. F2 Test Fonksiyonu 1. boyuttaki yörünge analizi 71
Şekil 4.15. F2 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 72
Şekil 4.16. F3 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları 73
Şekil 4.17. F3 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 73
Şekil 4.18. F3 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 74
Şekil 4.19. F3 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 75
Şekil 4.20. F3 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 76
Şekil 4.21. F3 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 76
Şekil 4.22. F4 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları 77
Şekil 4.23. F4 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 78
Şekil 4.24. F4 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 79
Şekil 4.25. F4 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 80
Şekil 4.26. F4 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 80
Şekil 4.27. F4 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 81
Şekil 4.28. F5 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları 82
Şekil 4.29. F5 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 82
Şekil 4.30. F5 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 83
Şekil 4.31. F5 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 84
Şekil 4.32. F5 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 84
Şekil 4.33. F5 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 85
Şekil 4.34. F6 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları 86
Şekil 4.35. F6 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 86
Şekil 4.36. F6 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 87
Şekil 4.37. F6 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 88
Şekil 4.38. F6 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 89
Şekil 4.39. F6 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 89
Şekil 4.40. F7 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları 90
Şekil 4.41. F7 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 90
Şekil 4.42. F7 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 92
Şekil 4.43. F7 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 92
Şekil 4.44. F7 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 93
Şekil 4.45. F7 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 94
Şekil 4.46. F8 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 95
Şekil 4.47. F8 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 95
Şekil 4.48. F8 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 96
Şekil 4.49. F8 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 97
Şekil 4.50. F8 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 97
Şekil 4.51. F8 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 98
Şekil 4.52. F9 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 99
Şekil 4.53. F9 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 99
Şekil 4.54. F9 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 100
Şekil 4.55. F9 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 101
Şekil 4.56. F9 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 101
Şekil 4.57. F9 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 102

Şekil 4.58. F10 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 103
Şekil 4.59. F10 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 103
Şekil 4.60. F10 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 104
Şekil 4.61. F10 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 105
Şekil 4.62. F10 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 105
Şekil 4.63. F10 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 106
Şekil 4.64. F11 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 107
Şekil 4.65. F11 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 107
Şekil 4.66. F11 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 108
Şekil 4.67. F11 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 109
Şekil 4.68. F11 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 109
Şekil 4.69. F11 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 110
Şekil 4.70. F12 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 111
Şekil 4.71. F12 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 111
Şekil 4.72. F12 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 112
Şekil 4.73. F12 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 113
Şekil 4.74. F12 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 114
Şekil 4.75. F13 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 114
Şekil 4.76. F13 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 115
Şekil 4.77. F13 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 115
Şekil 4.78. F13 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 117
Şekil 4.79. F13 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 117
Şekil 4.80. F13 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 118
Şekil 4.81. F13 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 118
Şekil 4.82. F14 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 119
Şekil 4.83. F14 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 119
Şekil 4.84. F14 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 120
Şekil 4.85. F14 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 121
Şekil 4.86. F14 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 121
Şekil 4.87. F14 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 122
Şekil 4.88. F15 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 123
Şekil 4.89. F15 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 123
Şekil 4.90. F15 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 124
Şekil 4.91. F15 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 125
Şekil 4.92. F15 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 126
Şekil 4.93. F15 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 126
Şekil 4.94. F16 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 127
Şekil 4.95. F16 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 127
Şekil 4.96. F16 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 128
Şekil 4.97. F16 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 129
Şekil 4.98. F16 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 129
Şekil 4.99. F16 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 130
Şekil 4.100. F17 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 131
Şekil 4.101. F17 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 131
Şekil 4.102. F17 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 132
Şekil 4.103. F17 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri 133
Şekil 4.104. F17 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 133
Şekil 4.105. F17 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 134

Şekil 4.106. F18 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 135
Şekil 4.107. F18 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 135
Şekil 4.108. F18 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 136
Şekil 4.109. F18 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri..... 137
Şekil 4.110. F18 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 137
Şekil 4.111. F18 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 138
Şekil 4.112. F19 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 139
Şekil 4.113. F19 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 139
Şekil 4.114. F19 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 140
Şekil 4.115. F19 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri..... 141
Şekil 4.116. F19 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 142
Şekil 4.117. F19 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 142
Şekil 4.118. F20 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 143
Şekil 4.119. F20 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 143
Şekil 4.120. F20 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 144
Şekil 4.121. F20 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri..... 145
Şekil 4.122. F20 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 146
Şekil 4.123. F20 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 146
Şekil 4.124. F21 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 147
Şekil 4.125. F21 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 147
Şekil 4.126. F21 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 148
Şekil 4.127. F21 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri..... 149
Şekil 4.128. F21 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 149
Şekil 4.129. F21 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 150
Şekil 4.130. F22 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 151
Şekil 4.131. F22 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 151
Şekil 4.132. F22 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 152
Şekil 4.133. F22 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri..... 153
Şekil 4.134. F22 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 153
Şekil 4.135. F22 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 154
Şekil 4.136. F23 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı 154
Şekil 4.137. F23 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi 155
Şekil 4.138. F23 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı 156
Şekil 4.139. F23 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri..... 157
Şekil 4.140. F23 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi 157
Şekil 4.141. F23 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi 158
Şekil 4.142. Basınçlı Kap Tasarım Problemi Yakınsama Eğrisi 158
Şekil 4.143. Basınçlı Kap Tasarım Problemi Algoritmaların Performans Dağılımı 159
Şekil 4.144. Basınçlı Kap Tasarım Problemi Wilcoxon P değerleri..... 160
Şekil 4.145. Çeki-Bası yayı tasarım problemi yakınsama eğrisi 160
Şekil 4.146. Çeki-Bası yayı tasarım problemi Algoritmaların Performans Dağılımı 161
Şekil 4.147. Çeki-Bası yayı tasarım problemi Wilcoxon P değerleri 162
Şekil 4.148. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi yakınsama eğrisi..... 162
Şekil 4.149. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi Algoritmaların Performans Dağılımı..... 164
Şekil 4.150. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi Wilcoxon P değerleri 164

Şekil 4.151. Dişli Takımı Tasarım Problemi Yakınsama Eğrisi 165
Şekil 4.152. Dişli Takımı Tasarım Problemi Algoritmaların Performans Dağılımı 166
Şekil 4.153. Dişli Takımı Tasarım Problemi Wilcoxon P değerleri 166
Şekil 4.154. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi yakınsama eğrisi 167
Şekil 4.155. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi Algoritmaların Performans Dağılımı 168
Şekil 4.156. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi Wilcoxon P değerleri 168
Şekil 4.157. PLA Basma Testi 169
Şekil 4.158. ABS Basma Testi 169
Şekil 4.159. Basma testi simülasyonu 170
Şekil 4.160. PLA Model 1 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği 170
Şekil 4.161. PLA Model 2 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği 171
Şekil 4.162. PLA Model 3 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği 172
Şekil 4.163. ABS Model 1 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği 173
Şekil 4.164. ABS Model 2 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği 174
Şekil 4.165. ABS Model 3 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği 176
Şekil 4.166. Kafes yapılı tasarım 1 177
Şekil 4.167. Kafes yapılı tasarım 2 177
Şekil 4.168. Kafes yapılı tasarım 3 178
Şekil 4.169. Kafes yapılı tasarım 4 178
Şekil 4.170. PLA kafes yapılı tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği 179
Şekil 4.171. ABS kafes yapılı tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği 180
Şekil 4.172. Köpük model 1 181
Şekil 4.173. Köpük model 2 181
Şekil 4.174. Köpük model PLA ve ABS kuvvet-yer değiştirme grafiği 182
Şekil 4.175. İncir 1 Kütle Gerçek Değerler ile Tahmin Edilen Değerler 185
Şekil 4.176. İncir 1 Maksimum Kuvvet Gerçek Değerler ile Tahmin Edilen Değerler 186
Şekil 4.177. İncir Model 1 Enerji Sönümleme 186
Şekil 4.178. İncir Model 1 Optimizasyon Yakınsama Eğrisi 187
Şekil 4.179. İncir 2 Model Kütle gerçek değerler ve tahmin 190
Şekil 4.180. İncir Model 2 Maksimum kuvvet gerçek değerler ve tahmin 191
Şekil 4.181. İncir Model 2 Enerji Sönümleme 192
Şekil 4.182. İncir Model 2 Optimizasyon Yakınsama Eğrisi 192
Şekil 4.183. İncir Model 3 Kütle gerçek değerler ve tahmin 196
Şekil 4.184. İncir Model 3 Maksimum Kuvvet gerçek değerler ve tahmin 196
Şekil 4.185. İncir Model 3 Enerji Sönümleme gerçek değerler ve tahmin 197
Şekil 4.186. İncir Model 3 Optimizasyon Yakınsama Eğrisi 197
Şekil 4.187. Elektrikli araç direk çarpması önden görünüş 199
Şekil 4.188. Elektrikli araç direk çarpması yan görünüş 199
Şekil 4.189. Batarya Çerçevesinin direk ile teması 200
Şekil 4.190. Çarpışma kutsunun direk ile teması 200
Şekil 4.191. Elektrikli araç çarpışma anına ait Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği 201
Şekil 4.191. %100 Bariyer Önden Çarpışma Yan Görünüm 202
Şekil 4.192. %100 Bariyer Önden Çarpışma Alt Görünüm 202
Şekil 4.193. %40 Bariyer Önden Çarpışma Yan Görünüm 203
Şekil 4.194. %40 Bariyer Önden Çarpışma Alt Görünüm 203
Şekil 4.195. Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği 204

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Optimizasyon Algoritmaları (Ayyarao vd., 2022)	19
Çizelge 2.1.	Optimizasyon Algoritmaları (Ayyarao vd., 2022) (devam)	20
Çizelge 2.2.	Kaotik Haritalar(Mehta vd., 2023)	25
Çizelge 3.1.	Numune üretim parametreleri	41
Çizelge 3.2.	İncir Model 1 Tasarım Değişkenleri	44
Çizelge 3.3.	İncir Model 2 Tasarım Değişkenleri	45
Çizelge 3.4.	İncir Model 3 Tasarım Değişkenleri	46
Çizelge 3.5.	Test Fonksiyonları	48
Çizelge 3.5.	Test Fonksiyonları (devam)	49
Çizelge 3.6.	Kaotik Kristal Yapı Algoritmaları	56
Çizelge 4.1.	Çekme Testi Sonuçları	60
Çizelge 4.2.	Izod Test Sonuçları	62
Çizelge 4.3.	F1 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	65
Çizelge 4.4.	F2 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	69
Çizelge 4.5.	F3 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	74
Çizelge 4.6.	F4 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	78
Çizelge 4.7.	F5 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	83
Çizelge 4.8.	F6 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	87
Çizelge 4.9.	F7 Test Fonksiyonu 30 Çözüme ait Sonuçlar	91
Çizelge 4.10.	F8 Test Fonksiyonu 30 Çözüme ait Sonuçlar	96
Çizelge 4.11.	F9 Test Fonksiyonu 30 Çözüme ait Sonuçlar	100
Çizelge 4.12.	F10 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	104
Çizelge 4.13.	F11 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	108
Çizelge 4.14.	F12 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	112
Çizelge 4.15.	F13 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	116
Çizelge 4.16.	F14 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	120
Çizelge 4.17.	F15 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	124
Çizelge 4.18.	F16 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	128
Çizelge 4.19.	F17 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	132
Çizelge 4.20.	F18 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	136
Çizelge 4.21.	F19 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	140
Çizelge 4.22.	F20 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	144
Çizelge 4.23.	F21 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	148
Çizelge 4.24.	F22 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	151
Çizelge 4.25.	F23 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar	155
Çizelge 4.26.	Basınçlı Kap Tasarım Problemi 30 çözüme ait sonuçlar	159
Çizelge 4.27.	Çeki-Bası yayı tasarım problemi 30 çözüme ait sonuçlar	161
Çizelge 4.28.	Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi 30 çözüme ait sonuçlar	163
Çizelge 4.29.	Dişli Takımı Tasarım Problemi 30 çözüme ait sonuçlar	165
Çizelge 4.30.	Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi 30 çözüme ait sonuçlar	167
Çizelge 4.31.	PLA M1 Basma testi sonuçları	171
Çizelge 4.32.	PLA Model 2 Basma testi sonuçları	172
Çizelge 4.33.	PLA Model 3 basma testi sonuçları	173
Çizelge 4.34.	ABS Model 1 Basma testi sonuçları	174

Çizelge 4.35. ABS Model 2 Basma Testi sonuçları 175
Çizelge 4.36. ABS M3 basma testi sonuçları 176
Çizelge 4.37. PLA kafes yapısız tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği 179
Çizelge 4.38. PLA kafes yapılı tasarım simülasyon sonuçları 179
Çizelge 4.39. ABS kafes yapısız tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği 180
Çizelge 4.40. ABS kafes yapı sonuçları 180
Çizelge 4.41. Köpük model PLA ve ABS simülasyon sonuçları 182
Çizelge 4.42. İncir Model 1 Veri Kümesi 183
Çizelge 4.42. İncir Model 1 Veri Kümesi (devam) 184
Çizelge 4.42. İncir Model 1 Veri Kümesi (devam) 185
Çizelge 4.43. İncir Model 1 Optimizasyon Sonuçları 187
Çizelge 4.43. İncir Model 1 Optimizasyon Sonuçları(devam) 188
Çizelge 4.44. İncir Model 2 Veri Kümesi 188
Çizelge 4.44. İncir Model 2 Veri Kümesi (devam) 189
Çizelge 4.44. İncir Model 2 Veri Kümesi (devam) 190
Çizelge 4.45. İncir Model 2 Optimizasyon Sonuçları 193
Çizelge 4.46. İncir Model 3 Veri Kümesi 193
Çizelge 4.46. İncir Model 3 Veri Kümesi (devam) 194
Çizelge 4.46. İncir Model 3 Veri Kümesi (devam) 195
Çizelge 4.47. İncir Model 3 Optimizasyon Sonuçları 198
Çizelge 4.48. Elektrikli araç çarpışması sonuçları 201
Çizelge 4.49. Önden Çarpışma Analiz Sonuçları 204

1. GİRİŞ

Günümüzde artan çevresel kaygılar, fosil yakıtların tükenme riski ve küresel karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik politikalar, otomotiv sektöründe köklü bir dönüşümü zorunlu kılmıştır. Bu dönüşümün en önemli sonucu, elektrikli araçların (EA) hızlı gelişimi ve yaygınlaşmasıdır. Elektrikli araçlar, yenilenemeyen enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçişte kritik bir rol üstlenmektedir. Avrupa ve Asya'da uygulanan düşük emisyon hedefleri, devlet teşvikleri ve batarya teknolojilerindeki ilerlemeler, elektrikli araçlara geçiş sürecini önemli ölçüde hızlandırmaktadır. Bununla birlikte, elektrikli araç teknolojilerinin yaygınlaşmasının önünde hâlen çeşitli engeller bulunmaktadır. Özellikle batarya enerji kapasitesinin sınırlı olması, araç menzilini doğrudan etkilemekte ve sürücülerin kullanım konforunu kısıtlamaktadır. Ayrıca, elektrikli araçların yapısal güvenliği ve çarpışmaya dayanıklılığı, bu araçların artan kullanım oranıyla birlikte giderek daha kritik hâle gelmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketi sistemlerinin çarpışma sırasında maruz kaldığı mekanik hasarlar; termal kaçak, kısa devre ve yangın gibi ciddi güvenlik risklerine yol açabilmektedir. Bu durum hem yolcu güvenliği hem de araç yapısal bütünlüğü açısından önemli bir mühendislik problemidir.

Elektrikli araçlarda kullanılan batarya paketi sistemi, aracın temel güç bileşenidir ve çarpışma anında korunması hayati öneme sahiptir. Genellikle aracın alt kısmına yerleştirilen bu sistem, önden, arkadan veya yandan gelen darbeler sonucunda yüksek mekanik gerilmelere maruz kalmaktadır. Özellikle yan çarpışma senaryolarında, kuvvetlerin küçük bir alanda yoğunlaşması, batarya hücrelerinde yapısal ve elektriksel hasar riskini artırmaktadır. Bu nedenle, batarya hücrelerinin korunması, elektrikli araç güvenliğinin en kritik tasarım parametrelerinden biri hâline gelmiştir.

Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması, bu araçların karıştığı trafik kazalarının sayısında bir artışa neden olmuştur, bu durum güvenlik sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Elektrikli araçların yapısı göz önüne alındığında hafif ve çarpışmaya dayanıklı tasarımların geliştirilmesi gerekmektedir. Hafif yapılar, enerji tüketimini ve batarya yükünü azaltarak araç menzilini artırmaktadır. Bu nedenle, hafif ve yüksek enerji

sönümleme kapasitesine sahip yapıların geliştirilmesi, elektrikli araç mühendisliğinde öncelikli bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

Pasif güvenlik sistemleri, çarpışma sırasında ortaya çıkan kinetik enerjinin yolculara ve taşıtın ana yapısına iletilmesini azaltmayı amaçlar. Bu bağlamda, enerji emiciler, kinetik enerjiyi plastik deformasyon yoluyla Şekil değiştirme enerjisine dönüştürerek darbe etkilerini azaltmakta ve yolcu güvenliğini artırmaktadır. Pasif güvenlik sistemi bileşimi olan çarpışma kutularının performansı, deformasyon modları ve çeşitli mühendislik göstergeleri ile değerlendirilmektedir. Toplam enerji emilimi (EA), özgül enerji emilimi (SEA), ortalama çarpma kuvveti (MCF), tepe çarpma kuvveti (PCF) ve çarpma kuvveti verimliliği (CFE) bu göstergeler arasında yer almaktadır. Yüksek EA ve SEA değerleri, yapının enerji sönümleme kapasitesinin yüksek olduğunu gösterirken; düşük PCF değerleri, yolcu güvenliği açısından daha güvenli bir davranış sergiler. Ayrıca yüksek CFE değerleri, enerjinin daha dengeli dağıldığını ve yapının verimli çalıştığını göstermektedir.

Çarpışma kutusu tasarımlarında ince cidarlı yapılar, hafiflikleri, üretim kolaylıkları ve yüksek enerji emme kabiliyetleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Başlangıçta basit tüp geometrilerine odaklanan araştırmalar, zamanla çok hücreli yapılara yönelmiş; bu yapıların enerji emme kapasitesini ve kütle verimliliğini kayda değer şekilde artırdığı ortaya konmuştur. Çok hücreli tasarımlar, dairesel, altıgen, üçgen veya doğadan esinlenilmiş hücre geometrileriyle üretilebilmekte ve geleneksel yapılara kıyasla daha üstün performans göstermektedir. Kemik dokusu, bambu, ağaç dalları veya böcek kanatlarının hiyerarşik yapılarından ilham alan bu biyomimetik tasarımlar, yüksek özgül dayanım ve kontrollü deformasyon özellikleriyle öne çıkmaktadır.

Ayrıca, enerji emici sistemlerin performansını artırmak amacıyla dolgu malzemeleri, tetikleyici kusurlar ve hibrit yapılar üzerine de yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Metal köpükler, polimer dolgular, kompozit takviyeler ve kafes yapılar, ince cidarlı profillere entegre edilerek çarpışma dayanıklılığını önemli ölçüde artırmaktadır. Üretim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, karmaşık geometrilerin üretilmesini mümkün kılan eklemeli imalat yöntemleri de enerji emici yapıların tasarımında yaygınlaşmıştır. Ergitilmiş filament ile üretim (FFF), seçici lazer ergitme (SLM) ve lazer toz yatağı

füzyonu (LPBF) gibi teknikler, polimer ve metal malzemelerin yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede geleneksel yöntemlerle üretimi zor olan çok hücreli veya biyomimetik yapıların prototipleri elde edilebilmektedir.

Son yıllarda, enerji emici yapıların geliştirilmesinde sayısal modelleme ve optimizasyon yaklaşımları önemli bir yer edinmiştir. Sonlu eleman analizi (FEA), çarpışma senaryolarında kuvvet–yer değiştirme davranışını ve deformasyon modlarını incelemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, yüksek hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla vekil modeller (RBF, ANN, GP) ve meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları (GA, PSO, GWO vb.) kullanılarak hafiflik ve enerji sönümleme performansını aynı anda optimize eden tasarımlar geliştirilmektedir.

Sonuç olarak, elektrikli araçlarda çarpışma güvenliği yalnızca pasif güvenlik elemanlarının değil, aynı zamanda enerji depolama sistemlerinin bütünsel biçimde değerlendirilmesini gerektiren çok disiplinli bir mühendislik problemidir. Yeni nesil enerji emici yapıların geliştirilmesi, batarya sistemlerinin deformasyonunu güvenli sınırlar içinde tutarak hem araç dayanıklılığını hem de yolcu güvenliğini artırmaktadır. Bu bağlamda, elektrikli araçlarda çarpışma güvenliği ve yapısal enerji sönümleme optimizasyonu, sürdürülebilir otomotiv teknolojilerinin geleceğinde merkezi bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir.

Tez çalışması kapsamında elektrikli araçlarda uygulanmak üzere tasarlanmış doğadan ilham alan çarpışma kutuları tasarlanmıştır. Tasarlanan çarpışma kutuları PLA ve ABS malzemeler kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen çarpışma kutuları yarı statik basma testleri ile test edilerek, çarpışma performansları hesaplanmıştır. Çarpışma kutuları sonlu elemanlar analizi yöntemi ile simüle edilmiştir. Vekil modelleme kullanılarak çok parametreli tasarımlar oluşturularak çarpışmaya dayanıklılık kriterleri incelenmiştir. Çarpışma kutularında hafif yapılar kullanılması adında Kristal yapı algoritması kaotik haritalar metotlarıyla hibritleşmiştir. Elde edilen sonuçlar optimizasyon işlemi yapılarak optimum çarpışma kutusu tasarımı elde edilmiştir. Çarpışma performanslarını artırmak amacıyla kafes yapılı tasarımlar ve köpük katkılı çarpışma kutuları da sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiş ve çarpışmaya

dayanıklılık kriterleri hesaplanmıştır. Çarpışma kutularının optimum modelleri de elektrikli araç benzetimi yapılarak sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilmiştir.

Bu doktora tezinin özgün değeri, elektrikli araçların pasif güvenlik sistemleri için geliştirilen çarpışma kutularının, yalnızca geometrik veya malzeme bazlı bir iyileştirme olarak ele alınmaması; yapay zekâ tabanlı özgün bir optimizasyon algoritması, eklemeli imalatla üretilebilir, doğadan ilham alan tasarımların kullanılması ve sonlu elemanlar analizi destekli yaklaşımlarının tek ve bütünleşik bir tasarım optimizasyon çerçevesinde bir araya getirilmesinden kaynaklanmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

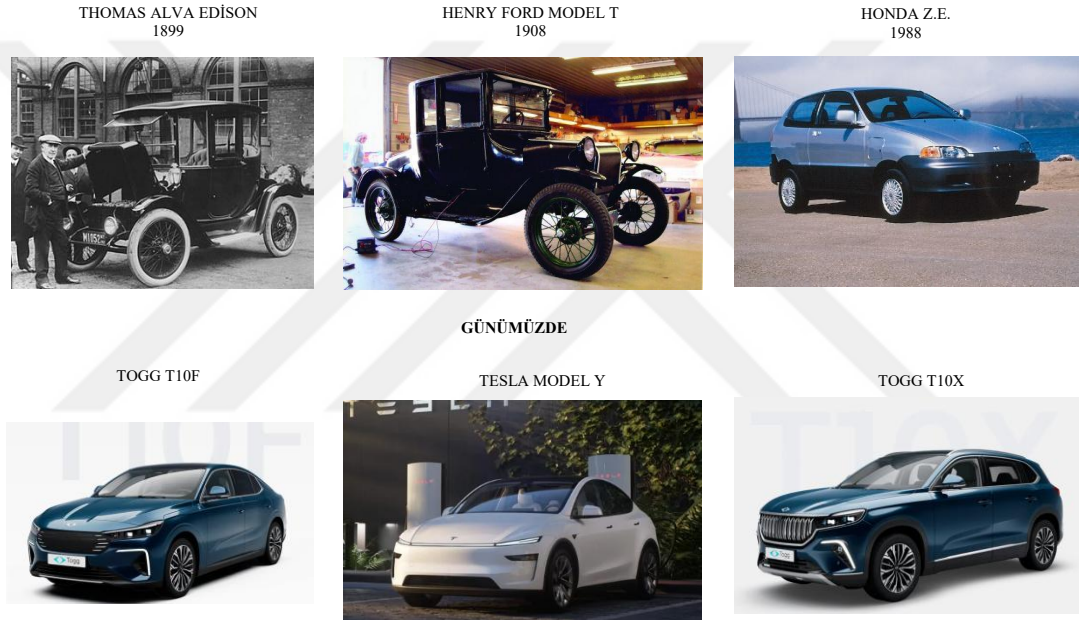
2.1. Kuramsal Temeller

2.1.1. Elektrikli Araçlar

Günümüzde ulaşım sistemleri, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik gereksinimleri doğrultusunda köklü bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Bu dönüşümün merkezinde, fosil yakıt kullanan içten yanmalı motorlardan uzaklaşarak elektrik enerjisiyle çalışan taşıtlar, yani elektrikli araçlar (EA) yer almaktadır. Elektrikli araçlar, enerji dönüşümünü kimyasal yanma yerine elektriksel yollarla gerçekleştiren; böylece sıfıra yakın egzoz emisyonu üreten ve yüksek enerji verimliliği sağlayan sistemler olarak tanımlanabilir (Sun vd., 2019). Son on yılda, elektrikli araçlar küresel ölçekte hızla yaygınlaşmış ve ulaşım politikalarında köklü değişimlere yol açmıştır. 2024 itibarıyla dünya genelinde elektrikli araç sayısı 40 milyonu aşmıştır. Bu artış, batarya maliyetlerinin azalması, şarj altyapısının gelişmesi ve devletlerin sıfır emisyon hedefleriyle doğrudan ilişkilidir (Akinsooto vd., 2025). Avrupa Birliği, Çin ve ABD gibi bölgeler teşvik politikalarıyla dönüşümü desteklerken; Türkiye'de yerli üretim, kamu destekleri ve EPDK şarj ağı düzenlemeleri bu dönüşümün ulusal düzeyde hız kazanmasını sağlamaktadır. Ancak batarya maliyetleri ve altyapı eksiklikleri sürecin önündeki başlıca kısıtlar olmaya devam etmektedir (Közkurt vd., 2020).

Elektrikli araçların geçmişi, otomotiv endüstrisinin doğuşuyla neredeyse eş zamanlı olarak 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. 1828 yılında Macar mucit Ányos Jedlik tarafından geliştirilen elektrik motoruyla çalışan küçük ölçekli prototip, ilk elektrikli araç örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir. 1830'lu yıllarda Robert Anderson ve Thomas Davenport benzer sistemler geliştirmiştir. 19. yüzyılın sonlarına gelindiğinde elektrikli araçlar sessiz çalışmaları, kullanım kolaylıkları ve egzoz gazı üretmemeleri nedeniyle şehir içi ulaşımda tercih edilmiştir. 1899'da Camille Jenatzy'nin "La Jamais Contente" aracı 100 km/s hızı aşarak dönemin rekorunu kırmış, elektrikli araçların teknik potansiyelini ortaya koymuştur. 1900'lü yılların başında ABD'de elektrikli araçların pazar payı %30 seviyelerine ulaşmıştır. Ancak 1910'lardan itibaren içten yanmalı motorların gelişimi, seri üretimin başlaması ve petrolün ucuzlaması elektrikli araçların

gerilemesine neden olmuştur. Batarya teknolojilerinin düşük enerji yoğunluğu ve uzun şarj süreleri, rekabet gücünü azaltmıştır. 1970'li yıllardaki enerji krizleri ve çevre sorunları ilgiyi yeniden artırmış, 1990'larda GM EV1 gibi modern elektrikli araçlar üretilmiştir. 2000'li yıllarda lityum-iyon bataryaların gelişmesiyle Tesla Roadster (2008) önemli bir dönüm noktası olmuş, büyük üreticiler yeniden bu alana yönelmiştir. Günümüzde elektrikli araçlar yalnızca otomotiv endüstrisinin bir alt kolu değil; enerji yönetimi, akıllı ulaşım sistemleri ve sürdürülebilir kalkınma stratejileriyle bütünleşmiş çok boyutlu bir teknoloji alanı hâline gelmiştir (Iulia & Szabo, 2022).



Şekil 2.1. Elektrikli araçların gelişimi

Elektrikli araçlar, enerji kaynağı ve tahrik sistemine göre farklı kategorilere ayrılmaktadır. Tam elektrikli araçlar tamamen elektrik enerjisiyle çalışan ve içten yanmalı motora sahip olmayan taşıtlardır. Enerji, şarj edilebilir bataryalarda depolanır ve elektrik motoruna iletilir (Sanguesa vd., 2021). Hibrit elektrikli araçlar hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru içerir; araç düşük hızlarda elektrikle, yüksek hızlarda ise benzin veya dizel motorla çalışabilir. Plug-in hibrit elektrikli ise hibrit sistemin gelişmiş bir versiyonudur; dış kaynaklardan şarj edilebilir ve daha uzun elektrikli sürüş menziline sahiptir. Yakıt hücreli elektrikli araçlar ise hidrojeni kimyasal reaksiyonla elektrik

enerjisine dönüştürür; egzoz emisyonu yalnızca su buharı olduğundan çevre dostu bir çözüm sunar (Lebrouhi vd., 2021).

Elektrikli araçların performansı ve verimliliği, sistem bileşenlerinin uyumlu çalışmasına bağlıdır. Bu bileşenlerin başında batarya sistemi gelir. Batarya, enerjinin depolandığı temel birimdir ve genellikle lityum-iyon teknolojisi kullanılır. Kapasitesi, aracın menzilini ve performansını doğrudan etkiler. Elektrik motoru, bataryadan aldığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirir; yüksek tork üretimi ve sessiz çalışmasıyla öne çıkar. Güç elektroniği birimi, invertör, dönüştürücü ve kontrol devrelerinden oluşur; motor ile batarya arasındaki enerji akışını düzenler. Araç kontrol ünitesi ise tüm bileşenlerin uyum içinde çalışmasını sağlar; enerji yönetimi, hız kontrolü ve güvenlik fonksiyonlarını koordine eder (Sharma vd., 2020).

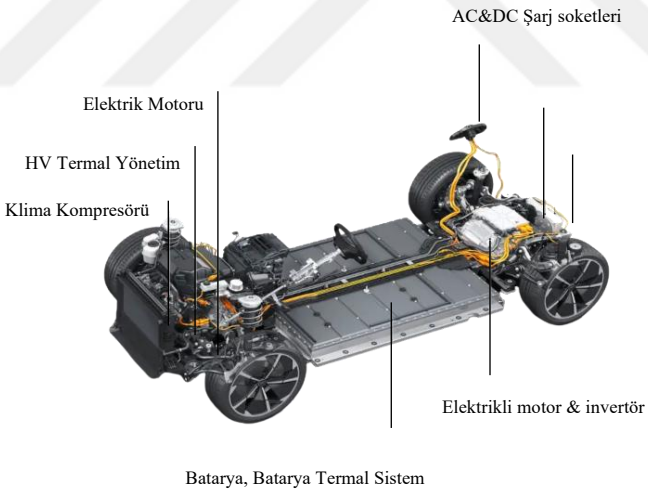
Elektrikli araçlar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine ve ardından mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Temel olarak batarya, güç elektroniği, elektrik motoru ve araç kontrol biriminden oluşurlar. Bataryada depolanan enerji invertör aracılığıyla motora iletilir; motor bu enerjiyi dönme hareketine çevirerek aracı hareket ettirir. Frenleme sırasında motor jeneratör gibi çalışarak kinetik enerjiyi tekrar elektrik enerjisine dönüştürür ve bataryaya geri besler. Bu süreç, rejeneratif frenleme olarak adlandırılır ve sistemin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırır. Tüm bu işlevler, araç kontrol ünitesi tarafından yönetilerek güvenli, sessiz ve yüksek verimli bir sürüş deneyimi sunar (Avci vd., 2013).

Elektrikli araçlar birçok avantaja sahip olup çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif sunmaktadır. Egzoz emisyonu üretmedikleri için şehir içi hava kalitesine katkı sağlar ve karbon salımını azaltırlar. Ayrıca enerji verimlilikleri oldukça yüksektir; elektrik motorlarında verim oranı %85–90'a kadar ulaşabilmektedir. Mekanik yapılarında daha az hareketli parça bulunduğundan bakım ihtiyacı düşüktür. Sessiz çalışmaları sayesinde gürültü kirliliğini azaltarak şehir yaşamına konfor kazandırırlar. Bununla birlikte rejeneratif frenleme sistemi sayesinde frenleme esnasında ortaya çıkan enerjiyi geri kazanarak verimliliği artırırlar (Veza vd., 2024).

Bununla birlikte, elektrikli araçların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Menzilleri içten yanmalı araçlara kıyasla genellikle daha kısadır. Şarj sürelerinin uzun olması ve bazı

bölgelerde şarj altyapısının yetersizliği kullanıcılar için zorluk yaratabilmektedir. Batarya üretiminde kullanılan lityum, nikel ve kobalt gibi maddeler maliyeti artırırken, bataryalar zamanla kapasite kaybına uğrayabilir. Ayrıca bataryaların geri dönüşüm süreçlerinin çevresel açıdan dikkatle yönetilmesi gerekmektedir. Son olarak, elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte şebeke yükü artabilir ve enerji üretimi fosil kaynaklara dayalıysa dolaylı olarak emisyon oluşumu söz konusu olabilir (Lebrouhi vd., 2021).

Elektrikli araçlar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine ve ardından mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Temel olarak batarya, güç elektroniği, elektrik motoru ve araç kontrol biriminden oluşurlar. Bataryada depolanan enerji invertör aracılığıyla motora iletilir; motor bu enerjiyi dönme hareketine çevirerek aracı hareket ettirir. Frenleme sırasında motor jeneratör gibi çalışarak kinetik enerjiyi tekrar elektrik enerjisine dönüştürür ve bataryaya geri besler. Bu süreç rejeneratif frenleme olarak adlandırılır ve sistemin enerji verimliliğini artırır. Tüm bu işlevler, araç kontrol ünitesi tarafından yönetilerek güvenli, sessiz ve yüksek verimli bir sürüş sağlar (Sanguesa vd., 2021).



Şekil 2.2. Elektrikli aracın temel bileşenleri

Elektrikli araçların yaygınlaşmasında şarj altyapısı kritik bir rol oynamaktadır. Şarj sistemleri temelde iki ana tipe ayrılır: AC (Alternatif Akım) şarj ve DC (Doğru Akım) hızlı şarj. AC şarj genellikle ev tipi ve düşük güçlü bir şarj yöntemidir ve dolum süresi 4 ila 10 saat arasında değişir. DC hızlı şarj ise kısa sürede yüksek güç sağlayarak bataryanın yaklaşık %80'inin 30–60 dakika içinde dolmasını mümkün kılar. Şarj istasyonları

evlerde, iş yerlerinde ve halka açık alanlarda kurulabilmekte; akıllı şarj teknolojileri ise enerji dağıtımını optimize ederek şebeke üzerindeki yükü dengelemektedir. Ayrıca V2G teknolojisi, araçların şebekeye enerji geri verebilmesini sağlayarak enerji yönetiminde çift yönlü bir etkileşim oluşturur ve sürdürülebilirliği artırır (Liu vd., 2022).

Enerji depolama sistemleri, elektrikli araçların kalbini oluşturur. Bu sistemlerde genellikle lityum-iyon, nikel-metal hibrit ve katı hal bataryaları kullanılmaktadır. Batarya yönetim sistemi (BMS), hücrelerin sıcaklık, gerilim ve akım değerlerini sürekli olarak izleyerek bataryanın güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlar. Kullanım ömrünü tamamlamış bataryalar, enerji depolama tesislerinde yeniden değerlendirilebilir ve "ikinci ömür" uygulamalarıyla hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir kullanım sunar (Selmi vd., 2022).

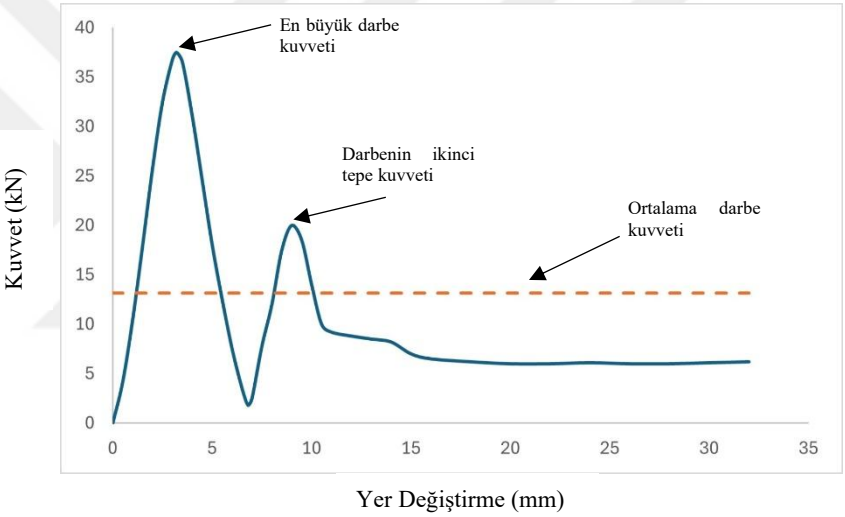
Elektrikli araçlar, karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Kullanım sırasında sıfır egzoz emisyonu üretmeleri, şehir içi hava kalitesini önemli ölçüde artırır. Bununla birlikte, batarya üretim sürecindeki karbon ayak izinin de dikkate alınması gerekmektedir. Yaşam döngüsü analizi yöntemiyle, elektrikli araçların üretimden geri dönüşüme kadar tüm aşamalardaki çevresel etkileri değerlendirilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla şarj edildiklerinde ise elektrikli araçlar sürdürülebilir ulaşımın temel bileşenlerinden biri hâline gelir. Ayrıca sessiz çalışmaları sayesinde şehirlerde gürültü kirliliğini azaltarak hem çevresel hem de toplumsal açıdan daha yaşanabilir bir ortam oluştururlar (Pamidimukkala vd., 2023).

2.1.2. Çarpışma Kutusu

Çarpışma kutuları, araçların tampon bölgelerinde konumlandırılarak çarpışma anında oluşan kinetik enerjiyi plastik deformasyon yoluyla sönümleyen ve böylece yolcu kabinine aktarılan darbe kuvvetlerini azaltarak güvenliği artıran otomotiv endüstrisindeki en kritik pasif güvenlik bileşenlerinden biridir (Dong vd., 2015). Temel işlevleri; enerji sönümleme, çarpışma kontrolü ve yolcu korumasıdır. Çarpışma kutularının varlığı, hem çarpışma sonrası onarım maliyetlerini azaltmakta hem de yolcu güvenliğini artırmaktadır (Xilu vd., 2022). Günümüzde otomobil üreticileri hem araç performansını hem de güvenliğini artırmak için çarpışma dayanıklılığı odaklı tasarımlar ve optimizasyon

yöntemleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu yapıların tasarımında amaç; minimum ağırlıkla maksimum enerji emme kapasitesine ulaşmaktır (Deng & Cao, 2022).

Kaza anında çarpışma kutularının enerji sönümleme performansı çok önemlidir. Gerekli enerjinin sönümlenmemesi durumunda gelen darbeler araç içerisine aktarılır ve ölümlü sonuçlar doğuran ağır hasarlar meydana gelir (Demirci & Yıldız, 2018). Çarpışma kutularının enerji sönümleme performansına ait darbe kuvvetinin yer değiştirme arasındaki ilişkiyi anlatan grafik Şekil 2.3'te verilmiştir. Çarpışma kutularının performansını tanımlamada sönümlenen toplam enerji, özgül enerji sönümlenmesi, en büyük darbe kuvveti, ortalama darbe kuvveti kullanılan ifadelerdir (Albak vd., 2021).



Şekil 2.3. Kuvvet Yer Değiştirme Grafiği

Sönümlenen toplam enerji: Kaza anında çarpışma kutusu tarafından sönümlenen enerjinin tamamını ifade eder. Bir başka ifade ile Denklem 2.1'de görüldüğü gibi darbe kuvvetinin yaptığı iş olarak da tasvir edilir. F darbe kuvvetini s ise yer değiştirme miktarını ifade eder (Albak vd., 2021).

$$E_T = \int_{s_b}^{s_s} F.\,ds \tag{2.1}$$

Özgül enerji sönümlenmesi: Sönümlenen toplam enerjinin, çarpışma kutusunun kazadan önceki ilk halinin kütlesine oranıdır ve denklem 2.2 ile ifade edilmiştir. m çarpışma kutusunun kütlesini ifade eder (Albak vd., 2021).

$$E_m = \frac{E_T}{m} \tag{2.2}$$

En büyük darbe kuvveti: Şekil 2.3'te gösterildiği gibi çarpışma sırasında, çarpışma kutusuna gelen en büyük kuvvettir ve deformasyonun başladığı kuvvet değeri olarak da tanımlanabilir. Çarpışma sırasında darbe ikinci tepe kuvvetine ulaşarak deformasyona devam edebilir bu durum çarpışma süresine, açısına malzemeye ve ürün tasarıma bağlı olarak değişiklik gösterir. Ortalama darbe kuvveti ise sönümlenen toplam enerjinin, toplam yer değiştirmeye oranı olarak tanımlanır (Albak vd., 2021).

Çarpışma kutularının istenen performansı gösterebilmeleri için hafif, yüksek mukavemetli ve yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olmaları beklenmektedir. Bu nedenle hem geometrik tasarımları hem de kullanılan malzeme türleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır (Özbek vd., 2020).

Çarpışma kutuları günümüzde ince cidarlı ve hibrit yapılar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Çarpışma kutularının performansı, büyük ölçüde geometrik tasarımlarına bağlıdır. Dairesel, kare, dikdörtgen ve altıgen kesitli ince cidarlı tüpler en yaygın kullanılan temel kesit türleridir (Yuan vd., 2019). Bu kesitlerin enerji sönümleme davranışı, deformasyon modlarına ve katlanma biçimlerine göre değişmektedir. Örneğin silindirik yapılar simetrik katlanma davranışı sergileyerek yüksek enerji sönümleme potansiyeli sunarken, kare ve altıgen kesitli tüpler belirli koşullarda daha yüksek özgül enerji emilimi (SEA) değerleri üretebilmektedir. Bununla birlikte, çok hücreli yapılar, biyo-ilhamlı yapılar, diyaframlı ve oluklu modeller gibi alternatif tasarımlar, enerjinin daha homojen dağıtılmasına ve çökme davranışının kontrol altına alınmasına olanak tanır (Abdullah vd., 2020). Çok hücreli çarpışma kutuları, iç bölmeleri sayesinde deformasyonu kontrollü bir şekilde yönlendirir. Hücresel yapı yoğunluğunun artması, katlanma modlarının simetrisini artırarak lokal burkulmaları önler. Bu tasarımlar, enerji emme verimliliğini yükseltirken yapısal stabiliteyi korur (Liang vd., 2022). Hibrit yapılar ise, ince cidarlı sistemlerin enerji emme kabiliyetini artırmak amacıyla geliştirilen

yapılardır. Bu yapılar genellikle bal peteği, kafes yapılar, sandviç, ökzetik veya köpük dolgu esaslıdır (Günaydın vd., 2023).

Malzeme seçimi, çarpışma kutularının performansını doğrudan belirler. Çelik, alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi metaller; hafiflik, mukavemet ve enerji emme dengesi açısından yaygın olarak kullanılır. Özellikle alüminyum alaşımları, yüksek özgül enerji emilimi nedeniyle öne çıkar (G. Wang vd., 2022). Metalik malzemelere ek olarak, kompozit ve hibrit malzemeler de enerji sönümleyici yapıların geliştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Termoplastik kompozitler, fiber takviyeli kompozitler (CFRP, GFRP) ve bu malzemelerin alüminyum tüplerle birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit sistemler literatürde geniş biçimde incelenmiştir (Magliaro vd., 2022). Ayrıca, alüminyum köpük, poliüretan (PU) köpük veya fonksiyonel derecelendirilmiş köpük (FGF) gibi dolgu malzemelerinin kullanılması, yapıların enerji sönümleme kapasitesini artıran etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Z. Zhang vd., 2018).

Yükleme yönü ve hızı da enerji emilimini etkileyen önemli parametrelerdir. Eksenel, eğik, yanal ve bükülme yüklemeleri farklı çarpışma senaryolarını temsil eder. Dinamik yükleme altında, bazı yapıların enerji emme kabiliyeti artarken, bazı kompozit yapılar kırılgan davranış nedeniyle performans kaybı gösterebilir. Bu durum, geometri ve malzeme türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir (Moghaddam vd., 2021).

Çarpışma kutularının tasarımında hem deneysel hem de sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında çekme testleriyle malzeme karakterizasyonu yapılmakta, ezme testleriyle (yarı statik veya dinamik) çarpışma performansı gözlemlenmektedir (Wesselmecking vd., 2022). Ancak fiziksel testlerin maliyetli ve zaman alıcı olması nedeniyle, sayısal analizler (Sonlu Elemanlar Yöntemi-FEA) daha yaygın biçimde tercih edilmektedir. FEA analizlerinde tasarım programlarıyla oluşturulan geometriler, Sonlu elemanlar programları ile ağ yapısı belirlenir ve sınır koşulları tanımlanır ve çözücü yazılımlarla çarpışma simülasyonları gerçekleştirilir. Analizlerin doğruluğu, elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla kontrol edilir (Saber vd., 2025).

Optimizasyon çalışmaları, çarpışma kutularının performansını artırmak ve ağırlığı azaltmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte, geometrik kesit türü, duvar

kalınlığı, koniklik açısı, diyafram konumu, dolgu malzemesi ve malzeme türü gibi parametreler tasarım değişkeni olarak kullanılır. Optimizasyon sürecinde genellikle özgül enerji emilimi (SEA) maksimize edilirken, maksimum çarpışma kuvveti (PCF) minimize edilir. Bu karşıt hedeflerin birlikte değerlendirilmesi için yapay zekâ optimizasyon yöntemleri ve makine öğrenmesi metotları kullanılır (Albak, 2022).

Sonuç olarak, çarpışma kutuları taşıt güvenliğinin temel bileşenlerinden biri olup, enerji sönümleme performansları; kullanılan malzeme, geometrik yapı ve optimizasyon stratejileriyle doğrudan ilişkilidir. Hafiflik, dayanım ve enerji sönümleme verimliliği arasındaki dengenin sağlanması, modern araç güvenliği tasarımlarında çarpışma kutularının en kritik mühendislik hedeflerinden biri olmayı sürdürmektedir (Chhantyal vd., 2025). Günümüzde, çarpışma kutularının performansını iyileştirmek amacıyla sonlu elemanlar analizi (FEA) tabanlı sayısal optimizasyon yöntemleri kullanılmakta; yapay zekâ destekli tasarım yaklaşımlarıyla malzeme dağılımı ve hücresel konfigürasyonlar optimize edilmektedir. Böylece, ağırlık azaltımı ile enerji sönümleme dengesi daha etkin şekilde sağlanabilmektedir (Jusuf vd., 2024).

2.1.3. Eklemeli imalat

Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak malzemenin katmanlar halinde biriktirilmesi yoluyla fiziksel nesnelerin oluşturulmasına dayanan yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesine olanak tanıması, malzeme israfını azaltması ve tasarım özgürlüğü sağlaması bakımından endüstride giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Zhou vd., 2024). Eklemeli imalat süreci, bir dijital modelin bilgisayar destekli tasarım ortamında oluşturulmasıyla başlar. Ardından model, katmanlı üretime uygun hale getirilmek üzere ince dilimlere ayrılır ve üretim cihazına gönderilir. Bu aşamada, seçilen eklemeli imalat yöntemi ve malzeme türüne bağlı olarak lazer, elektron ışını, ekstrüzyon veya bağlayıcı püskürtme gibi farklı teknikler kullanılabilir. Her bir katman ardışık biçimde bir öncekinin üzerine eklenerek üç boyutlu nesne tamamlanır (Kanishka & Acherjee, 2023).

Eklemeli imalat yöntemleri genel olarak malzeme türü, enerji kaynağı ve katman oluşturma prensiplerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu yöntemler arasında seçici lazer ergitme (SLM), seçici lazer sinterleme (SLS), sterolitografi (SLA), Ergitilmiş filament ile

üretim (FFF) ve elektron ışını ergitme (EBM) en yaygın kullanılanlardır (Simunec & Sola, 2022). Metal malzemeler için SLM ve EBM yöntemleri yüksek yoğunluklu ve mekanik dayanımı yüksek parçalar üretirken, polimer esaslı malzemelerde FFF ve SLA yöntemleri daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, toz yatağı füzyon ve yönlendirilmiş enerji biriktirme gibi yöntemler de özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde karmaşık ve yüksek performanslı bileşenlerin üretiminde tercih edilmektedir (Jacob vd., 2024).

Eklemeli imalatın sağladığı en önemli avantajlardan biri tasarım esnekliğidir. Geleneksel imalat yöntemlerinde üretimi zor veya imkânsız olan iç kanallı, kafes yapılı veya topolojik olarak optimize edilmiş geometriler, eklemeli imalat sayesinde kolaylıkla üretilebilmektedir. Bu durum, özellikle hafiflik ve enerji sönümleme kapasitesinin kritik olduğu uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, kişiselleştirilmiş üretim ve düşük hacimli seri üretim gerektiren alanlarda da eklemeli imalat büyük potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, üretim sürecinde ortaya çıkan katmanlı yapıya bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü, artık gerilmeler ve gözeneklilik gibi mikro yapısal kusurlar, mekanik özellikleri etkileyebilmekte ve ek işlem gereksinimlerini artırabilmektedir. Bu nedenle, eklemeli imalat sürecinin optimizasyonu, özellikle üretim parametrelerinin doğru seçimi ve ısıl işlem stratejilerinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Agnusdei & Del Prete, 2022).

Endüstriyel uygulama alanları açısından eklemeli imalat, özellikle havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji sektörlerinde yoğun biçimde kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe yakıt verimliliğini artırmak amacıyla hafif, dayanıklı ve karmaşık geometrili parçalar üretilirken, otomotiv sektöründe çarpışma kutusu, ısı değiştirici ve süspansiyon elemanları gibi yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip bileşenlerin üretimi ön plana çıkmaktadır. Biyomedikal alanda ise kişiye özel implantlar, protezler ve cerrahi planlama modelleri, eklemeli imalatın sunduğu esnek üretim imkânları sayesinde üretilmeye başlanmıştır. Enerji sektöründe ise türbin bileşenleri, ısı eşanjörleri ve yakıt hücresi parçalarının üretiminde eklemeli imalat teknikleri verimlilik ve dayanım açısından katkı sağlamaktadır (Kanishka & Acherjee, 2023).

Sonuç olarak, eklemeli imalat teknolojisi üretim anlayışında köklü bir dönüşüm yaratmış, tasarım ve mühendislik süreçlerinde yeni bir yol oluşturmuştur. Bu teknoloji, geleneksel üretim yöntemlerinin sınırlamalarını aşarak daha hafif, daha verimli ve daha işlevsel yapıların üretimini mümkün kılmaktadır. Ancak bu potansiyelin tam anlamıyla değerlendirilebilmesi için, malzeme davranışı, üretim parametreleri ve son işlem süreçleri arasındaki ilişkilerin daha iyi anlaşılması ve süreç optimizasyonunun sistematik biçimde geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, eklemeli imalatın gelecekteki gelişimi, yüksek performanslı malzemelerin kullanımı ve çok malzemeli üretim yaklaşımlarının birleşmesi ile daha da geniş bir uygulama yelpazesine ulaşacaktır (Sepasgozar vd., 2020).

Filamentlerin malzeme ekstrüzyonu ile ilgili eklemeli üretim teknolojilerinde kullanımı, 1989 yılında Stratasys tarafından geliştirilip patentlenen ergitilmiş filament ile üretim (FFF) sistemleri aracılığıyla başlamıştır. FFF, en yaygın şekilde tercih edilen eklemeli üretim yöntemidir. Bu tercihin başlıca nedenleri arasında sürecin güvenilir ve kolay olması, toz, lazer, çözücü kimyasallar gibi ekstra unsurlara gereksinim duymaması, donanım maliyetinin düşük olması ve filament çeşitliliğinin fazlalığı sayılabilir. FFF sürecinde filament, nozuldan çıkarak imalat platformu üzerinde katmanlar oluşturarak birikir. Filament, erime sıcaklığının altında sabit bir sıcaklıkta bir ısıtma bölmesi veya imalat platformu ile önceden ısıtılır. Oda sıcaklığından daha yüksek ama erime sıcaklığından daha düşük bir ısıtma uygulanmasının amacı, üretim malzemesinin kendisinin ya da destek tabanına bağlanmasını sağlamak ve termal gerilimi azaltmaktır. FFF makineleri, yükleme ve itme işlevlerine sahip olan ram ekstrüder tipi cihazlardır. Bu tür makineler aracılığıyla filament, enerji iletimini sağlar ve ısıtılmış kısımda ekstrüzyon gücünün hedefe ulaşmasına yardımcı olur (Kumar vd., 2020).

Geleneksel FFF makinelerinde filamentler genellikle sürücü dişliler tarafından çekilir; bu dişliler devamlı olarak ısıtma alanına malzeme aktararak, malzemenin nozul aracılığıyla dışarı çıkmasını sağlar. Bu nedenle, kullanılacak filamentin sürücü dişlilere karşı dayanıklı olabilmesi için özel mekanik özelliklere sahip olması büyük önem taşır. Güç iletimi pek çok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Öncelikle, motorların yeterli tork sağlayabilmesi kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, dişlilerin filamentle temasında güç iletimini sağlamak için yeterli sürtünmenin bulunması da şarttır. Filamentin dişliler tarafından sıkıştırıldığı süreçte yeterince dayanıklı olması, kayma ve kopma gibi

problemler yaşanmaması açısından beklenir. Son olarak, eritme bölmesine filamentin girmesi için sürücü dişliler arasında bükülme ya da tıkanma olmaması gerekmektedir (Dey vd., 2021).

PLA, mısır ve şeker kamışı gibi doğal kaynaklardan elde edilen laktik asit monomerlerinin birleştirilmesiyle meydana gelmektedir. Çevreye duyarlı bir materyal olarak biyolojik olarak parçalanabilir özellikler taşımaktadır. Baskı işlemleri çok uygulanabilir ve maliyet açısından avantajlıdır. Düşük esnekliği sebebiyle kırılgan bir yapıya sahiptir. Mekanik ve ısıl özellikleri ise tatmin edici değildir (Eryildiz, 2023).

ABS, yapısında birden fazla monomer (akrilinitril, bütadien ve stiren) bulundurduğundan dolayı kopolimer yapısına sahiptir, polibütadien, stiren ve akrilonitril monomerlerinin polimerleşmesi ile oluşan polimer moleküllerinden oluşur. Ekonomik ABS materyalleri kullanarak sağlam parçalar üretmek mümkündür. PLA materyaline kıyasla, baskı aşaması daha karmaşık bir süreçtir ve baskı sırasında rahatsız edici kokular oluşabilir (Yermurat vd., 2023).

PET, etilen glikol ve dimetil tereftalat monomerlerinin bir araya gelerek polimer yapıları geliştirmesiyle oluşur. Farklı PET türleri bulunsa da en yaygın tercih edilen çeşidi glikol ile zenginleştirilmiş polietilen tereftalat glikol (PETG) olarak bilinir. PETG, PLA gibi baskı süreçlerinde kullanım kolaylığı sağlarken, ABS kadar dayanıklıdır. Ancak, PETG malzemesi ultraviyole ışınlardan korunma sağlamaz ve zaman içinde malzemenin özelliklerinde değişimler gözlemlenebilir (Yermurat vd., 2023).

Bir poliamid türü olan naylon, yüksek moleküler ağırlığa sahip poliamid monomerleri ile elde edilmektedir. Naylonun değişik çeşitleri bulunmaktadır. Bu çeşitlerden PA6 ve PA66, FFF tekniğiyle kullanılmaktadır. Naylonun belirgin nitelikleri arasında dayanıklılık, elastikiyet ve yüksek sıcaklıklara dayanma yeteneği yer almaktadır. Ancak, bu özelliklerine ek olarak, baskı sürecinin zorluğu bu malzemenin kullanımını kısıtlamaktadır (Miguel vd., 2019).

2.1.4. Optimizasyon

Optimizasyon, belirli hedefler doğrultusunda bir sistemin en uygun duruma getirilmesini veya bir problemin en iyi çözümünün bulunmasını amaçlayan temel bir yaklaşımdır. Bu

yaklaşım, mevcut kaynakların en verimli biçimde kullanılarak istenen sonuçlara ulaşılmasını sağlar. En genel tanımıyla optimizasyon, belirli kısıtlar altında bir problemi çözmeyi ve amaç fonksiyonunu minimize ya da maksimize etmeyi hedefleyen bir arama ve karar verme mekanizmasıdır. Bu yönüyle optimizasyon, doğrudan "en iyiye ulaşma çabası" olarak tanımlanabilir (Heidari vd., 2019).

Bir optimizasyon problemi, genel olarak karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlar olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Karar değişkenleri, sistemin kontrol edilebilir parametrelerini temsil ederken; amaç fonksiyonu, sistemin performansını değerlendiren bir ölçüttür. Kısıtlar ise çözümün geçerlilik sınırlarını belirler. Bu unsurların matematiksel olarak ifade edilmesiyle optimizasyon modeli oluşturulur. Elde edilen model, bir sistemin tanımlı sınırlar içerisinde en iyi performansı göstermesi için hangi parametre değerlerinin seçilmesi gerektiğini ortaya koyar (Abualigah vd., 2021).

Optimizasyon, zaman, maliyet, verimlilik ve performans gibi faktörlerde iyileştirmeler sağlamayı hedeflediği için mühendislikten finansa, ekonomiden yapay zekâya kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle karmaşık sistemlerin modellenmesinde ve tasarım süreçlerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. Uygulama alanları arasında mühendislik tasarımı, üretim planlaması, enerji yönetimi, lojistik, tıp, sağlık sistemleri, bilgi güvenliği ve savunma teknolojileri yer almaktadır (Saremi vd., 2017).

Optimizasyon problemleri, amaç sayısına, kullanılan yöntem türüne ve fonksiyon yapısına göre sınıflandırılabilir. Amaç sayısına göre tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon olarak iki gruba ayrılır. Tek amaçlı optimizasyonda yalnızca bir hedef fonksiyonu optimize edilirken, çok amaçlı optimizasyonda birden fazla çatışan hedef arasında dengeli çözümler elde edilmeye çalışılır. Kullanılan yöntem türüne göre ise problemler deterministik (kesin) ve stokastik (rassal veya yaklaşık) yöntemlerle çözülebilir. Deterministik yöntemler, türev tabanlı matematiksel hesaplamalara dayanır ve aynı başlangıç koşullarında aynı sonucu verir. Ancak bu yöntemler çoğu zaman büyük boyutlu veya doğrusal olmayan problemlerde yetersiz kalabilmektedir. Bu tür problemlerde stokastik yöntemler, yani rastgelelik içeren yaklaşık yöntemler daha etkili sonuçlar sunar. Bu yöntemler, çözüm uzayını geniş biçimde tarayarak global optimuma yakın sonuçlar üretir (Sadollah vd., 2015).

Stokastik yöntemler genel olarak sezgisel ve meta-sezgisel yaklaşımlar olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Sezgisel algoritmalar, kesin çözüm garantisi sunmamakla birlikte, makul sürede yeterince iyi sonuçlar üreten yöntemlerdir. Bu algoritmalar genellikle probleme özgü bilgileri kullanarak hızlı ve uygulanabilir çözümler elde etmeyi hedefler. Ancak genelleştirilememeleri ve yerel optimumlarda takılma eğilimleri, sezgisel yöntemlerin daha gelişmiş biçimleri olan meta-sezgisel algoritmaların geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Askari vd., 2020).

Meta-sezgisel algoritmalar, doğadaki evrimsel süreçler, fiziksel olgular veya sürü davranışları gibi doğal mekanizmalardan esinlenerek tasarlanan üst düzey arama teknikleridir. Bu algoritmaların temel amacı, çözüm uzayında keşif ve sömürü dengesini kurarak küresel optimum çözüme ulaşmaktır. Keşif aşaması, geniş çözüm uzayında farklı bölgelerin taranmasını sağlayarak yerel optimumlardan kaçınmayı amaçlarken; sömürü aşaması, keşif sürecinde elde edilen en iyi çözümlerin çevresinde yoğun arama yaparak çözüm kalitesini artırır. Bu iki mekanizmanın dengeli biçimde işletilmesi, algoritmanın başarısını doğrudan belirler (Jain vd., 2018).

Meta-sezgisel algoritmalar genellikle iteratif bir süreç izler. İlk aşamada belirli sınırlar içinde rastgele bir çözüm popülasyonu oluşturulur. Her aday çözüm, probleme özgü amaç fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilir; en iyi çözümler belirlenir ve algoritmanın kurallarına göre konumlar veya parametreler güncellenir. Bu süreç, belirlenen iterasyon sayısına veya durdurma kriterine ulaşıncaya kadar devam eder. Meta-sezgisel yöntemlerin en önemli avantajı, karmaşık ve doğrusal olmayan problemlerde yüksek doğrulukta sonuçlar üretebilmeleridir (Mirjalili, 2015).

Sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar günümüzde mühendislik, lojistik, yapay zekâ, finans, enerji ve tıp gibi birçok alanda başarılı bir biçimde uygulanmaktadır. Örneğin mühendislikte yapısal tasarım ve üretim optimizasyonu, lojistikte rota planlama ve dağıtım ağları, yapay zekâda sinir ağlarının eğitimi, enerji sistemlerinde yük dengeleme ve üretim planlaması, sağlıkta görüntü işleme ve teşhis sistemleri gibi pek çok uygulama alanı bulunmaktadır. Ayrıca kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına duyarlılığı nedeniyle, bu algoritmalar bilgi güvenliği ve şifreleme gibi alanlarda da kullanılmaktadır (Huang vd., 2016).

Sonuç olarak optimizasyon, modern bilim ve mühendisliğin temel taşlarından biridir. Özellikle sezgisel ve meta sezgisel algoritmalar, klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık problemlerde güçlü alternatifler sunmakta ve küresel optimum çözümlere ulaşmada etkili araçlar olarak ön plana çıkmaktadır. Bu yönüyle optimizasyon, yalnızca bir matematiksel problem çözme yöntemi değil, aynı zamanda sistemlerin performansını artıran stratejik bir analiz aracıdır.

Çizelge 2.1. Optimizasyon Algoritmaları (Ayyarao vd., 2022)

Kategori	**Algoritma Adı**
Evrimsel tabanlı algoritmalar	Genetik Algoritma
	Diferansiyel Evrim
	Evrimsel Strateji
Sürü zekâsı tabanlı algoritmalar	Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması
	Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması
	Bakteriyel Besin Arama Optimizasyon Algoritması
	Gri Kurt Optimizasyon Algoritması
	Balina Optimizasyon Algoritması
	Güve–Alev Optimizasyon Algoritması
	Salp Sürüsü Optimizasyonu
	Çekirge Optimizasyon Algoritması
	Yapay Arı Kolonisi Optimizasyon Algoritması
	Yapay Arı Kolonisi Optimizasyon Algoritması
	Ateşböceği Optimizasyon Algoritması
	Guguk Kuşu Arama Optimizasyon Algoritması
	Küresel Arama Optimizasyon Algoritması
	Sosyal Örümcek Optimizasyon Algoritması
	Deniz Yırtıcıları Optimizasyon Algoritması
	Karga Arama Optimizasyon Algoritması
	Kril Sürüsü Optimizasyon Algoritması
	Şempanze Optimizasyon Algoritması
	Sincap Arama Optimizasyon Algoritması
	Çiçek Tozlaşma Optimizasyon Algoritması
	Manta Vatozu Beslenme Optimizasyonu
	Yelken Balığı Optimizasyon Algoritması
	İmparator Penguen Optimizasyon Algoritması
	Benekli Sırtlan Optimizasyon Algoritması
	Çakal Optimizasyon Algoritması
İnsan davranışı tabanlı algoritmalar	Grup Öğretimi Optimizasyonu

Çizelge 2.2. Optimizasyon Algoritmaları (Ayyarao vd., 2022) (devam)

	Emperyalist Rekabet Algoritması Öğretme-Öğrenmeye Dayalı Optimizasyon Lig Şampiyonu Algoritması Politik Optimizasyon Algoritması Zengin–Fakir Optimizasyon Algoritması Açlık Oyunları Arama Algoritması
Fizik tabanlı algoritmalar	Kütleçekim Arama Algoritması Benzetilmiş Tavlama Yapay Elektrik Alanı Optimizasyonu Sinüs–Kosinüs Algoritması Manyetik Optimizasyon Algoritması Türbülanslı Su Akışı Tabanlı Optimizasyon Algoritması Henry Gaz Çözünürlüğü Optimizasyon Algoritması Arşimet Optimizasyon Algoritması Havai Fişek Optimizasyon Algoritması Maden Patlatma Optimizasyon Algoritması
Hibrit algoritmalar	Sinüs–Kosinüs Harris Şahinleri Optimizasyon Algoritması Kendinden Uyarlamalı Diferansiyel Evrim Kapsamlı Öğrenmeli Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması Yerel Bilgi Tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması Hibrit İkili Karınca Aslanı Optimizasyon Algoritması Sinüs–Kosinüs ve Benekli Sırtlan Tabanlı Şempanze Optimizasyon Algoritması Gruplu Çekim Mekanizmalı Hibrit Ateşböceği Optimizasyon Algoritması Geliştirilmiş Güve–Alev Optimizasyon Algoritması

2.1.6. Kristal Yapı Algoritması

Bileşenleri (moleküller, atomlar veya iyonlar) düzenli ve tekrar eden üç boyutlu uzayda düzenlenmiş veya kristalografik bir düzene sahip katı mineraller kristal olarak adlandırılmaktadır. Kristal katılar çeşitli Şekillerde bulunabilir ve izotropik veya anizotropik özelliklere sahip olabilmektedir. Kristal kelimesinin Yunanca kökü "soğuktan donmuş" anlamına gelmektedir. Yunanlılar suyun bir süre çok düşük sıcaklıklarda tutulması durumunda yüksek sıcaklıklarda kararlı hale geleceğini düşünüyorlardı (Talatahari vd., 2021).

Kristalleri oluşturan parçacıkların düzenli yapısına ilişkin ilk çalışmalar 1619'da Johannes Kepler ve 1665'te Robert Hooke tarafından gerçekleştirilmiştir.1690'da Christine Hogens kalsit kristallerinin optik özelliklerini incelemiş ve kristallerin belirli bir şekle sahip çok küçük parçacıklardan oluştuğu hipotezini ileri sürmüştür. Kristaller için farklı fiziksel ve kimyasal formülasyonlar önerilmiş ve deneysel olarak araştırılmıştır. Kristallerin zengin simetrileri, insan yapımı birçok yapı, mekanizma ve sanat eserinin tasarım ve tasarımına ilham vermiştir (Talatahari vd., 2021).

Bir kristalin yapısında, atomların konumları belirli değildir ancak, önceden tanımlanmış noktaları kümesini temsil eden bir kafes yapısı yer almaktadır. Kristallerin yapısındaki atomların konumu, her bir kafes noktasıyla ilişkili atom grubu 'basis' tarafından belirlenmektedir (Talatahari vd., 2021).

Kafesler, kristalin sadece genel şeklini belirlemektedir, doğadaki farklı geometrik Şekillerden oluşturulabilirler. ‘Basis’ için, kafes içindeki atomların farklı konfigürasyonları düşünülebilir, burada atomların konumu diğer düzensiz desenlerin yanı sıra köşe noktalarında olabilir. Sayısal araştırmalar için bu durumun matematiksel bir temsilinin tanımlanması gerekmektedir (Talatahari vd., 2021).

Kristal yapı algoritmasının geliştirilmesi için kristal konfigürasyonları Bravais modeli ile tanımlanmıştır (Talatahari vd., 2021). Bu modelde, herhangi bir kafes noktasının konumu ile bir vektör ile tanımlandığı sonsuz kafes şekli dikkate alınarak periyodik bir kristal yapı tanımlanır:

$$r = \sum n_i a_i, \tag{2.3}$$

Denklem 2.3’te n_i bir tam sayıdır, a_i ana kristalografik yönler boyunca en kısa vektördür ve i kristal köşelerinin sayısıdır (Talatahari vd., 2021).

Matematiksel modelleme, kristallerin temel kavramlarının gerekli modifikasyonlarla birlikte kullanıldığı CSA'nın matematiksel modeli sunulmaktadır. Bu modelde, optimizasyon algoritmasının her bir aday çözümü uzayda tek bir kristal olarak kabul edilmektedir.

$$Cr = \begin{bmatrix} Cr_1 \\ Cr_2 \\ \vdots \\ Cr_i \\ \vdots \\ Cr_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^j & \dots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_1^j & \cdots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^1 & x_i^2 & \cdots & x_i^3 & \cdots & x_i^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^3 & \cdots & x_n^d \end{bmatrix}, \begin{cases} i = 1,2, \dots, n \\ j = 1,2, \dots, d \end{cases} \quad (2.4)$$

Burada n, kristallerin sayısıdır (aday çözümler) ve d problemin boyutudur. Bu kristallerin başlangıç konumları arama uzayında aşağıdaki gibi rastgele belirlenmektedir:

$$x_i^j(0) = x_{i,min}^j + \xi\left(x_{i,max}^j - x_{i,min}^j\right), \begin{cases} i = 1,2, \dots, n \\ j = 1,2, \dots, d \end{cases} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te $x_i^j(0)$ kristallerin başlangıç konumunu belirler; $x_{i,min}^j$ve $x_{i,max}^j$, i. aday çözümün j. karar değişkeni için sırasıyla minimum ve maksimum izin verilen değerlerdir ve ξ değeri [0,1] aralığında rastgele bir sayıdır.

Kristalografideki 'basis' kavramına dayanarak, köşelerdeki tüm kristaller ana kristaller olarak kabul edilmektedir, Cr_{main}, başlangıçta oluşturulan kristaller (aday çözeltiler) dikkate alınarak rastgele belirlenmektedir. Her adım için rastgele seçim sürecinin, mevcut Cr'nin çıkarılmasıyla belirlendiğine dikkat edilmektedir. En iyi konfigürasyona sahip kristal Cr_b olarak belirlenirken, rastgele seçilen kristallerin ortalama değerleri F_c ile gösterilmektedir.

Aday çözümlerin arama uzayındaki konumlarını güncellemek için, dört çeşit güncelleme işleminin aşağıdaki gibi belirlendiği temel kafes ilkeleri göz önünde bulundurulmaktadır:

(i) Basit kübik:

$$Cr_{new} = Cr_{old} + rCr_{main}, \quad (2.6)$$

(ii) En iyi kristale sahip kübik:

$$Cr_{new} = Cr_{old} + r_1 Cr_{main} + r_2 Cr_b, \quad (2.7)$$

(iii) Ortalama kristalleri olan kübik:

$$Cr_{new} = Cr_{old} + r_1 Cr_{main} + r_2 F_c, \quad (2.8)$$

(iv) En iyi ve ortalama kristallere sahip olan kübik:

$$Cr_{new} = Cr_{old} + r_1 Cr_{main} + r_2 Cr_b + r_3 F_c, \quad (2.9)$$

Burada, yukarıdaki dört denklemde, Cr_{new} yeni konumdur, Cr_{old} eski konumdur ve r, r_1, r_2 ve r_3 rasgele sayılardır.

Yerel ve global aramaların aynı anda yürütüldüğü bu algoritmada, meta-sezgiselliğin iki kritik özelliği olan keşif ve sömürünün (2.6) ve (2.9) üzerinden ele alınmaktadır. Değişkenlerin sınır koşullarını ihlal eden x_i^j çözüm değişkenlerini önlemek için, değişken aralığının dışındaki x_i^j için matematiksel bir işaretleme tanımlanmaktadır ve çözüm kümesi dışında tutulmaktadır. Sonlandırma kriteri, sabit sayıda yinelemeden sonra optimizasyon işleminin sonlandırıldığı maksimum iterasyon sayısına göre değerlendirilmektedir (Talatahari vd., 2021).

Kristal Yapı Algoritması (CSA)
Başla
İlk pozisyonların değerlerini rastgele oluştur(x_i^j)
Kristal (Cr_i)
Her bir kristalin uygunluk değerlerini hesapla
while (t<Maksimum iterasyon sayısı)
for i=1: ilk kristallerin sayısı
Cr_{main} tanımla
Eşitlik 2.4 ile yeni kristalleri belirle
Üret Cr_b
Eşitlik 2.5 ile yeni kristalleri belirle
Üret F_c
Eşitlik 2.6 ile yeni kristalleri belirle
Eşitlik 2.7 ile yeni kristalleri belirle
if yeni kristaller sınır şartlarına uymuyorsa
Yeni kristaller için pozisyon kısıtlarını kontrol et ve değiştir
end if
Yeni kristallerin uygunluk değerlerini hesapla
Eğer iyi bir çözüm bulunduysa en iyi çözümü güncelle
end for
t=t+1
end while
GB ye git
Son

Şekil 2.4. Kristal Yapı Algoritması Akış Şeması (Talatahari vd., 2021)

2.1.6. Kaotik haritalı mekanizmalar

Optimizasyon algoritmalarının performansını iyileştirmek amacıyla kullanılan kaotik haritalar, doğrusal olmayan sistemlerin sunduğu dinamik yayılımdan faydalanır. Bu yöntem, geleneksel yöntemlere kıyasla daha az zaman harcayarak daha kararlı sonuçlar üretir. Kaotik yapının sağladığı çeşitlilik, algoritmanın zayıf yakınsama ve yerel en iyi değere sıkışma gibi kronik problemlerini çözerek operasyonel verimliliği artırır. (Haro vd., 2025).

Kaotik sistemler, deterministik yapıya sahip olmalarına rağmen başlangıç koşullarına aşırı duyarlılık gösteren, düzensiz ve öngörülmesi zor davranışlar sergileyen dinamik sistemlerdir. Bu sistemlerin temel özelliği, rastgelelik içermemelerine rağmen uzun vadede kaotik bir davranış üretmeleridir. Kaos teorisi kapsamında incelenen bu yapılar, özellikle doğrusal olmayan denklemlerle tanımlanan sistemlerde ortaya çıkmakta ve karmaşık davranışların modellenmesinde önemli bir kuramsal çerçeve sunmaktadır (Shang-Guan vd., 2025).

Kaotik haritalar, kaotik sistemlerin ayrık zamanlı matematiksel temsilleri olup, basit denklemler aracılığıyla karmaşık ve düzensiz dizilerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Lojistik harita, Tent haritası, Sinüs haritası, Gauss haritası ve Chebyshev haritası, literatürde en yaygın kullanılan kaotik haritalar arasında yer almaktadır. Bu haritalar, kontrol parametrelerine bağlı olarak periyodik, yarı-kaotik veya tamamen kaotik davranışlar sergileyebilmekte ve bu özellikleri sayesinde rastgelelik gerektiren mühendislik uygulamalarında etkin biçimde kullanılabilmektedir (Mansouri vd., 2025).

Optimizasyon problemlerinde kaotik haritaların kullanımı, özellikle çözüm uzayının daha etkin taranması ve yerel minimumlara takılma probleminin azaltılması amacıyla ön plana çıkmaktadır. Geleneksel meta-sezgisel algoritmalar, rastgele sayı üreteçlerine dayalı olarak çözüm uzayını keşfetmektedir. Ancak bu rastgelelik, bazı durumlarda çözüm çeşitliliğinin azalmasına ve erken yakınsamaya neden olabilmektedir. Kaotik haritalar, deterministik yapıları sayesinde klasik rastgele sayı üreticilerine kıyasla daha homojen ve düzensiz dağılımlar üreterek keşif ve sömürü mekanizmaları arasında daha dengeli bir yapı sunmaktadır (Kmich vd., 2025).

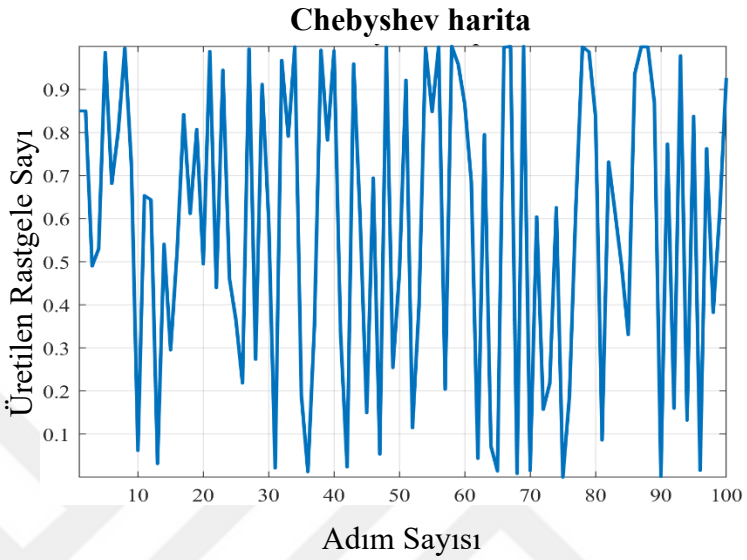
Son yıllarda yapılan çalışmalar, kaotik haritalarla hibritleştirilen meta-sezgisel algoritmaların, klasik versiyonlara kıyasla daha hızlı yakınsama sağladığını ve daha kararlı çözümler ürettiğini ortaya koymuştur. Özellikle yüksek derecede doğrusal olmayan, çok modlu ve karmaşık mühendislik problemlerinde kaotik mekanizmalar, çözüm kalitesini artıran önemli bir iyileştirme aracı olarak değerlendirilmektedir (Yuzgec, 2025).

Sonuç olarak, kaotik haritalı mekanizmalar, yapay zekâ tabanlı optimizasyon algoritmalarının performansını artıran güçlü bir araç olup; karmaşık mühendislik problemlerinde çözüm kalitesini ve yakınsama davranışını iyileştiren önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, kaos teorisinin optimizasyon alanına entegrasyonu, modern mühendislik tasarımlarında etkin ve yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Çizelge 2.3. Kaotik Haritalar(Mehta vd., 2023)

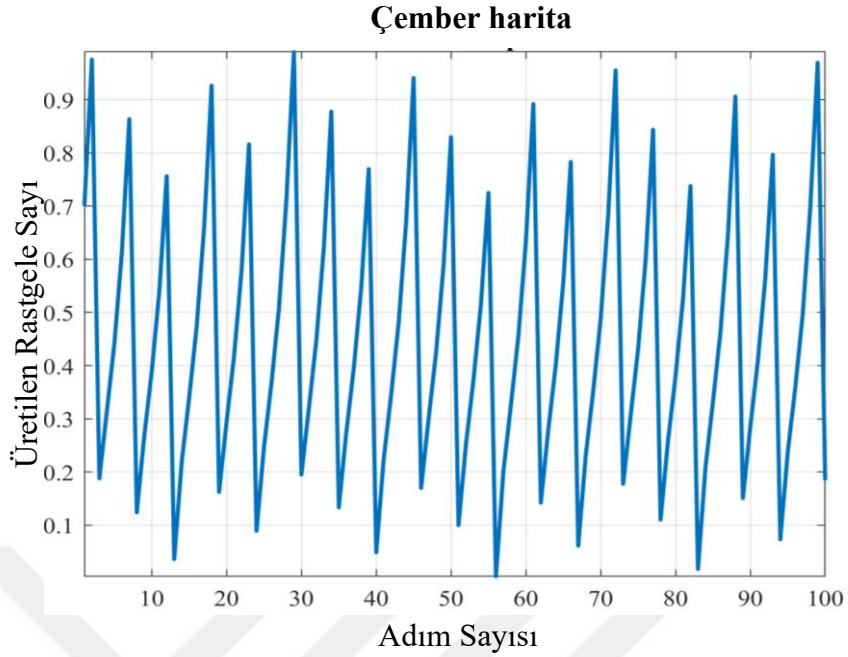
Chebyshev Harita	$x_{i+1} = \cos(i \cos^{-1}(x_i))$	$(-1,1)$
Çember Harita	$x_{i+1} = \mathrm{mod}\left(x_i + b - \left(\frac{a}{2\pi}\right)\sin(2\pi x_k), 1\right), a = 0{,}5\ b = 0{,}2$	$(0,1)$
Gauss Harita	$x_{i+1} = \begin{cases} 1 & x_i = 0 \\ \frac{1}{\mathrm{mod}(x_i, 1)} & \text{otherwise} \end{cases}$	$(0,1)$
İteratif Harita	$x_{i+1} = \sin\left(\frac{\alpha\pi}{x_i}\right), \alpha = 0{,}7$	$(-1,1)$
Lojistik Harita	$x_{i+1} = a x_i(1 - x_i), a = 4$	$(0,1)$
Parçalı Harita	$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{P} & 0 \le x_i < P \\ \frac{x_i - P}{0{,}5 - P} & P \le x_i < 0{,}5 \\ \frac{1 - P - x_i}{0{,}5 - P} & 0{,}5 \le x_i < 1 - P \\ \frac{1 - x_i}{P} & 1 - P \le x_i < 1 \end{cases}, P = 0{,}4$	$(0,1)$
Sinüs Harita	$x_{i+1} = \frac{a}{4}\sin(\pi x_i), a = 4$	$(0,1)$
Singer Harita	$x_{i+1} = \mu\left(7{,}86x_i - 23{,}31x_i^2 + 28{,}75x_i^3 - 13{,}302875x_i^4\right), \mu = 1{,}07$	$(0,1)$
Sinüzoidal Harita	$x_{i+1} = a x_i^2 \sin(\pi x_i), a = 2{,}3$	$(0,1)$
Çadır Harita	$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{0{,}7} & x_i < 0{,}7 \\ \frac{10}{3}(1 - x_i) & x_i \ge 0{,}7 \end{cases}$	$(0,1)$

Chebyshev haritası, ortogonal polinomlar dizisi ile ilişkili bir yapı olup matematiksel ifadesi Çizelge 2.2'de belirtilmiştir. Haritanın, 0,7 başlangıç değeri ve 100 iterasyon sonucunda elde edilen grafiği Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



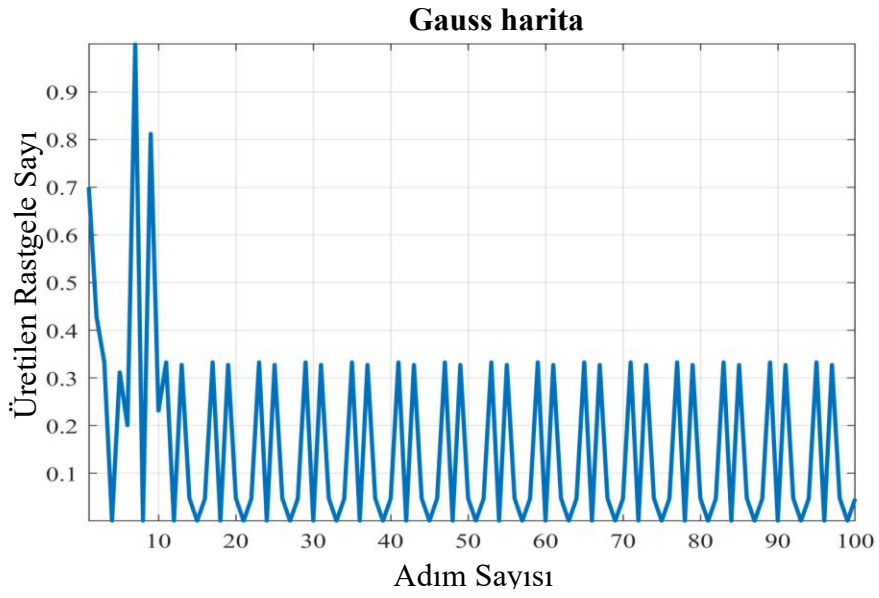
Şekil 2.5. Chebyshev harita grafiği

Çember haritası, optimizasyon problemlerinde sayı üretimi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır ve matematiksel ifadesi Çizelge 2.2'de sunulmuştur. Kontrol parametreleri a=0,5 ve b=0,2, başlangıç noktası ise 0,7 olarak belirlenmiş; bu değerlerle gerçekleştirilen 100 iterasyonluk harita grafiği Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



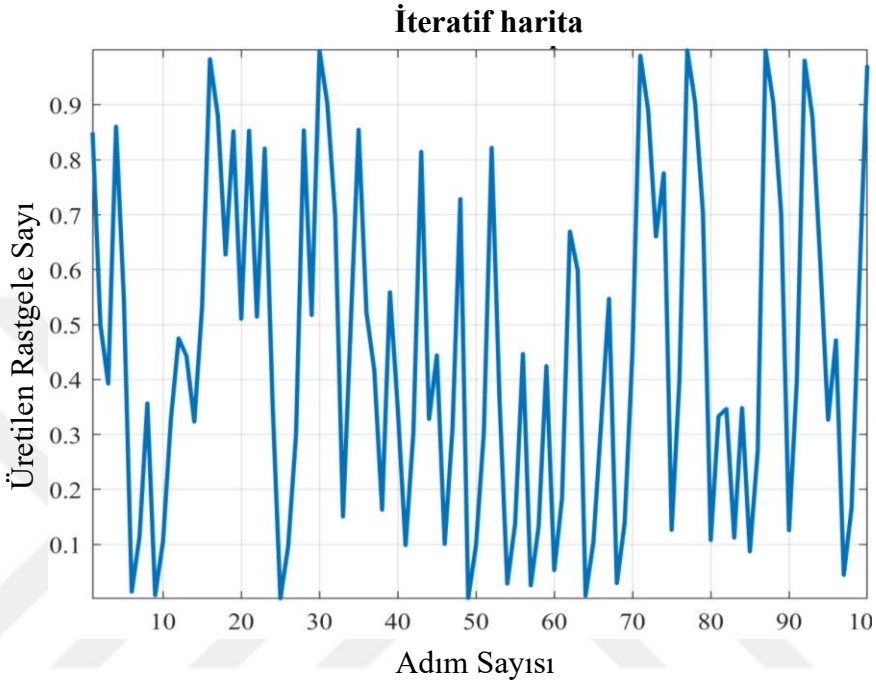
Şekil 2.6. Çember harita grafiği

Gauss haritalardan optimizasyon işlemlerinde, (0,1) aralığında rastgele sayı üretimi için sıklıkla yararlanılmaktadır. Matematiksel gösterimi Çizelge 2.2'de sunulan haritanın, 0,7 başlangıç noktası ve 100 iterasyon için oluşturulan grafiği Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



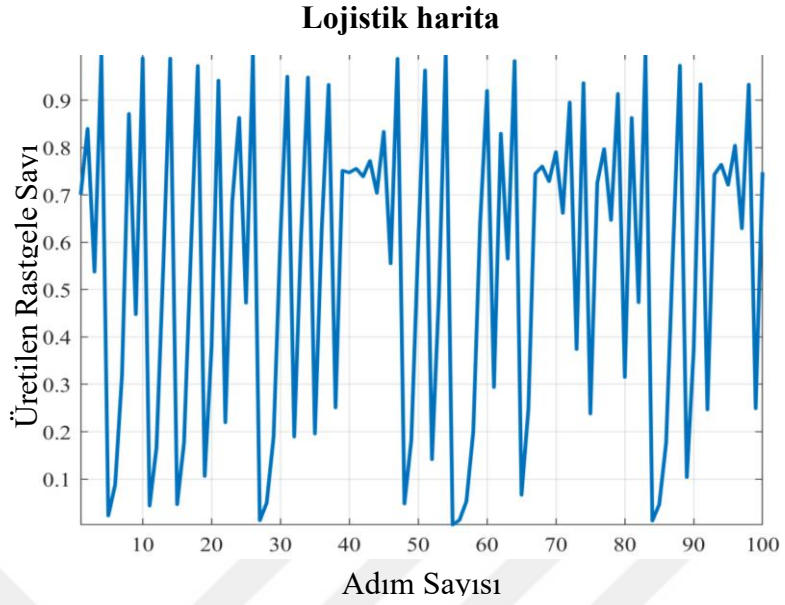
Şekil 2.7. Gauss harita grafiği

İteratif harita, optimizasyon süreçlerinde (0,1) aralığında rastgele sayı üretimi için sıklıkla kullanılmaktadır ve matematiksel gösterimi Çizelge 2.2'de belirtilmiştir. Başlangıç noktası 0,7 ve iterasyon sayısı 100 olarak belirlenen haritanın grafiği Şekil 2.8'de sunulmuştur.



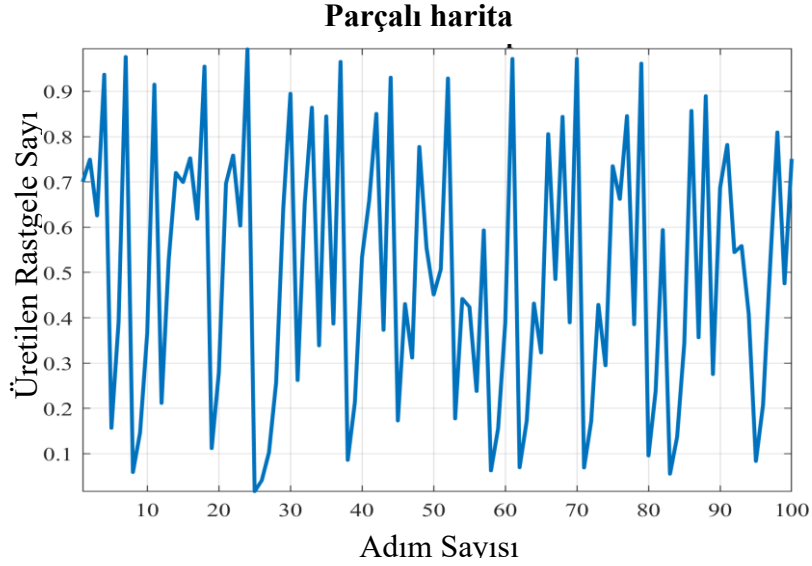
Şekil 2.8. İteratif harita grafiği

Lojistik haritanın matematiksel modeli Çizelge 2.2'de yer almaktadır. Haritanın (0,1) aralığında değer üreten ve a=4 parametre değeri, 0,7 başlangıç noktası ve 100 iterasyon sonucunda elde edilen grafiği Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



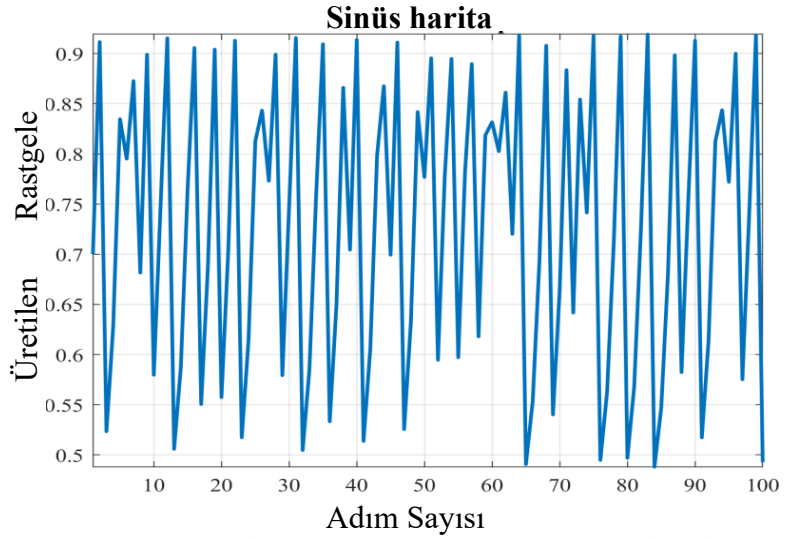
Şekil 2.9. Lojistik harita grafiği

Parçalı haritanın matematiksel modeli Çizelge 2.2'de yer almaktadır. Haritanın (0,1) aralığında değer üreten ve a=4 parametre değeri, 0,7 başlangıç noktası ve 100 iterasyon sonucunda elde edilen grafiği Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



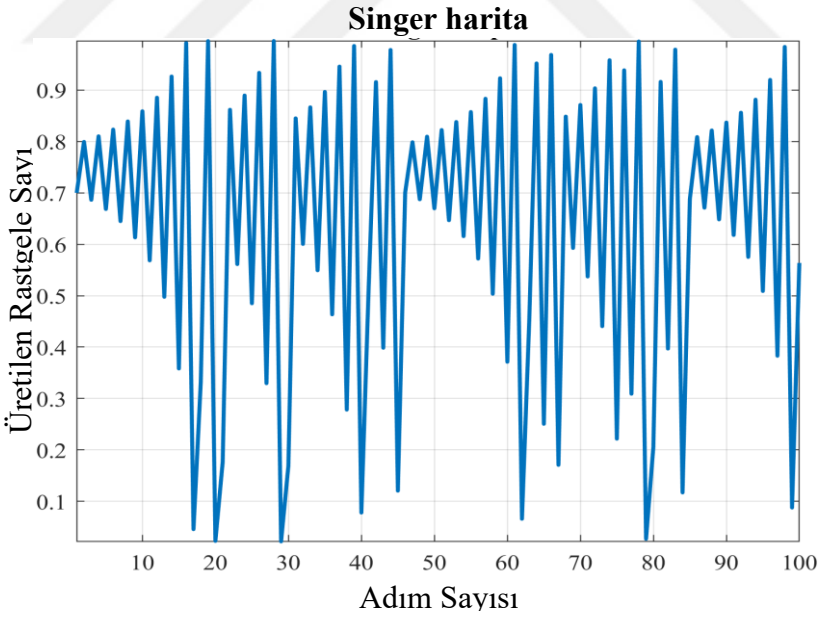
Şekil 2.10. Parçalı harita grafiği

Sinüs haritanın matematiksel modeli Çizelge 2.2'de yer almaktadır. Haritanın (0,1) aralığında değer üreten ve a=4 parametre değeri, 0,7 başlangıç noktası ve 100 iterasyon sonucunda elde edilen grafiği Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



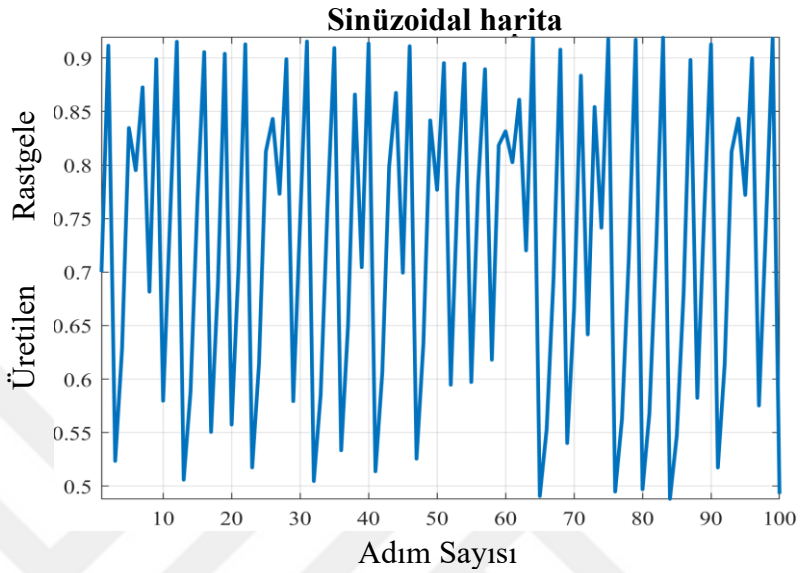
Şekil 2.11. Sinüs harita grafiği

Singer haritasının matematiksel gösterimi Çizelge 2.2'de belirtilmiştir. 0,7 başlangıç noktası ve 1,07 değeri kullanılarak oluşturulan 100 iterasyonluk harita grafiği Şekil 2.12'de yer almaktadır.



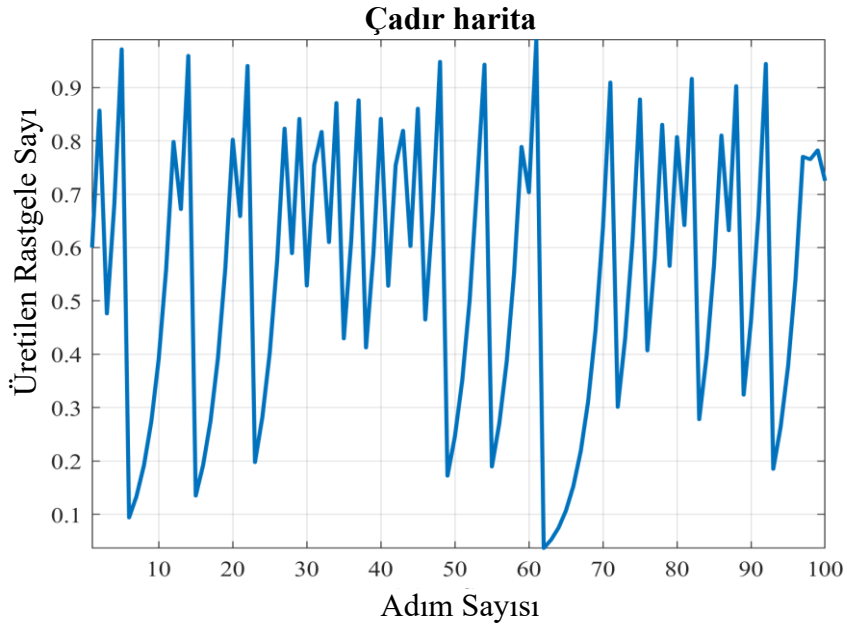
Şekil 2.12. Singer harita grafiği

Sinüzoidal haritanın matematiksel modeli Çizelge 2.1'de yer almaktadır. Haritanın a=2,3 parametre değeri, 0,7 başlangıç noktası ve 100 iterasyon sonucunda elde edilen grafiği Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Sinüzoidal harita grafiği

Çadır haritasının matematiksel modeli Çizelge 2.2'de yer almaktadır. 0,7 başlangıç değeri ve 100 iterasyon sonucunda elde edilen harita grafiği ise Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Çadır harita grafiği

2.2. Kaynak Araştırması

Mustafa vd. (2024) yaptıkları çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan 18,650 tip lityum iyon bataryaların (LIB) yandan çarpma durumlarında maruz kaldığı hasarı sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak incelemiştir. Toyota Camry araç modeli üzerinde 32 km/s hızla gerçekleştirilen simülasyonlarda, bal peteği yapısında bir takviye tasarımı önerilmiştir. Dört farklı senaryo (takviyesiz, Al7075-T6, AISI316L ve AHSS takviyeli) değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, yalnızca bir batarya modülünün ciddi hasar gördüğü, takviye yapısının ise batarya penetrasyonunu sırasıyla %22,4, %20,2 ve %19,4 oranında azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, enerji soğurma miktarında yaklaşık %18,7 oranında azalma sağlanmıştır. Çalışma, önerilen takviye yapısının LIB hücrelerinin yan darbelere karşı korunmasında etkili olduğunu göstermiştir (Mustaffa vd., 2024).

Pan vd. (2020) yaptıkları çalışmada, yüksek hızlı çarpışmalar sırasında batarya paketlerinde oluşan istenmeyen gerilmeler ve deformasyonların kısa devre veya yangın riski oluşturabileceğini belirterek, batarya muhafazalarının çarpışma dayanımını değerlendirmek amacıyla bilgisayar destekli simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Doğrusal olmayan dinamik sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve modal testlerle doğrulanmıştır. LS-DYNA yazılımı kullanılarak yapılan ezilme ve çarpışma simülasyonlarında üç farklı yüksek dayanımlı çelik malzeme karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, malzeme türü ve kalınlığının batarya muhafazasının darbe dayanımı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yapılan optimizasyon ile muhafaza ağırlığı azaltılırken çarpışma dayanımı da iyileştirilmiştir (Pan vd., 2022).

Pan vd. (2021) yaptıkları çalışmada, elektrikli araçlarda batarya paket muhafazalarının (BPE) mekanik dayanım ve çarpışma performansını artırmak amacıyla gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) kullanılarak hafifletilmiş bir tasarım geliştirmiştir. Çalışmada, doğrusal olmayan sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve modal testlerle doğrulanmıştır. Rastgele titreşim simülasyonları ve hassasiyet analizleriyle BPE bileşenlerinin uygun malzeme ve kalınlıkları belirlenmiştir. Ayrıca mekanik darbe ve yorulma ömrü analizleri gerçekleştirilmiş, optimize edilen modelin çarpışma dayanımı ezilme ve çarpışma simülasyonlarıyla doğrulanmıştır. Sonuçlar, optimize edilen yapının %10,41 oranında ağırlık azalımı sağlarken dinamik performansı koruduğunu göstermiştir. Bu sayısal

optimizasyon yönteminin, malzeme seçimi ve kalınlık belirleme süreçlerini hızlandırarak test maliyetlerini ve ürün geliştirme süresini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir (Pan vd., 2021).

Li vd. (2024) yaptıkları çalışmada, elektrikli araç batarya paketlerinin ön yüzeyine çarpabilecek yabancı cisimlerin neden olabileceği yapısal hasar ve güvenlik risklerini önceden tahmin edebilmek amacıyla veri odaklı mekanik güvenlik tahmin modelleri geliştirmiştir. Bu modeller, batarya paketi alt kabuğundaki deformasyonun sayısal analiz sonuçlarını kullanarak yapısal optimizasyonu desteklemektedir. Çalışmada doğrusal olmayan sonlu eleman modeli oluşturulmuş, modelin doğruluğu sınırlı mod analizleriyle doğrulanmıştır. Farklı çarpışma koşullarında elde edilen verilerle yanıt yüzey yöntemi ve makine öğrenmesi algoritmaları (destek vektör makineleri, Gauss süreç regresyonu ve yapay sinir ağları) kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmuştur. Sonuçlara göre, düşük hızlı önden çarpışma koşullarında en yüksek doğruluk oranını yapay sinir ağı modeli göstermiştir; modelin ortalama mutlak yüzde hatası tasarım alanı içinde %0,34, dışında ise %2,54 olarak bulunmuştur. Bu modelin, elektrikli araç batarya paketlerinin güvenilir tasarımı ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde etkili Şekilde kullanılabileceği belirtilmiştir (Li vd., 2024).

Zhang vd. (2023) yaptıkları çalışmada, batarya paket sistemlerinin (BPS) ezilme ve titreşim koşulları altındaki mekanik dayanımını değerlendirmek için iki amaçlı bir optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, doğrusal olmayan sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. BPS modüllerinin ezilme gerilmesi ve titreşim yorulma ömrü arasındaki ilişkiyi tanımlamak üzere üçüncü dereceden iki yanıt yüzey modeli oluşturulmuştur. Ardından, doğrusal ağırlıklandırma modeli ve NSGA-II algoritması kullanılarak iki amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, BPS bileşen kalınlıklarının optimal kombinasyonlarının belirlenmesiyle hem dayanıklılığın hem de güvenliğin artırılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, Pareto sınırında tanımlanan uygun çözüm aralığı, elektrikli araçlar için ezilme ve titreşim ortamlarında daha güvenilir ve sağlam batarya sistemleri tasarlanmasını sağlamıştır (X. Zhang vd., 2023).

Shaikh vd. (2024) yaptıkları çalışmada, karbon fiber kompozitlerin yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve korozyon direnci nedeniyle elektrikli araçlarda kullanılan metal bazlı

batarya muhafazalarının yerine potansiyel bir alternatif olabileceğini araştırmıştır. Çalışmada, farklı tasarım ve işlem parametreleri kullanılarak yüksek verimli sonlu elemanlar analizine (FEA) dayalı termoform simülasyonları gerçekleştirilmiş ve bu sanal üretimden elde edilen modeller üzerinde yan direk çarpışması senaryoları uygulanarak çarpışma dayanımı değerlendirilmiştir. Elde edilen geniş veri seti kullanılarak, batarya muhafazalarının çarpışma dayanımını tahmin edebilen makine öğrenmesi (ML) modelleri geliştirilmiştir. ML modelleri, çarpışma sırasında ezilme yükü verimliliği, enerji soğurma, içe göçme ve maksimum yavaşlama değerlerini tahmin etmede yüksek doğruluk (R^2> 0,97) göstermiştir. Çalışma, FEA ve ML tabanlı bu yaklaşımın karbon fiber kompozit bileşenlerin tasarım parametrelerinin optimizasyonunda etkili bir araç olduğunu ve diğer üretim teknolojilerine de uyarlanabileceğini ortaya koymuştur (Shaikh vd., 2024).

Memane K. vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada çarpışma kutularında kullanılan malzemelerin çarpışma dayanıklığına etkisini incelemek amacıyla literatür araştırması yapmışlardır. Yapılan çalışmada, çarpışma kutusu literatürlerinin genel olarak yüksek enerji emilimi sağlayan malzemeler ve tasarımlar kullandıklarını ifade etmişlerdir. Çarpışma kutularının üretiminde kullanılan malzemelerin enerjiyi kabiliyeti ve deformasyon özelliklerinden etkilendiğini ve buna bağlı olarak da çarpışma kutularının tasarımlarının enerji emilim kabiliyetini etkilediğini ifade etmişlerdir. Ayrıca son yıllarda kullanım alanı artan ve üstün mukavemet özelliklere sahip olan kompozit malzemelerinde çarpışma kutularında kullanılmaya başlandığını ifade etmişlerdir (Memane vd., 2023).

Hou W. vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada eklemeli imalat yöntemi kullanarak tasarlamış oldukları kafes yapıları karbon fiber takviyeli poliamid6 (PA6-CF) kompozit malzemeleri kullanarak üretmişlerdir. Üretilen altıgen, kagome, girintili ve üçgen petekler olarak tasarladıkları çarpışma kutularının enerji emilim değerlerini belirlemek amacıyla yarı-statik basma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testler sonucunda kagome tasarımlı çarpışma kutusunun maksimum enerji emilimi (SEA) değerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Testlerin tamamlanmasından sonra çarpışma kutularının sonlu elemanlar modeli ile validasyonu yapılmış ve yüksek oranda yakınsama sağlamışlardır. Daha sonra kagome tasarıma sahip olan çarpışma kutusunun maksimum SEA ve minimum kütleye sahip olacak Şekilde baskın olmayan sıralama genetik algoritması

(NSGA) ile optimizasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda optimizasyon algoritmalarının gerçek dünya problemlerinde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Hou vd., 2023).

Abdullah vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, yolcu güvenliği konusuna odaklanarak çarpışma kutularının tasarımları hakkında yapılan literatür çalışmalarını incelemişlerdir. Çalışmada araçlarda çarpışma kutularının ön tampon ile hareket ettiklerini, deformasyon mekanizması ve çarpışma anında ortaya çıkan kinetik enerjiyi emiliminin sağlanmasında kullanıldığını ifade etmişlerdir. Literatürde yapılan çalışmaların incelendiğinde yeni nesil üretim yöntemleri ve malzemelerin, enerji emici yapıların tasarımlarının enerji emilimine yüksek oranda katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir. Özellikle son yıllarda birçok endüstride kullanılan kafes yapıların çarpışma kutularında kullanılmasın hem hafiflik hem de enerji emilimi açısından oldukça katkısının olabileceğini ifade etmişlerdir (Abdullah vd., 2020).

Zhang X. vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada, metal malzeme kullanarak çok hücreli çarpışma kutularının enerji emilim değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada hücre tipinin çarpışma kutularının enerji emilimlerine etkisini incelemek amacıyla bası testleri gerçekleştirerek ezilme davranışlarını incelemişlerdir. Daha sonra testler, sonlu elemanlar analizi kullanılarak validasyonlarını yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda çarpışma kutularının tasarımları ve hücre sayılarının hem enerji emilimi değerlerine hem de ezilme davranışlarına etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir (X. Zhang & Zhang, 2013).

Qiu N. vd. (2016) yapmış oldukları çalışmada, çok hücreli dört farklı altıgen çarpışma kutularının enerji emilim değerlerini belirleyerek optimizasyonlarını yapmışlardır. Yapılan çalışmada çarpışma kutularının iç kısımlarında bulunan kesitler hem analitik formüllü hem de sonlu elemanlar analizleri ile vekil model oluşturmuşlardır. Optimizasyon sonucunda köşeden köşeye olarak tasarlanan çarpışma kutularının en düşük enerji emilimine sahip olduğu ve W2W çarpışma kutusunun en yüksek enerji emilimine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda analitik formüllerin çarpışma kutularının optimizasyonlarının gerçekleştirilmesinde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Qiu vd., 2016).

Deng vd. (2018) yaptıkları çalışmada, ince cidarlı yapıların enerji soğurma açısından yaygın kullanıldığını, ancak enkesit topolojisinin etkisinin literatürde yeterince incelenmediğini belirtmiştir. Bu amaçla sinüzoidal enkesite sahip yeni bir yanal oluklu tüp (LCT) tasarımı önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada, genlik (A), oluk sayısı (N) ve et kalınlığının (t) çarpışma dayanımını belirleyen temel parametreler olduğu görülmüştür. Sayısal sonuçlara göre N=6 ve N=8 için LCT'lerin özgül enerji emilimi (SEA), dairesel tüplere göre sırasıyla %27,91 ve %27,24 artmıştır. Ayrıca Latin hiper küp tasarımı ve Kriging modeliyle oluşturulan kestirim sonuçları, çok amaçlı optimizasyon (NSGA-II) sonunda LCT'lerin CT'lere kıyasla daha iyi çarpışma performansı sunduğunu ve optimize edilmiş CT'ye göre SEA'nın %53,65 arttığını göstermiştir (Deng vd., 2018).

Hou vd. (2023) yaptıkları çalışmada, çarpışma kutularının araç pasif güvenliğinde kritik bir rol oynadığını belirterek Al dış kabuk ve 3B baskılı örgü çekirdeğe sahip yeni bir çarpışma kutusu tasarımını incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, PA6/CF kompozitlerinden FFF yöntemiyle üretilen dört farklı örgü yapısı test edilmiş ve sıkıştırma deneyleri ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal analizlerde kagome yapısı en yüksek özgül enerji emilimi (SEA) değerine ulaşmıştır. Araştırmacılar daha sonra malzeme (E, σ, ε) ve geometrik parametrelerin (t, r) çarpışma performansına etkisini değerlendirmek için Isight ortamında bütünleşmiş bir "malzeme-yapı" modeli oluşturmuşlardır. Sonuç olarak, NSGA-II ile yapılan çok amaçlı optimizasyon, kütle azaltılırken enerji emiliminin artırılabileceğini göstermiş ve çarpışma kutularının tasarımı için önemli bir referans sunmuştur (Hou vd., 2023).

Abdullah vd. (2020) yaptıkları çalışmada, araç güvenliği çalışmalarında çarpışma kutularının kritik bir enerji emici eleman olduğunu vurgulamıştır. Yaptıkları çalışmada, çarpışma kutularının deformasyon mekanizmasını, kinetik enerjiyi nasıl sönümlediğini ve iyi çarpışma dayanımının nasıl elde edilebileceğini anlamak amacıyla kapsamlı bir literatür taraması sunmuşlardır. İnceleme yalnızca çarpışma kutusu yapısına odaklanmış ve bu yapıya ilişkin araştırmalarda kullanılan farklı yaklaşımlar özetlenerek alana yönelik bütüncül bir değerlendirme sağlanmıştır (Abdullah vd., 2020).

Wirawan vd. (2025) yaptıkları çalışmada, dairesel alüminyum-kompozit hibrit tüplerin çarpışma dayanımı ve enerji soğurma performansını incelemiştir. Yaptıkları çalışmada

ACT, CCT, HICT ve HOCT olmak üzere dört tüp konfigürasyonu eksenel bası altında test edilmiş ve takviye katmanlarının iç bükey kırılma ve burgu benzeri yeni kırılma modları oluşturarak burkulmayı azalttığı bulunmuştur. Bulgular, hibrit tasarımların enerji emme performansını belirgin Şekilde artırdığını; HOCT ve HICT konfigürasyonlarında sırasıyla %49,18 ve %43,78 iyileşme sağlandığını göstermiştir. HOCT en yüksek çarpışma dayanımını sergilemiş olup IPFC=42,36 kN, MF=24,66 kN ve CFE=0,49 değerlerine ulaşmıştır. Ancak çap ve takviye yoğunluğu arttığında SEA değerinin azaldığı rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, takviyeli kompozit tüplerin geliştirilmesinde önemli tasarım girdileri sunmaktadır (Sood & Wu, 2023).

Sarvestani vd. (2018) yaptıkları çalışmada, mimari hücresel çekirdeklerin hafif sandviç panellerin performansını geliştirmek için etkili bir alternatif olduğunu belirterek programlanabilir altı yüzlü hücrelere sahip 3B baskılı sandviç panellerin darbe performansını incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, hücre geometrisinin değiştirilmesiyle altıgen, dikdörtgen ve ökzetik topolojiler elde edilmiş; yarı-analitik yöntemler ve sonlu eleman analizleri düşük hızlı darbe davranışını değerlendirmek için kullanılmıştır. FFF yöntemiyle üretilen PLA paneller üzerinde yapılan deneyler, ökzetik sandviç panelin yüksek enerji soğurma kapasitesi ve darbe sonrası düşük kuvvet iletimi sayesinde enerji emme uygulamaları için en uygun seçenek olduğunu göstermiştir (Yazdani Sarvestani vd., 2018).

Bates vd. (2016) yaptıkları çalışmada, FFF yöntemiyle üretilen TPU esaslı hücresel yapıların esnek ve ayarlanabilir enerji emici uygulamalara uygun olduğunu göstermiştir. Yaptıkları çalışmada, farklı relatif yoğunluklarda (0,18–0,49) altıgen hücre dizilerinin tekrarlı sıkıştırma altında kırılmadan yoğunlaşmaya kadar dayanabildiği belirlenmiştir. Numuneler 0,03–0,3 s^{-1} gerinim hızlarında 0,01–0,34 J/cm^3 aralığında enerji sönümlemiş ve elastik olarak toparlanmıştır. Maksimum enerji emme verimliliği 0,36 olup geleneksel kapalı hücre poliüretan köpüklerle karşılaştırılabilir düzeydedir. Enerji soğurma davranışının gerinim hızına ve hücre yönlenmesine bağlı olduğu gösterilmiş ve FFF teknolojisinin operasyonel koşullara özel, dayanıklı hücresel mimariler geliştirme potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır (Bates vd., 2016).

Tabacu ve Ducu (2018) yaptıkları çalışmada, modern taşımacılıkta hafif ve güvenli yapı ihtiyacına yönelik olarak ince cidarlı yapılarda katkılı imalat uygulamalarını incelemiştir. Yaptıkları çalışmada ABS malzemeden FFF yöntemiyle üretilen çok hücreli insert yapılar çekme ve basma testleriyle karakterize edilmiş; -45°/0°/45°/90° istifleme düzeni sayısal modelleme için uygun bulunmuştur. Basma testlerinde hibrit yapı olarak eklenen alüminyum tüplerin enerji emme performansını artırdığı ve ezilme kuvvetinin daha kontrollü, kademeli bir profile dönüştüğü görülmüştür. Bu sonuçlar, dış destek elemanı ve çok hücreli çekirdek tasarımı optimize edilerek güvenlik amaçlı yapısal çözümler geliştirilebileceğini göstermektedir (Tabacu & Ducu, 2018).

Sood ve Wu (2023) yaptıkları çalışmada, COF esinli PLA ve ABS yapılarının FFF ile üretilerek yapısal değişimlerin enerji soğurma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada statik basma testleri sonucunda en yüksek enerjiyi eğilmeye dayalı yapının sönümlediği, en iyi dinamik elastik geri kazanımın ise yüzey yapısında elde edildiği belirlenmiştir. Katmanların tamamen çöktüğü kırılma modunun özgül değerler açısından en iyi performansı sağladığı; buna karşılık yükleme sırasında tabakalar arası delaminasyonun malzemeden bağımsız olarak enerji soğurma performansını düşürdüğü rapor edilmiştir (Sood & Wu, 2023).

Literatürde yer alan modern meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, karmaşık mühendislik problemlerinde daha iyi bir keşif ve sömürü dengesi sağlamak amacıyla doğadaki canlıların hayatta kalma stratejilerinden, fiziksel yasalardan ve insan davranışlarından esinlenen geniş bir yelpazeye yayılmıştır (Hussain vd., 2019). Bu kapsamda en geniş grubu oluşturan biyo-ilhamlı yöntemler; deniz avcılarının hareket stratejilerini modelleyen deniz yırtıcıları algoritması (Faramarzi vd., 2020) ve beyaz köpekbalığı optimizasyon algoritması (Braik vd., 2022), timsahların avlanma koordinasyonunu kullanan sürüngen arama algoritması (Yildiz vd., 2022), akbabaların navigasyon yeteneklerini taklit eden Afrika Akbabaları Optimizasyon Algoritması (Gürses vd., 2022) ve tavşanların saklanma davranışlarını esas alan Yapay Tavşan Optimizasyonu (L. Wang vd., 2022) gibi canlıların hayatta kalma mekanizmalarını matematiksel operatörlere dönüştürmüştür. Biyolojik süreçlerin ötesinde, evrenin temel yasaları da algoritmalara kaynaklık etmekte olup; ışığın kırınım prensiplerini kullanan Dalga Optiği Optimize Edici (Peng vd., 2026)(WOO), atomik elektron düzenini ve

moleküler yapıları temel alan Homo-nükleer Moleküller Optimizasyonu (Mahdavi-Meymand & Zounemat-Kermani, 2022) (HMO) ile ses dalgalarının yayılım enerjisini simüle eden Ses Enerjisi Optimize Edici (Taghavi & Shahrouzi, 2024) (SEO) fizik ve kimya tabanlı yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda ise bu doğal ilhamlara ek olarak, insan zekası ve sosyal dinamikler optimizasyon süreçlerine entegre edilmiş; özel kuvvetlerin operasyonel taktiklerini kullanan Özel Kuvvetler Algoritması (W. Zhang vd., 2023) (SFA), futbol antrenman disiplinini modelleyen Futbol Takımı Antrenman Algoritması (Tian & Gai, 2024)(FTTA), inşaat süreçlerindeki sosyal rekabeti taklit eden Çin Seddi İnşaat Algoritması (Zeng vd., 2025) (GWCA) yararlanan yenilikçi algoritmalar literatüre kazandırılmıştır.

İncelenen literatürde, farklı meta-sezgisel yöntemlerin kaotik operatörlerle nasıl hibritlendiklerine dair çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Meyve Sineği Optimizasyon Algoritması (FOA) üzerinde yapılan çalışmalarda, algoritmanın arama performansını artırmak için 14 farklı kaotik harita test edilmiş ve Chebyshev haritasının en başarılı sonucu verdiği raporlanmıştır (Mitić vd., 2015). Benzer Şekilde, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), kaotik haritalama ile en uygun değerine bağlı dinamik ağırlık mekanizmasını birleştirerek erken yakınsama problemini minimize etmeyi başarmıştır (Xu vd., 2018). Kaotik mekanizmaların algoritmaların sadece parametrelerine değil, aynı zamanda mutasyon ve öğrenme stratejilerine de entegre edildiği görülmektedir. Tek Adaylı Optimize Edici (SCO), başlangıç çözümünün kalitesini ve çeşitliliğini artırmak için Levy, Gauss ve Cauchy gibi kaotik fonksiyonları içeren bir mutasyon operatörü ile güçlendirilmiş (Yuzgec, 2025). Diferansiyel Evrim (DE) algoritmasında ise popülasyon başlatma aşamasında kaotik zıtlık tabanlı öğrenme kullanılarak başlangıç çeşitliliği maksimize edilmiştir (Haro vd., 2025).

Yeni nesil algoritmalarda da kaotik yaklaşımların etkisi belirgindir. Kara Kanatlı Çaylak Optimize Edici , çadır haritası tabanlı varyantı ve adaptif kaos ağırlıklandırma stratejisiyle mühendislik problemlerinde üstün performans sergilemiştir (Mansouri vd., 2025). Puma Optimize Edici Algoritması (POA), hem keşif hem de sömürü fazlarına kaotik haritaları entegre ederek robotik kontrol problemlerinde kararlılığı artırmıştır (Kmich vd., 2025). Ayrıca, Deniz Yırtıcıları Algoritması parametrelerinin kaotik haritalarla yönetildiği (Kumar vd., 2023), Zebra Optimizasyon Algoritması (ZOA)'nın polar koordinat

sisteminde iki boyutlu kaotik haritalama kullandığı (Shang-Guan vd., 2025) ve Serçe Arama Algoritması (SSA)'nın lojistik harita ile küresel arama yeteneğini geliştirdiği çalışmalar literatürde yer almaktadır (C. Zhang & Ding, 2021). Yapay sinir ağlarının eğitiminde kullanılan Sinir Ağı Algoritması (NNA) ise yerel optimumdan kaçmak için kaos teorisini rekabetçi öğrenme ile birleştirmiştir (Y. Zhang, 2021). Sonuç olarak, bu çalışmalar kaotik davranışın algoritmaların arama çeşitliliğini ve yerel optimuma takılmama yeteneğini önemli ölçüde artırdığını, böylece daha güvenilir küresel çözümler sağladığını göstermektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Test Numuneleri Üretim Süreci ve Testler

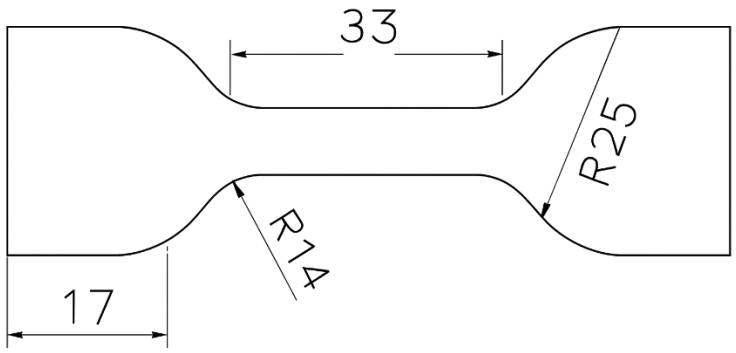
Test numuneleri Zortrax markalı M300 Dual serisi üç boyutlu yazıcı ile ergitilmiş filament ile üretim (FFF) yöntemi kullanılarak, Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), polilaktik asit (PLA) filamentler kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlemek amacıyla test numuneleri üretilmiştir. FFF prosesi için G-kodları Zortrax marka yazıcı için uyumlu olan Z-Suite programı kullanılarak elde edilmiştir. Test numunelerinin üretim parametreleri Çizelge 3.1'de sunulmuş ve tüm malzemeler için üretim prosesleri aynıdır.

Çizelge 3.1. Numune üretim parametreleri

	Nozul çapı	Doluluk oranı (%)	Nozul sıcaklığı	Tabla sıcaklığı	Baskı Açısı (-/-)
PLA	0,4	100	200	50	15-75° / 30-60°
ABS	0,4	100	220	60	15-75° / 30-60°

3.1.1. Çekme Testi

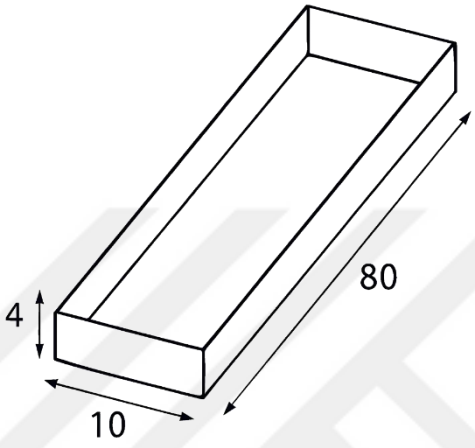
Malzemelerin mekanik özelliklerinin amacıyla çekme testleri Şekil 3.1'de sunulduğu gibi ISO 527-3 standartlarının belirttiği ölçüde 5 adet çekme numunesi üretilerek testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. ISO 527-3 çekme deneyi standardı

3.1.2. Üç Nokta Eğme Testi

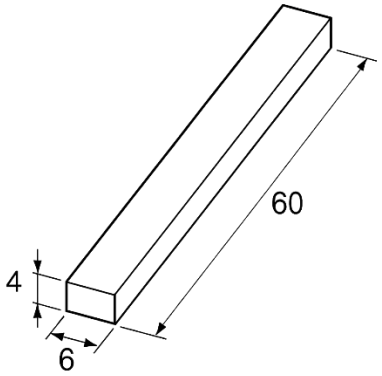
Malzemelerin mekanik özelliklerinin amacıyla üç nokta eğme testleri Şekil 3.2'de sunulduğu gibi TSEN ISO 178 standardına uygun 5 adet üç nokta eğme testi numunesi üretilerek ilgili testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. TS EN 178 üç nokta eğme standardı

3.1.3. Izod Testi

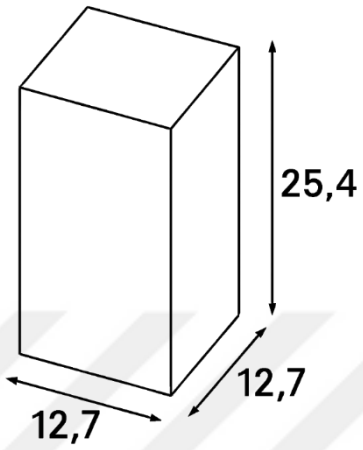
Malzemelerin mekanik özelliklerinden darbe dayanımlarını tespit etmek amacıyla ızod testi Şekil 3.3'te sunulduğu gibi ISO-179 standardına uygun ölçülerde 5 adet ızod testi numunesi üretilmiş ve ilgili testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. ISO 179 Izod testi standardı

3.1.4. Bası Testi

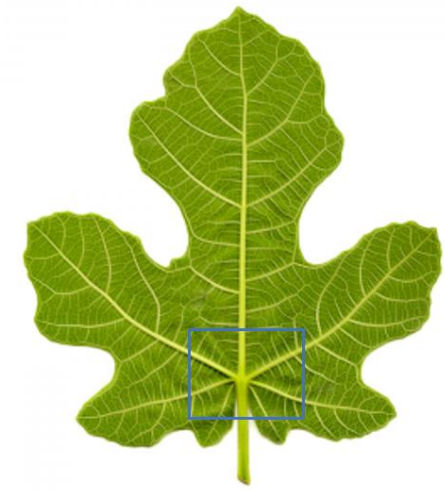
Malzemelerin mekanik özelliklerinin amacıyla bası testleri Şekil 3.4'te ifade edildiği gibi ASTM D695-15 standartlarında numuneler üretilerek ilgili test yapılmıştır.



Şekil 3.4. ASTM D695-15 Basma Testi Standarttı

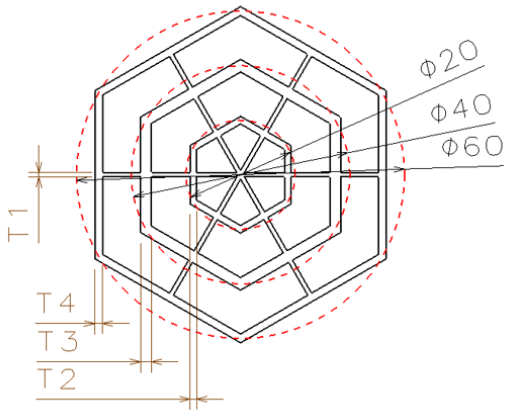
3.2. Çarpışma Kutusu Tasarımları

Tez çalışması kapsamında doğadan ilham alan tasarımlar gerçekleştirilmiştir. İncir yaprağından esinlenerek Şekil 3.5'te yer alan gövde yapısından 3 farklı tasarım oluşturulmuştur.



Şekil 3.5. İncir Yaprağı Modeli

Şekil 3.5'te İncir yaprağından esinlenen ilk model verilmiştir. 60 mm'lik bir dış çap referans alınmıştır ve 80 mm bir yükseklikle tasarım gerçekleştirilmiştir.



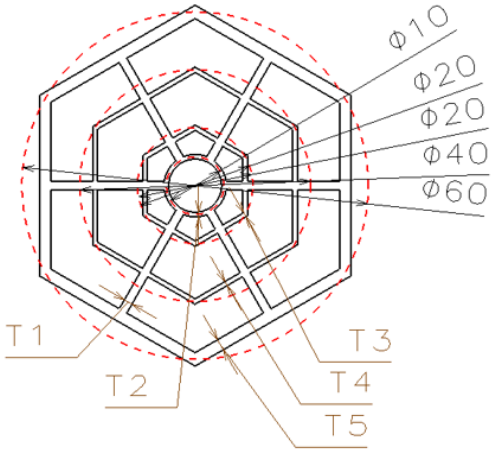
Şekil 3.6. İncir Model 1

Şekil 3.6'da yer alan T1, T2, T3 ve T4 kalınlıklarına ait alt ve üst limitler Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bu limitler optimizasyon çalışmasında kullanılacak limitlerdir.

Çizelge 3.2. İncir Model 1 Tasarım Değişkenleri

Değişkenler	**Alt Limit**	**Başlangıç Değeri**	**Üst Limit**
T1	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T2	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T3	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T4	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm

Şekil 3.7'de İncir yaprağından esinlenen ikinci model verilmiştir. 60 mm'lik bir dış çap referans alınmıştır ve 80 mm bir yükseklikle tasarım gerçekleştirilmiştir.



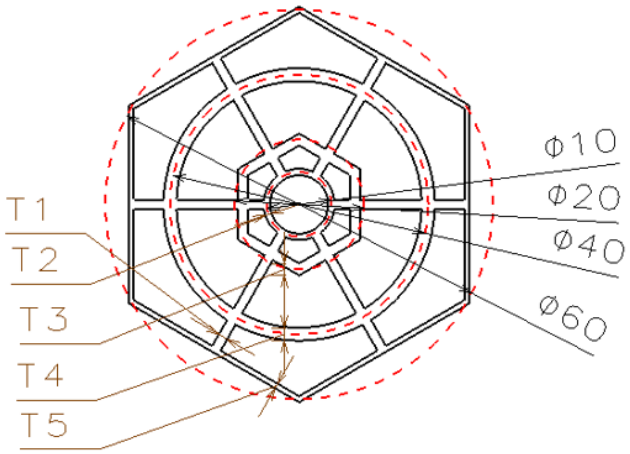
Şekil 3.7. İncir Model 2

Şekil 3.7'de yer alan T1, T2, T3, T4 ve T5 kalınlıklarına ait alt ve üst limitler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Bu limitler optimizasyon çalışmasında kullanılacak limitlerdir.

Çizelge 3.3. İncir Model 2 Tasarım Değişkenleri

Değişkenler	**Alt Limit**	**Başlangıç Değeri**	**Üst Limit**
T1	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T2	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T3	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T4	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T5	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm

Şekil 3.8'de İncir yaprağından esinlenen üçüncü model verilmiştir. 60 mm'lik bir dış çap referans alınmıştır ve 80 mm bir yükseklikle tasarım gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. İncir Model 3

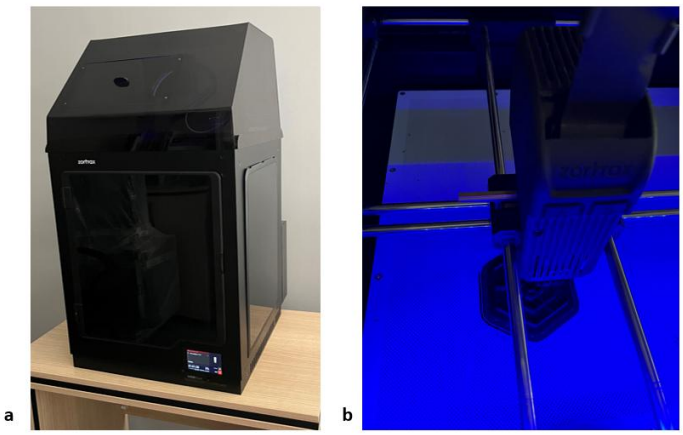
Şekil 3.8'de yer alan T1, T2, T3 ve T4 kalınlıklarına ait alt ve üst limitler Çizelge 3.4'te verilmiştir. Bu limitler optimizasyon çalışmasında kullanılacak limitlerdir.

Çizelge 3.4. İncir Model 3 Tasarım Değişkenleri

Değişkenler	Alt Limit	Başlangıç Değeri	Üst Limit
T1	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T2	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T3	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T4	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm
T5	0,8 mm	1,5 mm	2,2 mm

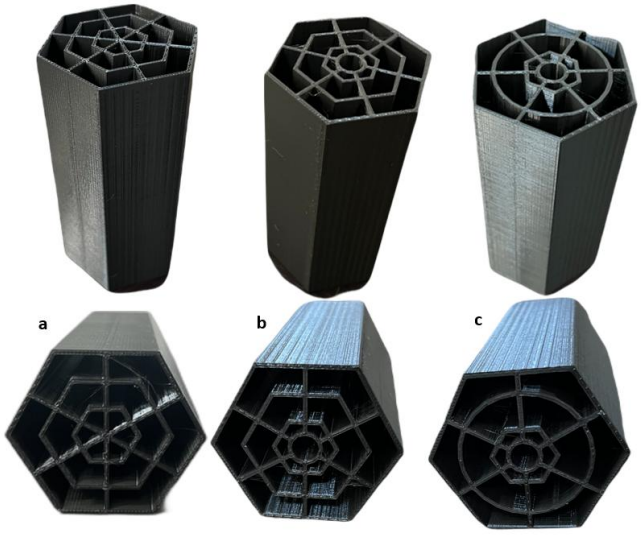
3.3. Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretim

İncir yaprağından esinlenerek tasarlanan çarpışma kutuları başlangıç değerleri kullanılarak Zortrax M300 Dual yazıcısından PLA ve ABS filament kullanılarak üretilmiştir. Şekil 3.9'da Zortrax M300 Dual yazıcısı ve üretim aşaması verilmektedir.



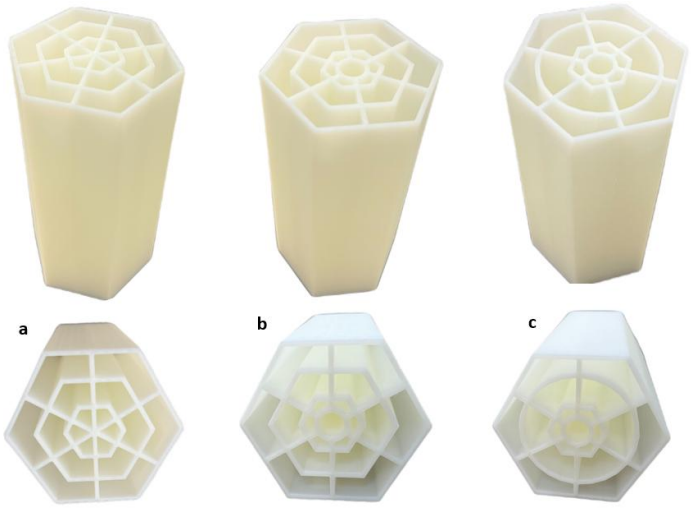
Şekil 3.9. a) Zortrax M300 Dual Yazıcı b) Üretim Aşaması

Şekil 3.10'da tasarlanana üç modele ait PLA malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen üretim verilmektedir.



Şekil 3.10. PLA a) İncir Model 1 b) İncir Model 2 c) İncir Model 3

Şekil 3.11'de tasarlanana üç modele ait ABS malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen üretim verilmektedir.



Şekil 3.11. ABS a) İncir Model 1 b) İncir Model 2 c) İncir Model 3

3.4. Optimizasyon algoritmaları için test problemleri

Optimizasyon algoritmalarının performansını test etmek amacıyla test fonksiyonları ve mühendislik problemleri kullanılmaktadır. Çizelge 3.5'te 23 adet test fonksiyonu alt limitleri üst limitleri ve boyutları verilmiştir. Basınçlı kap problemi, çeki bası yayı problemi, üç çubuk kafes problemi ve dişli güç iletim sistemi problemi test problemi olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5. Test Fonksiyonları

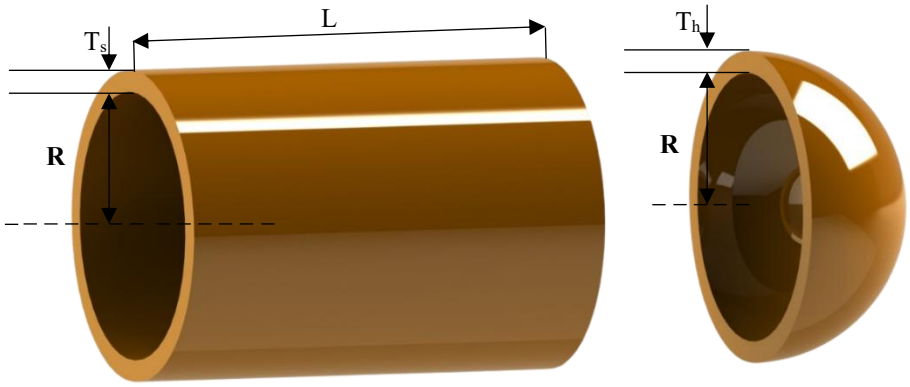
F.	Denklemler	Alt Limit	Üst Limit	Boyut	f_{min}
F1	$f(x) = \sum_{i=1}^{n} x_i^2$	-100	100	30	0
F2	$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \lvert x_i \rvert + \prod_{i=1}^{n} \lvert x_i \rvert$	-10	10	30	0
F3	$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j-1}^{n} x_i \right)^2$	-100	100	30	0
F4	$f(x) = max_i\{\lvert x_i \rvert, 1 \leq i \leq n\}$	-100	100	30	0
F5	$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100\left(x_{i+1} - x_i^2\right)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$	-30	30	30	0
F6	$f(x) = \sum_{i=1}^{n} ([x_i + 0{,}5])^2$	-100	100	30	0
F7	$f(x) = \sum_{i=1}^{n} i x_i^4 + random[0,1]$	-1,28	1,28	30	0
F8	$f(x) = \sum_{i=1}^{n} -x_i \sin\left(\sqrt{\lvert x_i \rvert}\right)$	-500	500	30	-418,9829x5
F9	$f(x) = \sum_{i=1}^{n} [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	-5,12	5,12	30	0
F10	$f(x) = -20exp\left(-0{,}2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \right) - exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	-32	32	30	0
F11	$f(x) = \frac{1}{4000}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \prod_{i=1}^{n} \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	-600	600	30	0

Çizelge 3.6. Test Fonksiyonları (devam)

F12	$f = \frac{\pi}{n}\left\{10\sin^2(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1}(y_i-1)^2\left[1+10\sin^2(\pi y_{i+1})\right] + (y_n-1)^2\right\} + \sum_{i=1}^{n} u(x_i,10,100,4)$ $u(x_i,a,k,m) = \begin{cases} k(x_i-a)^m & x_i > a \\ 0, & -a \le x_i \le a \\ k(-x_i-a)^m & x_i < -a \end{cases}$	-50	50	30	0
F13	$f(x) = 0{,}1\left\{\sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^{n}(x_i-1)^2\left[1+\sin^2(3\pi x_i+1)\right] + (x_n-1)^2\left[1+\sin^2(2\pi x_n)\right]\right\} + \sum_{i=1}^{n} u(x_i,5,100,4)$	-50	50	30	0
F14	$f(x) = \left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25}\frac{1}{j+\sum_{i=1}^{2}(x_i-a_{ij})^6}\right)-1$	-65,536	65,536	2	1
F15	$f(x) = \left(\sum_{i=1}^{11}\left[a_i - \frac{x_1(b_i^2+b_i x_2)}{b_i^2+b_i x_3+x_4}\right]^2\right.$	-5	5	4	0,00030
F16	$f(x) = \left(4x_1^2 - 2{,}1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - x_2^2 + 4x_2^4\right.$	-5	5	2	-1,0316
F17	$f(x) = \left(x_2 - \frac{5{,}1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 + 10\left(1-\frac{1}{8\pi}\right)\cos x_1 + 10$	-5	5	2	0,398
F18	$f(x) = [1+(x_1+x_2+1)^2(19-14x_1+3x_1^2-14x_2+6x_1x_2+3x_2^2)] \times [30 + (2x_1-3x_2) \times (18-32x_1+12x_1^2+48x_2-36x_1x_2+27x_2^2)]$	-2	2	2	3
F19	$f(x) = -\sum_{i=1}^{4} c_i \exp\left(-\sum_{j=1}^{3} a_{ij}(x_j-p_{ij})^2\right)$	1	3	3	-3,86
F20	$f(x) = -\sum_{i=1}^{4} c_i \exp\left(-\sum_{j=1}^{6} a_{ij}(x_j-p_{ij})^2\right)$	0	1	6	-3,32
F21	$f(x) = -\sum_{i=1}^{5}[(X-a_i)(X-a_i)^T + c_i]^{-1}$	0	10	4	-10,1532
F22	$f(x) = -\sum_{i=1}^{7}[(X-a_i)(X-a_i)^T + c_i]^{-1}$	0	10	4	-10,4028
F23	$f(x) = -\sum_{i=1}^{10}[(X-a_i)(X-a_i)^T + c_i]^{-1}$	0	10	4	-10,5363

3.4.1. Basınçlı Kap Tasarım problemi

Basınçlı kap tasarım problemi, iç basınca maruz kalan silindirik bir kabın güvenli ve ekonomik biçimde tasarlanmasını amaçlayan klasik bir kısıtlı optimizasyon problemidir. Bu problemde hedef, belirlenen dayanım ve hacim gereksinimleri sağlanırken toplam üretim maliyetinin veya yapısal kütlenin minimize edilmesidir. Ts basınçlı kap malzeme kalınlığını, Th kapak kalınlığını, R iç yarıçapını ve L kabın silindirik kısmının uzunluğunu ifade etmektedir. Basınçlı kap tasarım probleminin geometrik yapısı ve temel boyutları Şekil 3.12'de gösterilmektedir(Nadimi-Shahraki vd., 2021).



Şekil 3.12. Basınçlı kap problemi

$$\min f(x) = 0{,}6224T_sRL + 1{,}7781T_hR^2 + 3{,}1661{T_s}^2R + 19{,}84{T_s}^2R \tag{3.1}$$

Kısıt fonksiyonları:

$$g_1(x) = -T_s + 0{,}0193R \leq 0 \tag{3.2}$$

$$g_2(x) = -T_h + 0{,}00954R \leq 0 \tag{3.3}$$

$$g_3(x) = -\pi LR^2 - \frac{4}{3}\pi R^3 + 1296000 \leq 0 \tag{3.4}$$

$$g_4(x) = L - 240 \leq 0 \tag{3.5}$$

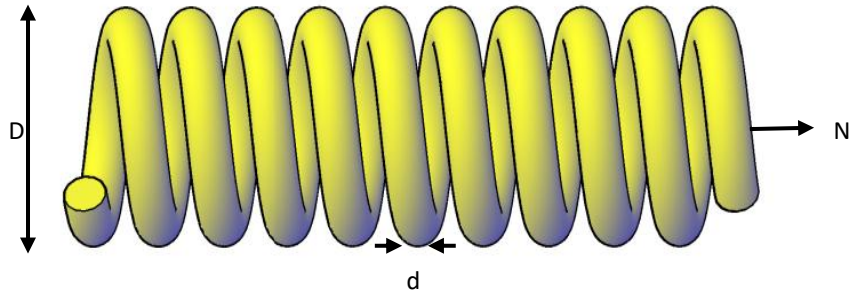
$$10 \leq R, L \leq 200 \tag{3.6}$$

$$1 \times 0{,}0625 \leq T_s, T_h \leq 99 \times 0{,}0625 \tag{3.7}$$

3.4.2. Çeki-Bası yayı tasarım problemi

Çeki–bası yayı tasarım problemi, mekanik sistemlerde yay elemanlarının minimum ağırlık veya hacimle güvenli şekilde çalışmasını hedefleyen bir optimizasyon problemidir. Bu problemde amaç, belirli yük koşulları altında çalışan yayın kütlesini minimize etmektir. Problemin kısıtları; maksimum kayma gerilmesi, burkulma sınırı, minimum doğal frekans ve geometrik sınırlamalardan oluşmaktadır. Problemde tasarım değişkenleri d tel çapını, D ortalama yay çapını, N sarım sayısını ifade etmektedir. Problemde yay ağırlığının minimum olması istenmektedir. Kayma gerilmesi, yayda oluşan yer değiştirme ve frekans değerleri kısıt fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Çeki-

bası yayı tasarım probleminin geometrik yapısı ve temel boyutları Şekil 3.13'te gösterilmektedir(Hashim vd., 2020).



Şekil 3.13. Çeki-Bası yayı tasarım problemi

$$\min f(x) = (N+2)Dd^2 \tag{3.8}$$

Kısıt fonksiyonları:

$$g_1(x) = 1 - \frac{D^3 N}{71785d^4} \leq 0 \tag{3.9}$$

$$g_2(x) = \frac{4D^2 - dN}{12566(Dd^3 - d^4)} + \frac{1}{5108d^2} \leq 0 \tag{3.10}$$

$$g_3(x) = 1 - \frac{140{,}45d}{ND^2} \leq 0 \tag{3.11}$$

$$g_4(x) = \frac{d+D}{1{,}5} - 1 \leq 0 \tag{3.12}$$

$$0{,}05 \leq d \leq 2 \tag{3.13}$$

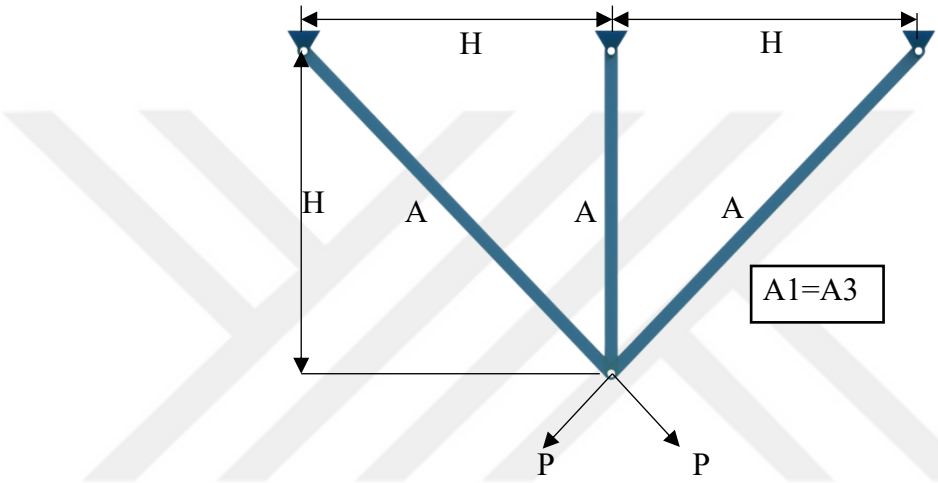
$$0{,}25 \leq D \leq 1{,}3 \tag{3.14}$$

$$2 \leq N \leq 15 \tag{3.15}$$

3.4.3. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi

Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi, yapısal optimizasyon alanında sıklıkla kullanılan temel test problemlerinden biridir. Bu problemde amaç, belirli dış yükler altında çalışan kafes yapının toplam ağırlığını minimize etmektir. Kafes elemanlarının kesit alanları

tasarım değişkenleri olarak belirlenirken, elemanlarda oluşan normal gerilmeler ve düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler kısıt fonksiyonlarını oluşturmaktadır. Tepki kuvvetleri (P1) ve (P2) olmak üzere iki tasarım değişkeni, güçlendirme genişliği (A1) ve güçlendirme aralığı (A2) olmak üzere iki parametre ile eğilme, sehim ve gerilme olmak üzere üç kısıt fonksiyonuna tabi tutulur. Üç çubuk kafes yapı tasarım probleminin geometrik yapısı ve temel boyutları Şekil 3.14'te gösterilmektedir(Kamboj vd., 2020).



Şekil 3.14. Üç çubuk kafes yapısı tasarım problemi

$$\min f(x) = \left(2\sqrt{2A_1} + A_2\right) * H \tag{3.16}$$

Kısıt fonksiyonları:

$$g_1(x) = \frac{\sqrt{2}A_1 + A_2}{\sqrt{2}A_1^2 + 2A_1A_2} P - \sigma \leq 0 \tag{3.17}$$

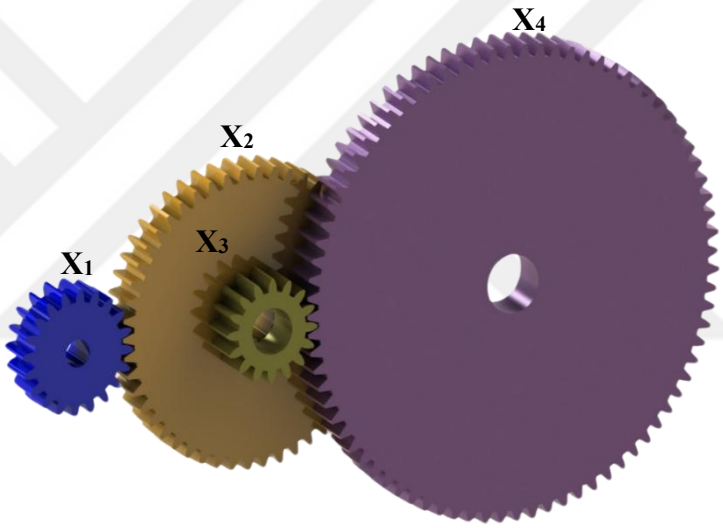
$$g_2(x) = \frac{A_2}{\sqrt{2}A_1^2 + 2A_1A_2} P - \sigma \leq 0 \tag{3.18}$$

$$g_3(x) = \frac{1}{A_1 + \sqrt{2}A_2^2} P - \sigma \leq 0 \tag{3.19}$$

$$H = 100\ cm, P = \sigma = 2\ kN/cm^3 \tag{3.20}$$

3.4.4. Dişli güç iletim problemi

Dişli güç iletim problemi, mekanik sistemlerde gücün ve hareketin güvenli biçimde aktarılmasını esas alan çok kısıtlı bir optimizasyon problemidir. Bu problemde amaç, belirlenen tork ve güç gereksinimleri altında çalışan dişli sisteminin ağırlığını veya hacmini minimize etmektir. Dişli modülü, diş sayıları, yüzey genişliği ve mil çapları tasarım değişkenleri olarak tanımlanmaktadır. Her dişli (x1), (x2), (x3), (x4) için diş sayısı ile ilgili dört tasarım değişkeni vardır. Dişli güç iletim problemi tasarım probleminin geometrik yapısı ve temel boyutları Şekil 3.15'te gösterilmektedir(Kamboj vd., 2020).



Şekil 3.15. Dişli güç iletim tasarım problemi

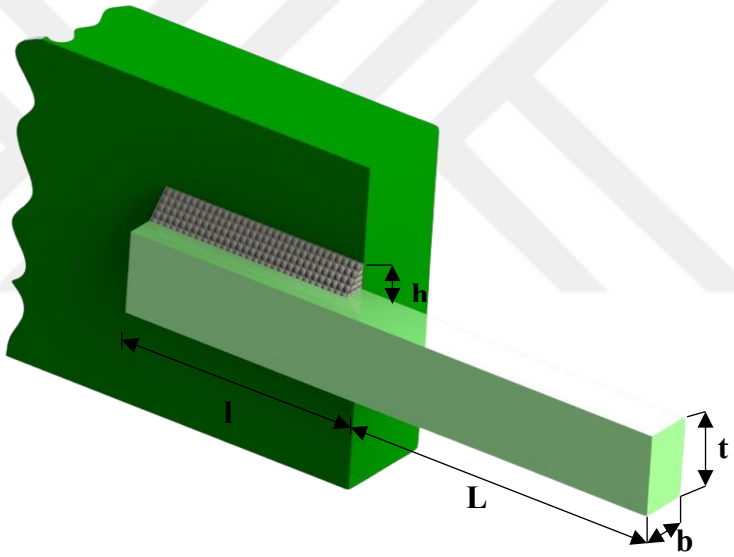
$$\min f(x) = \left(\frac{1}{6{,}931} - \frac{x_2 x_3}{x_1 x_4}\right)^2 \tag{3.21}$$

Kısıt fonksiyonları:

$$12 \leq x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 60 \tag{3.22}$$

3.4.5. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi

Kaynaklı kiriş problemi, kaynaklı bir bağlantının maliyet, dayanım ve deformasyon kriterleri dikkate alınarak optimize edilmesini amaçlayan klasik bir mühendislik tasarım problemidir. Bu problemde hedef, kaynak ve kiriş geometrisine bağlı toplam imalat maliyetinin minimize edilmesidir. Kaynak kalınlığı (h=$x1$), kaynak uzunluğu (l=$x2$), kiriş yüksekliği (t=$x3$), kiriş genişliği (b=$x4$) tasarım değişkenleri olarak belirlenmiştir. Kaynaklı kiriş tasarım problemi tasarım probleminin geometrik yapısı ve temel boyutları Şekil 3.16'da gösterilmektedir(Nadimi-Shahraki vd., 2021).



Şekil 3.16. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi

$$\min f(x) = 1{,}10471{x_1}^2 x_2 + 0{,}04811 x_3 x_4 (14 + x_2) \tag{3.23}$$

Kısıt fonksiyonları:

$$g_1(x) = \tau(x) - \tau_{max} \leq 0 \tag{3.24}$$

$$g_2(x) = \sigma(x) - \sigma_{max} \leq 0 \tag{3.25}$$

$$g_3(x) = \delta(x) - \delta_{max} \leq 0 \tag{3.26}$$

$$g_4(x) = P - P_c(x) \leq 0 \tag{3.27}$$

$$g_5(x) = x_1 - x_4 \leq 0 \tag{3.28}$$

$$g_6(x) = 1{,}10471{x_1}^2 x_2 + 0{,}04811 x_3 x_4 (14 + x_2) \leq 0 \tag{3.29}$$

$$g_7(x) = 0.125 - x_1 \leq 0 \tag{3.30}$$

$$\tau(x) = \sqrt{(\tau')^2 + 2\tau'\tau'' \frac{x_2}{2R} + (\tau'')^2}, \tau' = \frac{P}{\sqrt{2}x_1 x_2}, \tau'' \frac{MR}{J}, M = P\left(L + \frac{x_2}{2}\right) \tag{3.31}$$

$$\mathrm{R} = \sqrt{\frac{{\mathrm{x}_2}^2}{4} + \left(\frac{\mathrm{x}_1 + \mathrm{x}_3}{2}\right)^2}, \mathrm{J} = 2\left\{\sqrt{2}\mathrm{x}_1\mathrm{x}_2\left[\frac{{\mathrm{x}_2}^2}{12} + \left(\frac{\mathrm{x}_1 + \mathrm{x}_3}{2}\right)^2\right]\right\} \tag{3.32}$$

$$\sigma(\mathrm{x}) = \frac{6\mathrm{PL}^3}{\mathrm{x}_4{\mathrm{x}_3}^2}, \delta(\mathrm{x}) = \frac{6\mathrm{PL}^3}{\mathrm{E}\mathrm{x}_4{\mathrm{x}_3}^2} \tag{3.33}$$

$$\mathrm{P_c(x)} = \frac{4.013\mathrm{E}\sqrt{\frac{{\mathrm{x}_3}^2{\mathrm{x}_4}^6}{36}}}{\mathrm{L}^2}\left(1 - \frac{\mathrm{x}_3}{2\mathrm{L}}\sqrt{\frac{\mathrm{E}}{4\mathrm{G}}}\right) \tag{3.34}$$

$$\mathrm{P} = 6000\ \mathrm{lb}, \mathrm{L} = 14\ \mathrm{in}, \mathrm{E} = 30 \times 10^6\ \mathrm{psi}, \mathrm{G} = 12 \times 10^6\ \mathrm{psi} \tag{3.35}$$

$$\tau_{\max} = 13600\ \mathrm{psi}, \sigma_{\max} = 30000\ \mathrm{psi}, \delta_{\max} = 0.25\ \mathrm{in} \tag{3.36}$$

$$0.1 \leq \mathrm{x}_1, \mathrm{x}_4 \leq 2 \tag{3.37}$$

$$0.1 \leq \mathrm{x}_2, \mathrm{x}_3 \leq 10 \tag{3.38}$$

3.5. Kaotik Optimizasyon Algoritmaları

Bu tez çalışmasında, çarpışma kutularının optimizasyonunda kullanılmak için Kristal Yapı Algoritmasının (CSA) kaotik haritalar kullanılarak hibrit algoritmaları oluşturulmuştur. Kaotik Kristal Yapı Algoritmasının (CCSA) sözde kodu Şekil 3.17'de verilmiştir. Kaotik Kristal Yapı Algoritmalarının harita bilgileri ve kısa isimleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Kaotik Kristal Yapı Algoritması (CCSA)
Başla
İlk pozisyonların değerlerini rastgele oluştur(x_i^j)
Kristal (Cr_i)
Her bir kristalin uygunluk değerlerini hesapla
while (t<Maksimum iterasyon sayısı)
Kaotik haritayı oluştur.
for i=1: ilk kristallerin sayısı
Cr_{main} tanımla
Eşitlik 2.4 ile yeni kristalleri belirle (Kaotik Haritalarla)
Üret Cr_b
Eşitlik 2.5 ile yeni kristalleri belirle (Kaotik Haritalarla)
Üret F_c
Eşitlik 2.6 ile yeni kristalleri belirle (Kaotik Haritalarla)
Eşitlik 2.7 ile yeni kristalleri belirle (Kaotik Haritalarla)
if yeni kristaller sınır şartlarına uymuyorsa
Yeni kristaller için pozisyon kısıtlarını kontrol et ve değiştir
end if
Yeni kristallerin uygunluk değerlerini hesapla
Eğer iyi bir çözüm bulunduysa en iyi çözümü güncelle
end for
t=t+1
end while
GB ye git
Son

Şekil 3.17. Kaotik Kristal Yapı Algoritması sözde kodu

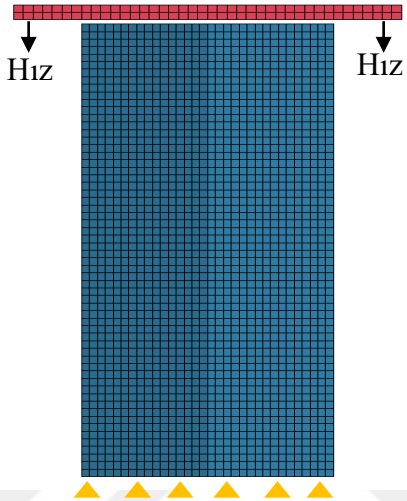
Çizelge 3.7. Kaotik Kristal Yapı Algoritmaları

CSA	Kristal Yapı Algoritması -
CSA C1	Kristal Yapı Algoritması Chebyshev harita
CSA C2	Kristal Yapı Algoritması Çember harita
CSA C3	Kristal Yapı Algoritması Gauss harita
CSA C4	Kristal Yapı Algoritması İteratif harita
CSA C5	Kristal Yapı Algoritması Lojistik harita
CSA C6	Kristal Yapı Algoritması Parçalı harita
CSA C7	Kristal Yapı Algoritması Sinüs harita
CSA C8	Kristal Yapı Algoritması Singer harita
CSA C9	Kristal Yapı Algoritması Sinüsoidal harita
CSA C10	Kristal Yapı Algoritması Çadır harita

3.6. Sonlu Elemanlar Analizi

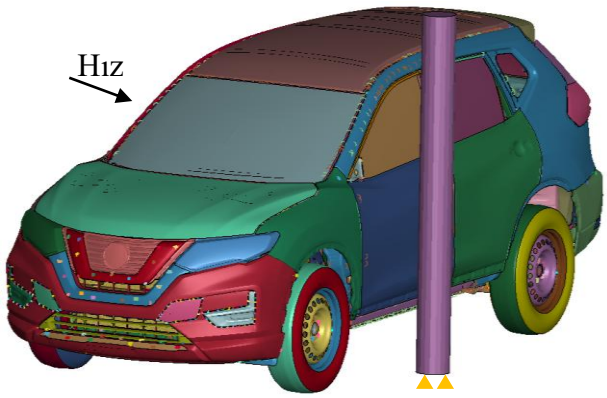
Sonlu elemanlar analizinde Şekil 3.18 verilen çarpışma kutusu modeli kullanılmıştır. Ls-Dyna arayüzünde çarpışma kutusunu ezen blok tanımı yapılmıştır. Blok MAT-20 rigid

malzeme kullanarak katı malzeme özellikli olarak tanımlanmıştır. Çarpışma kutusunun tanımı için Shell malzeme özelliği tanımlanmıştır. MAT-24 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme kartı kullanılarak bölüm 4.1'de elde edilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Çarpışma kutusu kendi içinde Automatic-Single surface-contac ile kontaklanmıştır. Çarpışma kutusu ile rigid blok arasında Automatic-SurfacetoSurface kontak tanımı yapılmıştır.



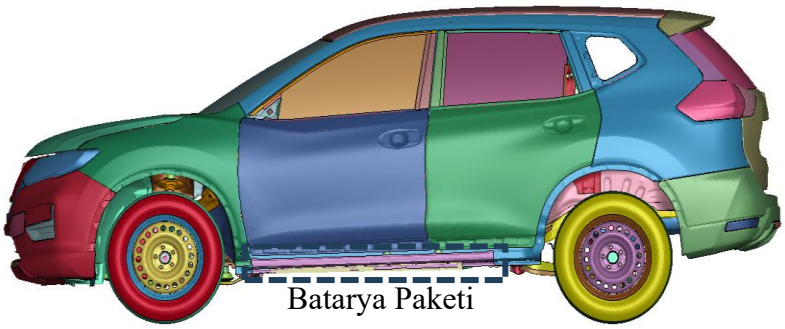
Şekil 3.18. Çarpışma Kutusu Sonlu Elemanlar Analizi

Çarpışma analizinde Ls-Dyna programında kullanılmak üzere tasarlanan Nissan Rogue 2020 modeli TOGG T10X ile boyutsal yakınlığı nedeniyle kullanılmıştır. Nissan Rogue 2020 modeli uzunluk olarak 4686 mm, genişlik olarak 1840 mm yükseklik olarak 1740 mm aks mesafe ise 2705 mm'dir. TOGG T10X modeli uzunluk olarak 4599 mm, genişlik olarak 1886 mm yükseklik olarak 1676 mm aks mesafe ise 2890 mm'dir.



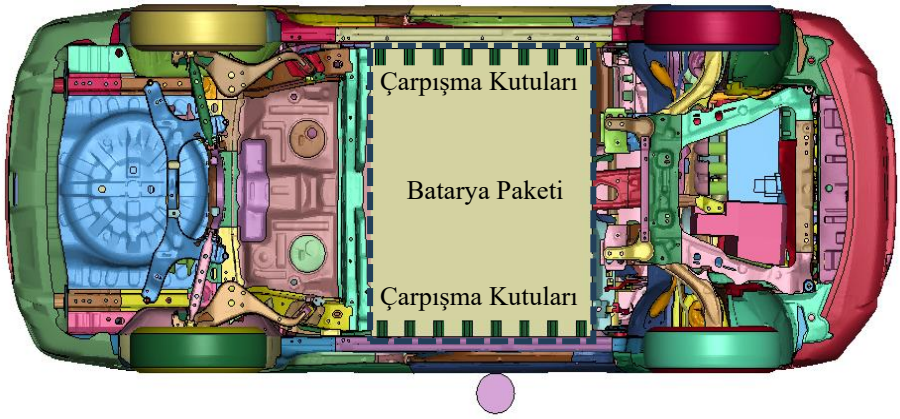
Şekil 3.19. Araç Yandan Direk Çarpışma

Araç yandan çarpışması için Euro NCAP yandan çarpışma standartı kullanılmıştır. Bu standarda 32 km/h hızındaki araç 254 mm çarpındaki bir direğe çarptırılmaktadır. Bu standart kapsamında araç direğe çarptırılmıştır. Simülasyon şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.20. Araç Batarya Paketi Konumu

Simülasyonda araç modelinin altına içten yanmalı taşıta ait parçalar çıkartılarak batarya paketi yerleştirilmiştir. Batarya paketinin iç duvarlarına 8 adet çarpışma kutusu yerleştirilmiştir. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de batarya paketi ve çarpışma kutusunun konuları verilmiştir. Çarpıma analizinde batarya paketi alüminyum malzemeden tanımlanmıştır. Tüm araç kendi içinde Automatic_Single_Surface_Contac ile kontaklanmıştır. Çarpışma kutuları Tied_Node_Surface kontak ile kontaklanmıştır.



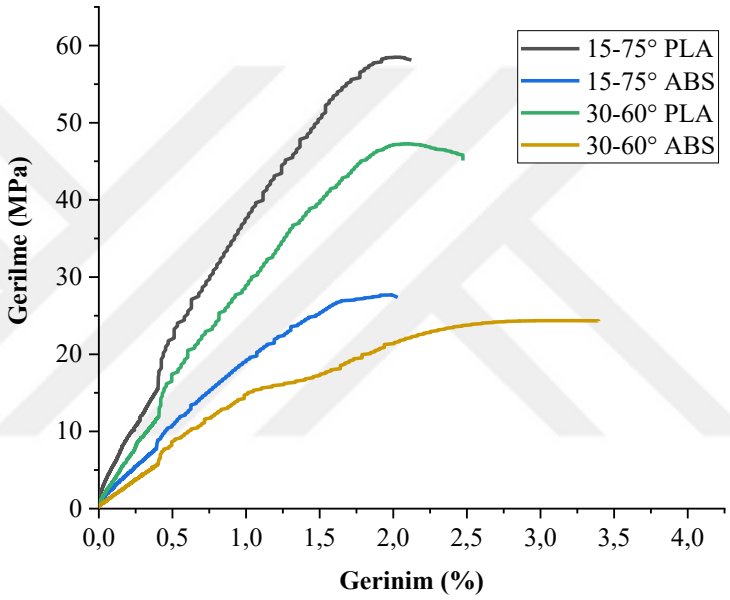
Şekil 3.21. Araç Batarya Paketi ve Çarpışma Kutusu Konumu

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Eklemeli İmalat Test Sonuçları

Eklemeli imalatla PLA ve ABS malzeme kullanılarak üretilen test numuneleri 5 tekrar olacak Şekilde test edilmiştir. Çekme testi, üç nokta eğme testi, ızod testi ve basma testi sonuçları incelenmiştir.

4.1.1.Çekme Testi Sonuçları



Şekil 4.1. Gerilme-Gerinim eğrileri

Çizelge 4.1.Çekme Testi Sonuçları

	Çekme Gerilmesi (MPa)		Elastisite Modülü (MPa)	
	15-75°	30-60°	15-75°	30-60°
PLA	54,9867	45,221	3544,77	2940,66
ABS	27,7739	24,6639	1796,72	1654,62

PLA malzemesine ait deney sonuçları incelendiğinde 15-75° üretim açısına sahip test numunelerinin 30-60° üretim açısına sahip test numunelerinden 9 MPa daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Elastisite modülleri incelendiğinde 15-

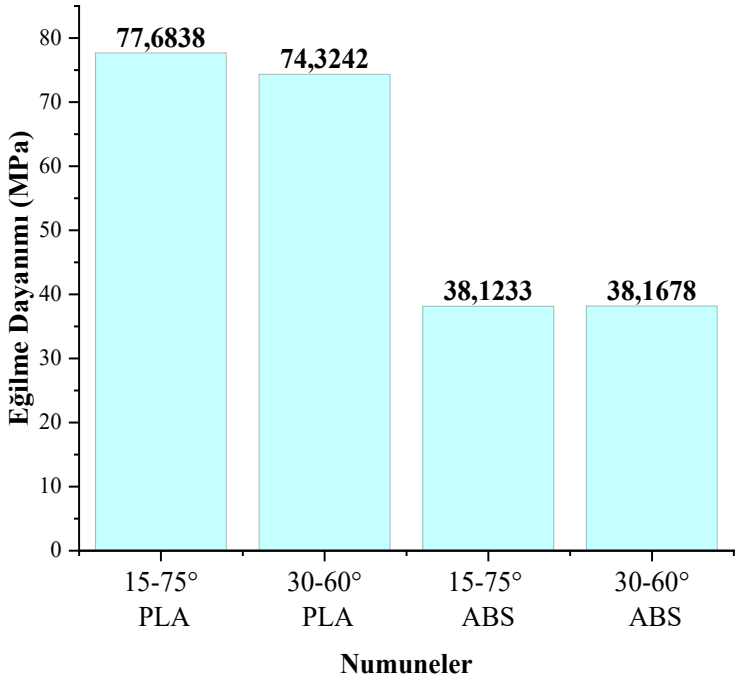
75° açıya sahip numunelerin %20 oranında daha yüksek değere sahip oldukları gözlemlenmiştir.

ABS malzemesine ait deney sonuçları incelendiğinde 15-75° üretim açısına sahip test numunelerinin 30-60° üretim açısına sahip test numunelerinden 3 MPa daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir Elastisite modülleri incelendiğinde 15-75° açıya sahip numunelerin %8 oranında daha yüksek değere sahip oldukları gözlemlenmiştir.

PLA ve ABS malzemeleri genel olarak incelendiğinde PLA malzemesi daha yüksek çekme dayanımına ve daha yüksek elastik modül değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

4.1.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

PLA ve ABS malzemelerinin üç nokta eğme testleri TSEN ISO 178 standartlarında belirtildiği ölçüde 5 adet olmak üzere üç nokta eğme testi numunesi üretilerek ilgili test yapılmıştır. Şekil 4.2'de iki farklı malzemenin üç nokta eğme test sonuçları sunulmuştur.



Şekil 4.2. Üç nokta eğme test sonuçları

PLA malzemesi test sonucu incelendiğinde 15-75° açı ile üretilen malzemenin gerilme dayanımı 30-60° ile üretilen malzemeden yaklaşık olarak 3 MPA daha fazla olduğu ve uzama değerinin yaklaşık olarak %27 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

ABS malzemesi test sonucu incelendiğinde 15-75° açı ile üretilen malzemenin gerilme dayanımı 38,1233 30-60° ile üretilen malzemenin gerilme dayanımı 38,1678 MPa olarak birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Uzama değerinde 15-75° açı ile üretilen numunelerin yaklaşık olarak %12,5 daha fazla uzama gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.

PLA ve ABS malzemeleri incelendiğinde PLA malzemenin daha yüksek gerilme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. En düşük gerilme dayanımı ABS malzemede gözlemlenmiştir.

4.1.3. Izod Testi Sonuçları

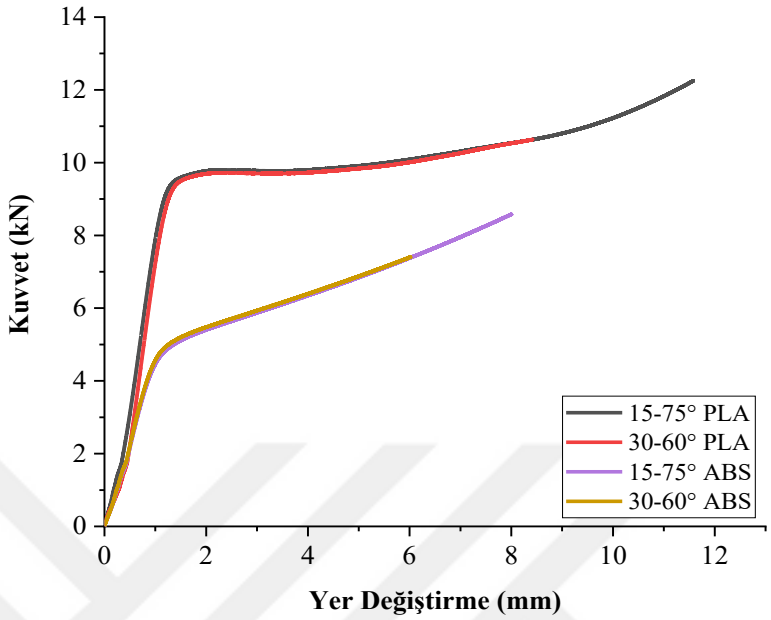
PLA ve ABS malzemelerinin darbe dayanımlarını tespit etmek amacıyla ızod testi, ISO 179 standartına uygun ölçülerde 5 adet numune üretilecek ve ilgili testler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.2'de ifade edilen ızod testi sonuçları ifade edilmiştir.

Çizelge 4.2. Izod Test Sonuçları

Malzeme ismi	Enerji (Joule)	Darbe Enerjisi (kJ/m^2)
15-75° PLA	0,5485	13,57
30-60° PLA	0,5373	13,29
15-75° ABS	1,0841	26,33
30-60° ABS	1,0599	25,75

Çizelge 4.2'de verilen ızod testi sonuçları incelendiğinde PLA ve ABS malzemelerindeki üretim açısı değişimlerin darbe enerjisi üzerinde yüksek bir etkisi gözlemlenmemiştir. ABS malzemesi en yüksek darbe enerjisine sahip malzeme olarak gözlemlenirken PLA malzemesi en düşük darbe enerjisine sahip malzeme olarak gözlemlenmiştir.

4.1.4. Bası Testi Sonuçları



Şekil 4.3. Basma testi Kuvvet-Yer değiştirme Grafiği

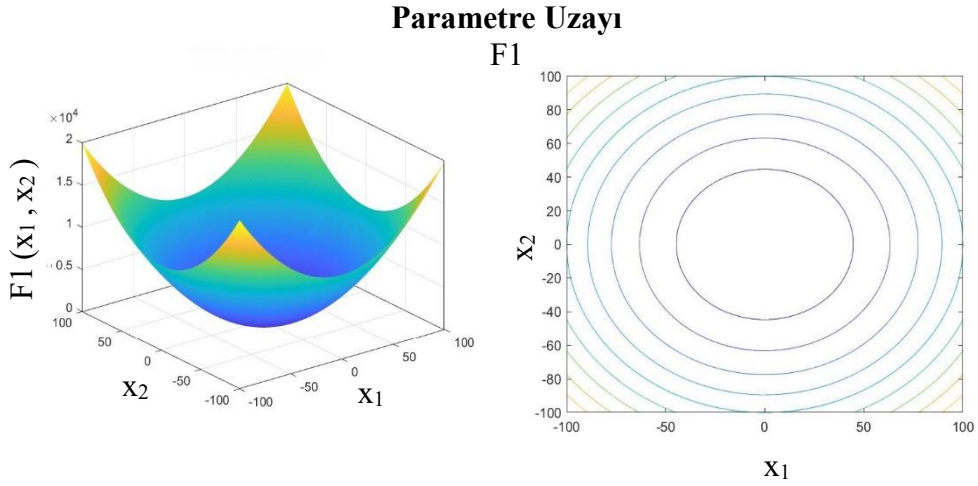
Basma testi için ASTM D695 standartlarında 5 adet numune üretilerek ilgili testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'te verilen test sonuçları incelendiğinde; PLA malzemesi kullanılarak yapılan bası testi sonuçlarında en yüksek tepki kuvveti değeri elde edilmiştir 10 kN değerine kadar yükselmiştir ve sonrasında test numunesini bası testinin devam ettiği gözlemlenmiştir. ABS Malzemesi kullanılarak yapılan bası testlerinde 8 mm bir yer değiştirme gerçekleşmiştir. 8 kN bir yükleme gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

4.2. Optimizasyon Algoritması Sonuçları

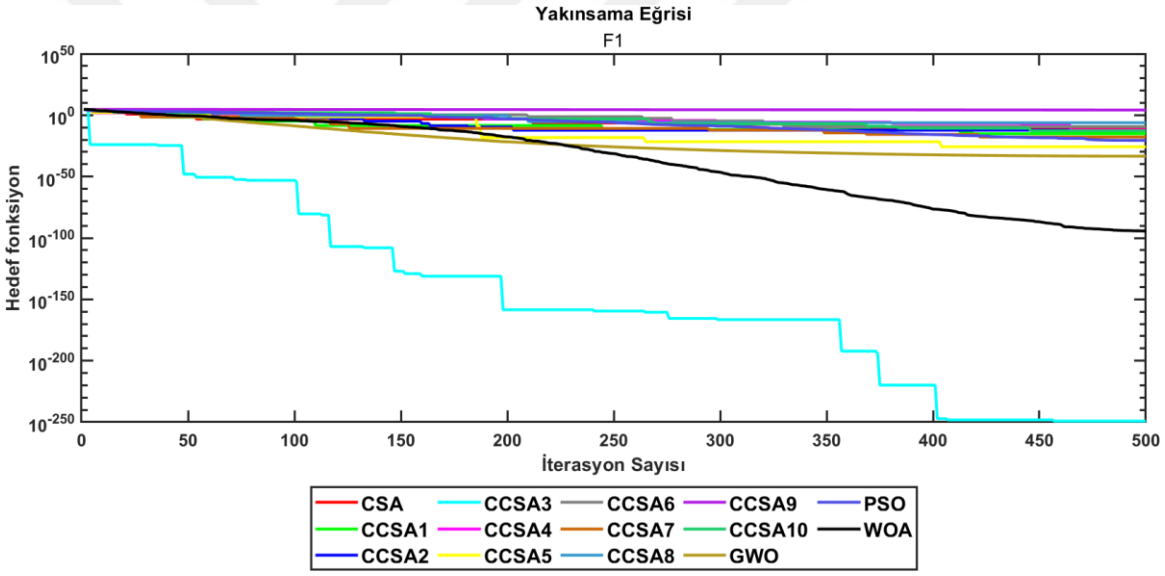
Kaotik Kristal Yapı Algoritması PSO, GWO ve WOA algoritmalarıyla 23 test fonksiyonu ve 5 mühendislik problemi ile çalıştırılıp kıyaslanmıştır. Sonuçlar bu bölümde incelenmiştir.

4.2.1. F1 Test fonksiyonu

F1 test fonksiyonu tek modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.4'te F1 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.4. F1 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları



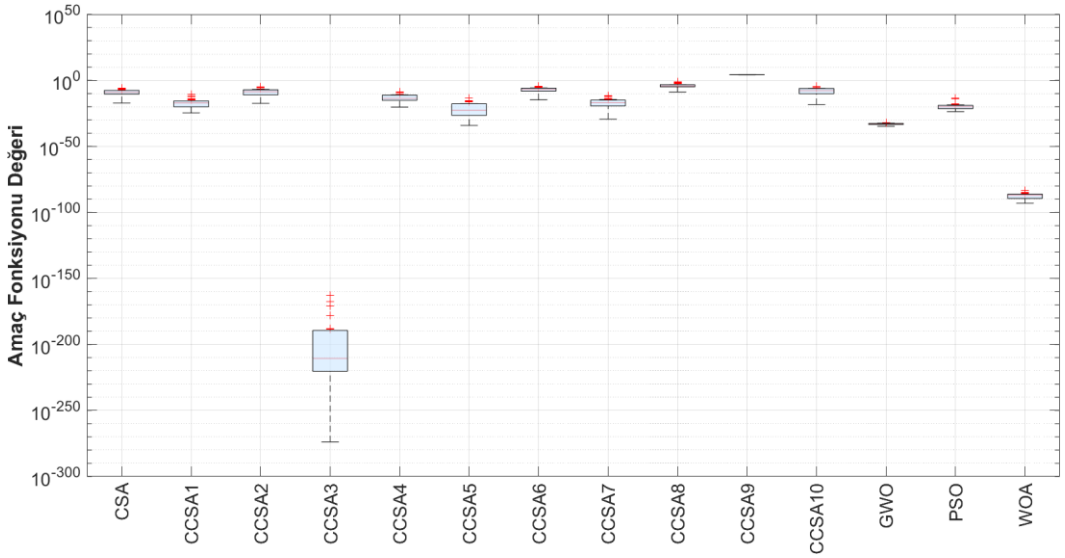
Şekil 4.5. F1 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F1 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.5'te algoritmalarının yakınsam eğrileri verilmiştir. CCSA3 algoritması merdiven şeklinde inerek 400. iterasyonda logaritmik olarak 10^{-250} değerinde yakınsama sağlayarak çözüm kararlı hale gelmiştir ve en yakın rakibi WOA'ya göre iyi bir performans sergilemiştir. Diğer algoritmalarda birbirine yakın Şekilde yakınsama sağlamışlardır.

Çizelge 4.3. F1 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

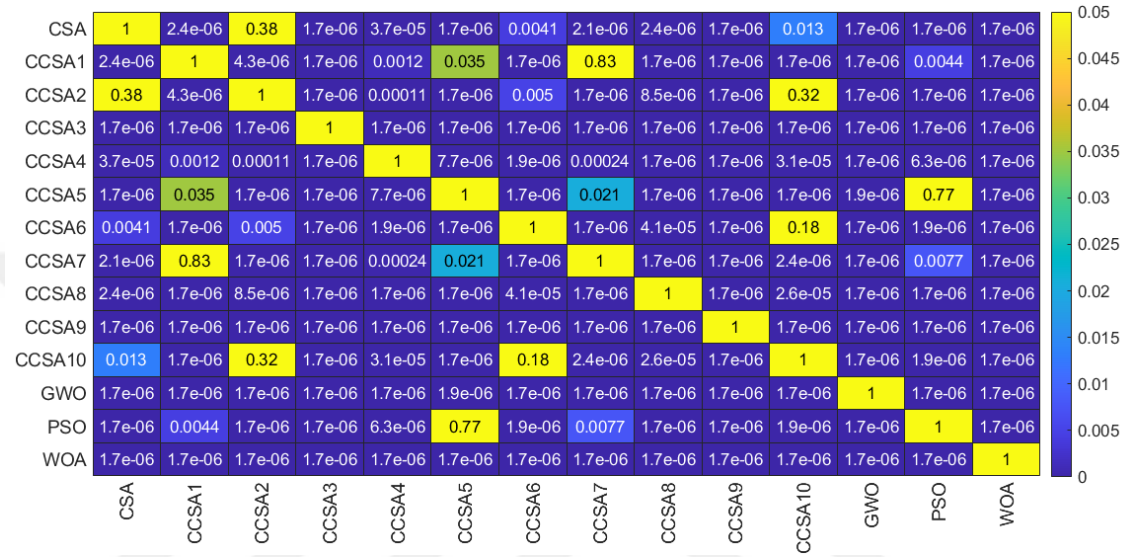
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	6,61925E-18	1,25052E-06	8,23072E-08	9,40739E-10	2,37381E-07
CCSA1	2,20873E-25	1,46469E-11	5,70378E-13	8,43383E-18	2,68126E-12
CCSA2	3,33208E-18	1,83858E-05	8,51753E-07	2,67822E-09	3,47541E-06
CCSA3	1,7693E-274	1,4532E-163	4,844E-165	2,5325E-211	0
CCSA4	5,15837E-21	2,62652E-09	2,23993E-10	1,83565E-14	6,52198E-10
CCSA5	6,72442E-35	2,61852E-14	9,26584E-16	2,40323E-23	4,7732E-15
CCSA6	1,72262E-15	3,6231E-05	3,42273E-06	1,05623E-07	8,41492E-06
CCSA7	4,36285E-30	1,71625E-12	9,11364E-14	1,58332E-17	3,43786E-13
CCSA8	1,49862E-09	0,048052294	0,002975407	6,11066E-05	0,009383625
CCSA9	10893,81879	18971,4167	14585,06274	14608,08692	2017,997364
CCSA10	5,14112E-19	5,78569E-05	3,37261E-06	1,44547E-08	1,14339E-05
GWO	1,6258E-35	1,40838E-32	1,95222E-33	6,69253E-34	3,18997E-33
PSO	2,07939E-24	4,45827E-14	1,72966E-15	9,89326E-21	8,20258E-15
WOA	8,52766E-94	3,532E-84	1,28483E-85	6,70985E-88	6,43364E-85

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F1 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA3 1,7693E-274 ile en düşük sonucu elde etmiştir ve ortalama değeri 4,844E-165 değerindedir. WOA algoritmaları ile rekabet ederek yüksek bir başarı göstermiştir. CCSA9 en kötü sonuçları üretmiştir.



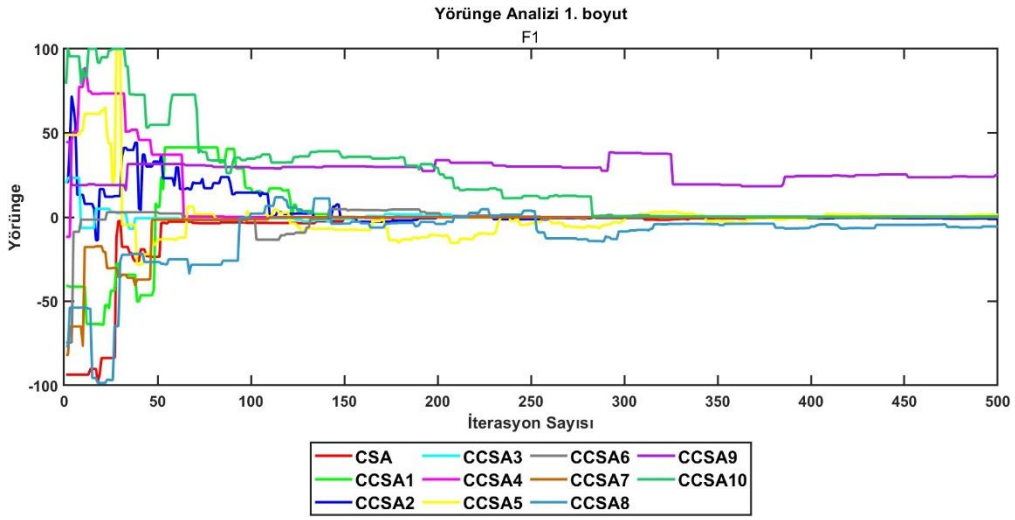
Şekil 4.6. F1 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F1 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler bu da güçlü keşifler yaptığını ancak kararlılıkta sınırlı davranış gösterdiğini ifade eder ancak optimum değerlerin düşük olması nedeniyle iyi bir yakınsama performansı sergilemektedir. WOA daha kararlı bir davranış sergilemiştir ancak optimum değere CCSA3 kadar yaklaşamamıştır.



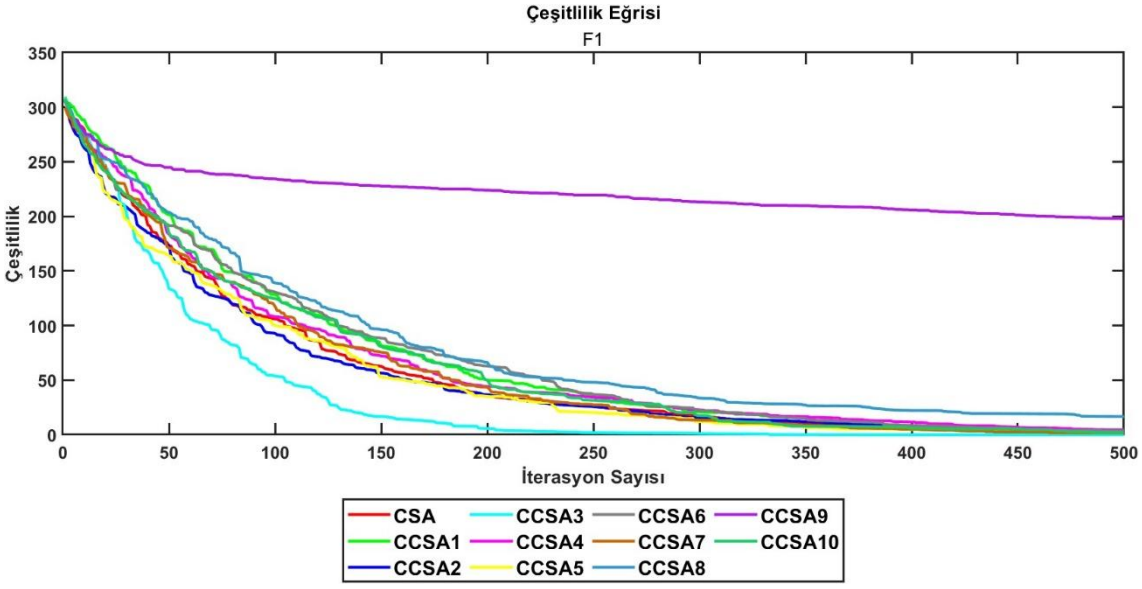
Şekil 4.7. F1 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F1 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.7'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir. Bu sonuçlar CCSA3 için Şekil 4.6'daki performans dağılımını desteklemektedir.



Şekil 4.8. F1 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F1 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.8'de verilmiştir. Algoritmalar yüksek genlikli davranış yaptıktan sonra sabit genliğe geçmiştir. CCSA3 1. boyutta eğriyi hızlı yakalayarak diğer kaotik hibrit algoritmalara göre iyi bir performans sergilemiştir.



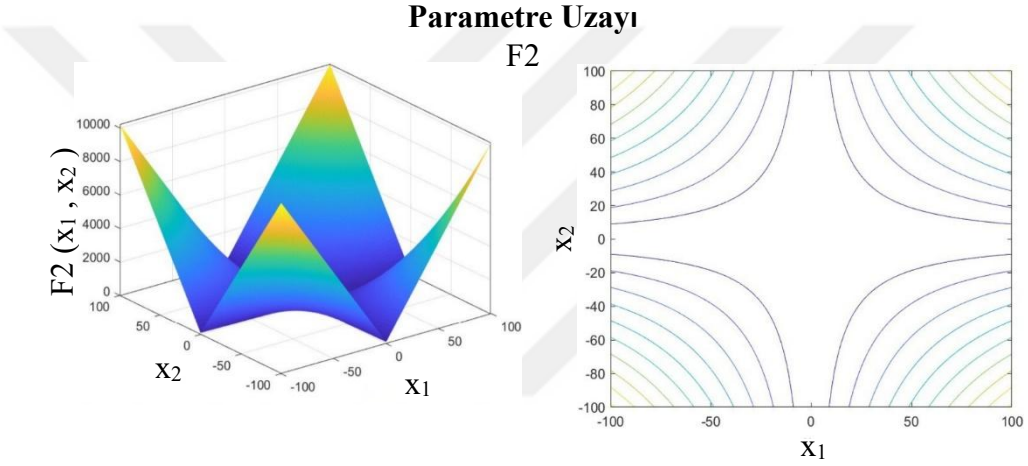
Şekil 4.9. F1 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

F1 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.9'da verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı

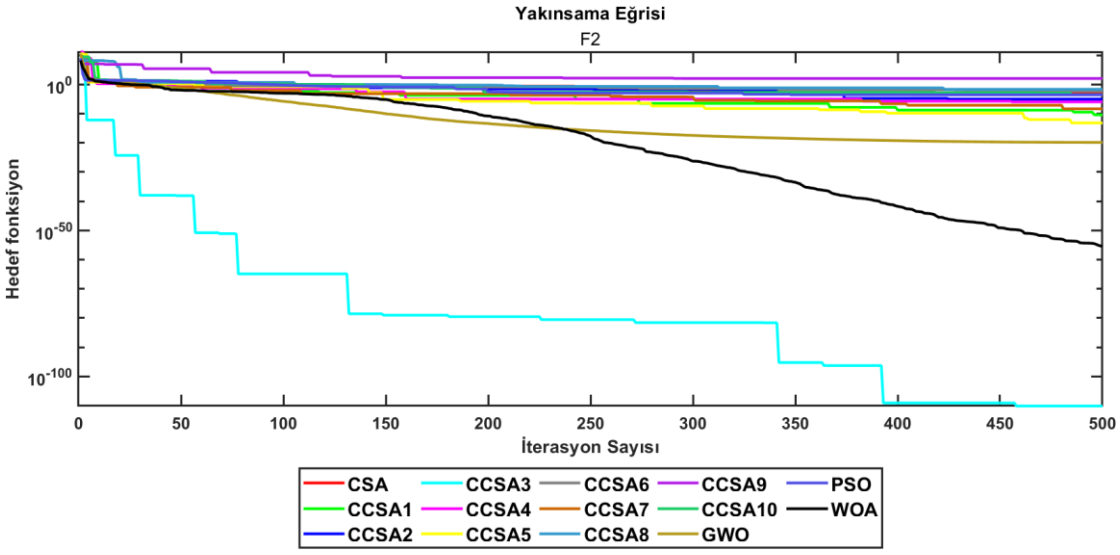
arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir. Çeşitliliğin eğrisel davranışları benzer bir noktada ilerlemiştir.

4.2.2. F2 Test Fonksiyonu

F2 test fonksiyonu tek modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.10'da F2 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.10. F2 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları



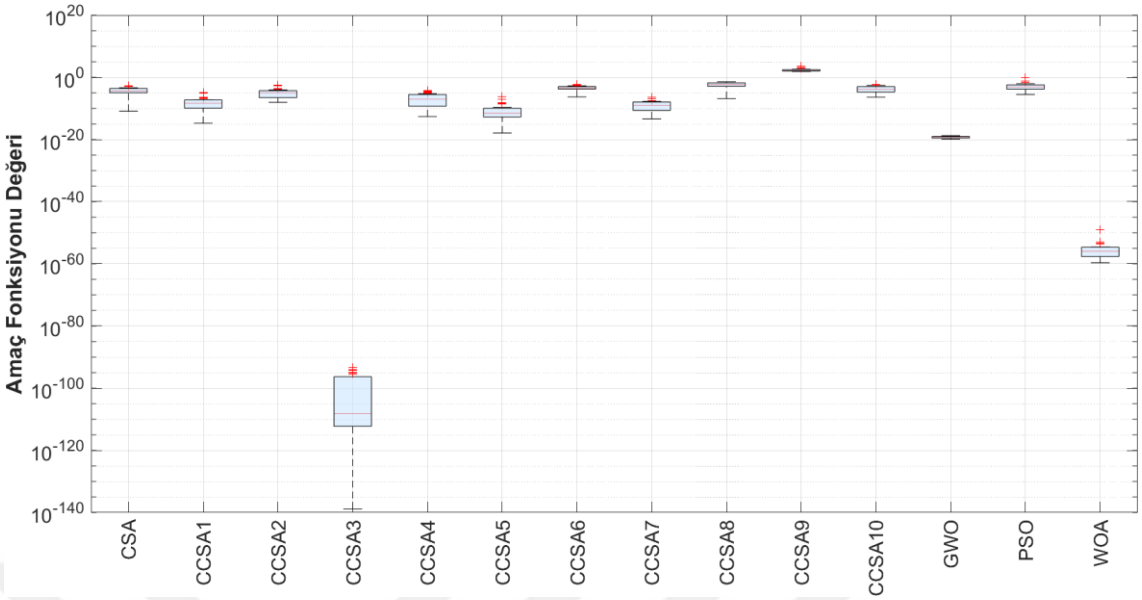
Şekil 4.11. F2 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F2 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.11'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. CCSA3 algoritması merdiven şeklinde inerek 400. İterasyonda yakınsama sağlamıştır ve en yakın rakibi WOA'ya göre iyi bir performans sergilemiştir. Diğer algoritmalarda birbirine yakın Şekilde yakınsama sağlamışlardır.

Çizelge 4.4. F2 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

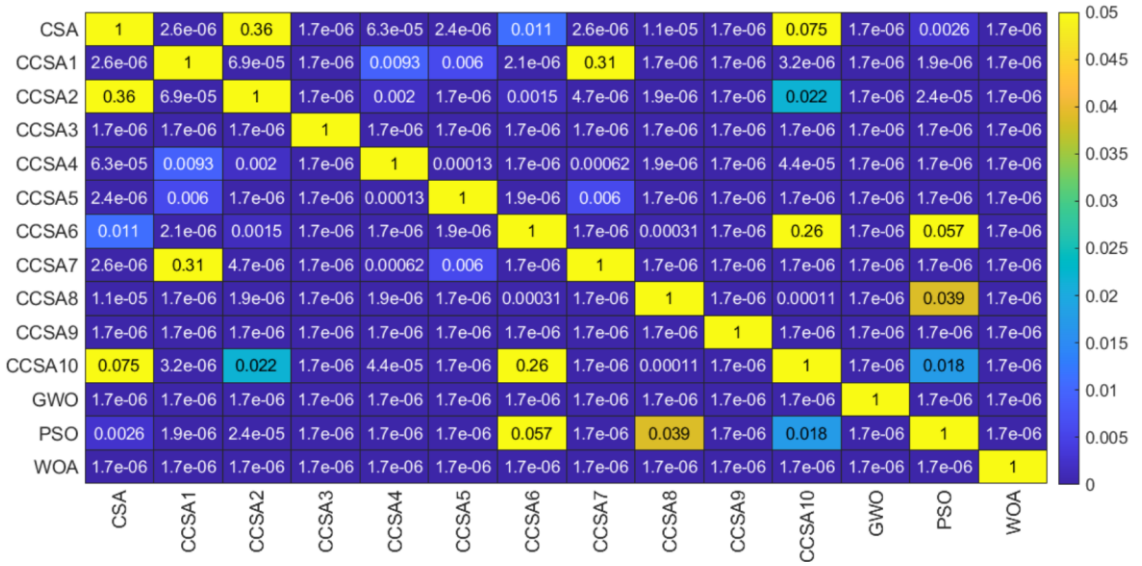
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	1,22375E-11	0,00230196	0,000293829	4,02613E-05	0,000580301
CCSA1	1,76577E-15	1,2371E-05	6,68558E-07	4,88232E-09	2,48348E-06
CCSA2	8,69584E-09	0,003186013	0,000270367	9,82094E-06	0,000759304
CCSA3	1,4433E-139	5,21703E-94	2,72243E-95	6,9567E-109	9,74383E-95
CCSA4	2,43456E-13	6,68406E-05	5,29082E-06	9,76966E-08	1,33022E-05
CCSA5	1,2749E-18	6,77081E-07	2,63679E-08	2,76397E-12	1,24113E-07
CCSA6	5,24612E-07	0,00625998	0,000978079	0,000405362	0,001432486
CCSA7	4,37966E-14	4,11449E-07	3,39768E-08	1,00574E-09	9,44305E-08
CCSA8	1,49717E-07	0,035920023	0,009568919	0,004767606	0,011175147
CCSA9	75,99093156	3981,958594	506,8591868	130,7121952	965,6086629
CCSA10	4,09175E-07	0,004786753	0,000776687	0,000141104	0,001251092
GWO	1,25934E-20	1,71116E-19	6,18421E-20	4,82719E-20	4,38194E-20
PSO	3,15047E-06	0,96146655	0,036151591	0,000792655	0,17511463
WOA	2,16476E-60	7,75521E-50	2,58604E-51	1,08041E-56	1,41588E-50

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F2 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA3 1,4433E-139 ile en düşük sonucu elde etmiştir Standart sapma değeri ise 9,74383E-95'tir. WOA algoritmaları ile rekabet ederek yüksek bir başarı göstermiştir.



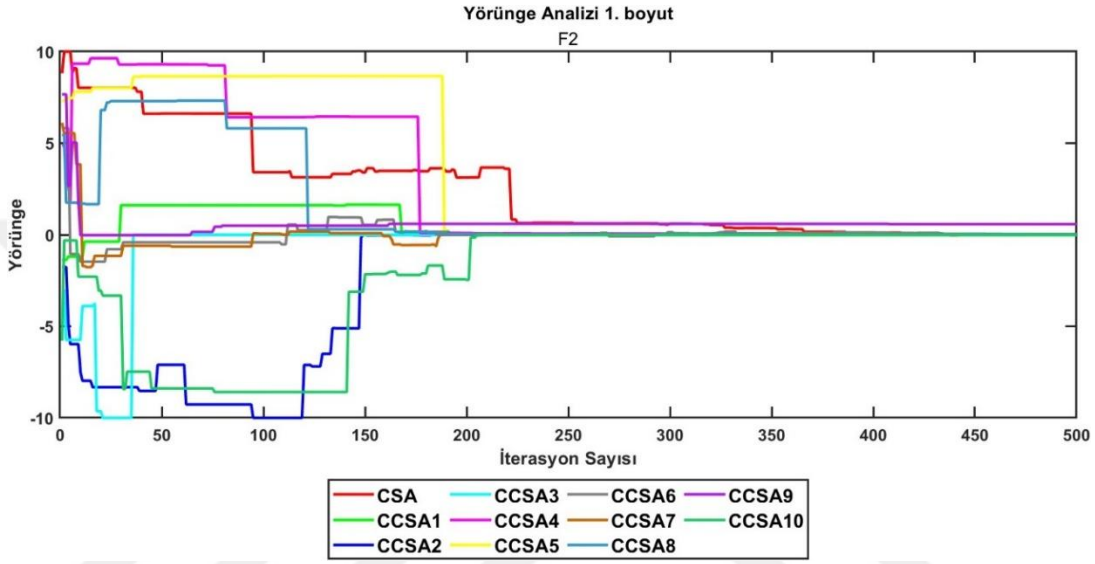
Şekil 4.12. F2 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F2 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.12'de verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler bu da güçlü keşifler yaptığını ancak kararlılıkta sınırlı davranış gösterdiğini ifade eder ancak optimum değerlerin düşük olması nedeniyle iyi bir yakınsama performansı sergilemektedir. WOA daha kararlı bir davranış sergilemiştir ancak optimum değere CCSA3 kadar yaklaşamamıştır. Logaritmik olarak 10^{20} değer farkı vardır.



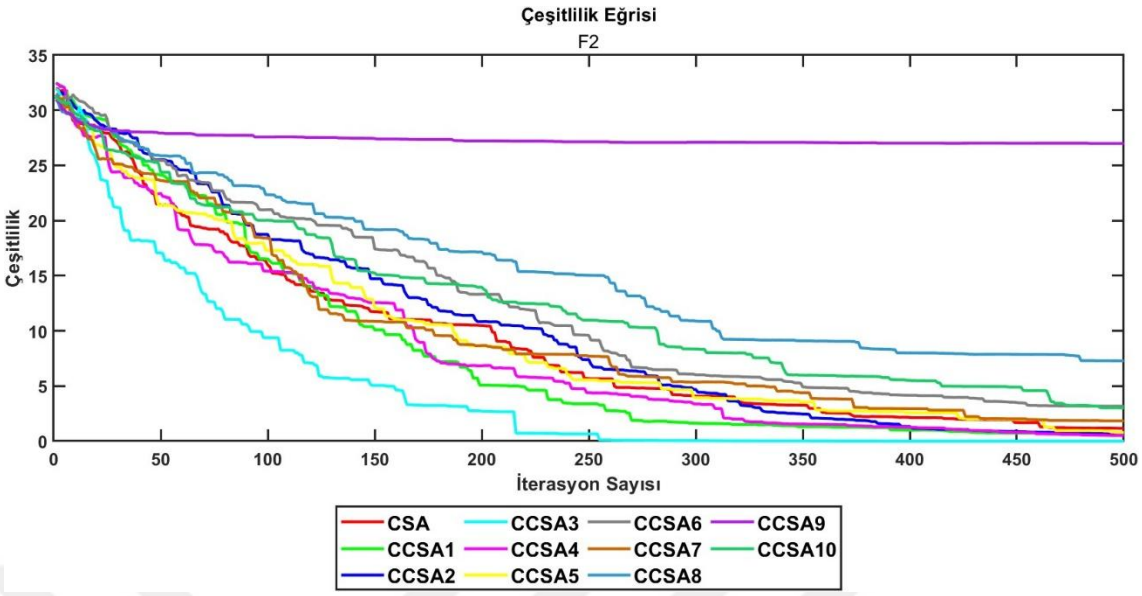
Şekil 4.13. F2 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F2 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.13'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir, bu da yakınsama eğrisi ve performans dağılımını desteklemektedir.



Şekil 4.14. F2 Test Fonksiyonu 1. boyuttaki yörünge analizi

F2 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.14'te verilmiştir. Algoritmalar yüksek genlikli davranış yaptıktan sonra sabit genliğe geçmiştir. CCSA3 yaklaşık 35. iterasyonda sabit genliğe geçerek diğer kaotik hibrit algoritmalara göre iyi bir yörünge performansı sergilemiştir.

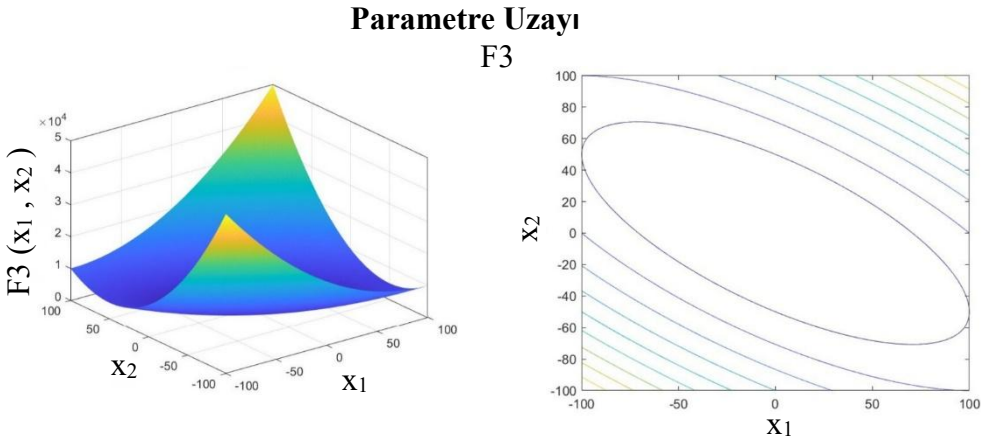


Şekil 4.15. F2 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

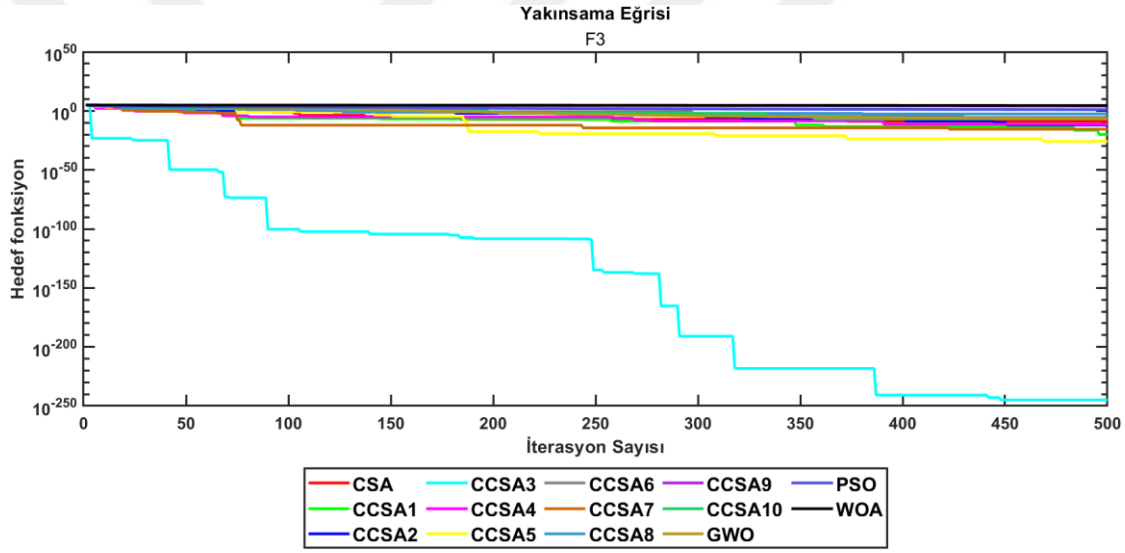
F2 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.15'te verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir, yakınsama eğrisindeki davranışı ve optimuma ulaşamaması da bu durumu desteklemektedir.

4.2.3. F3 Test Fonksiyonu

F3 test fonksiyonu tek modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.16'da F3 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.16. F3 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları



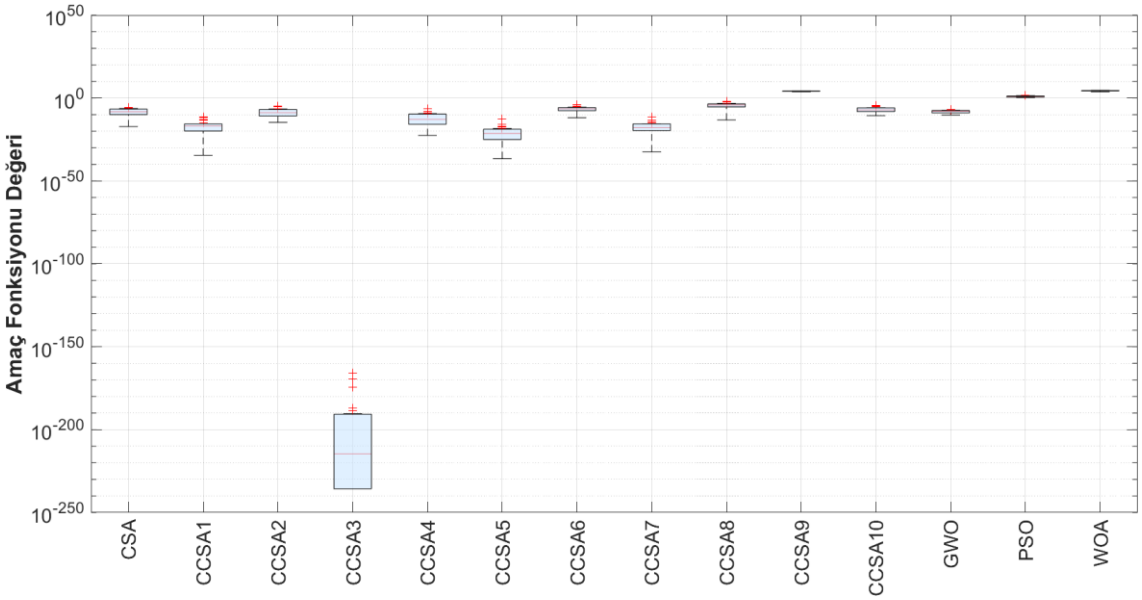
Şekil 4.17. F3 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F3 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.17'de algoritmalarının yakınsam eğrileri verilmiştir. CCSA3 algoritması merdiven şeklinde inerek 400. iterasyonda yakınsama eğrisi sabitlenmiştir ve diğer algoritmalara karşı daha yakın seviyede optimuma ulaşmıştır.

Çizelge 4.5. F3 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

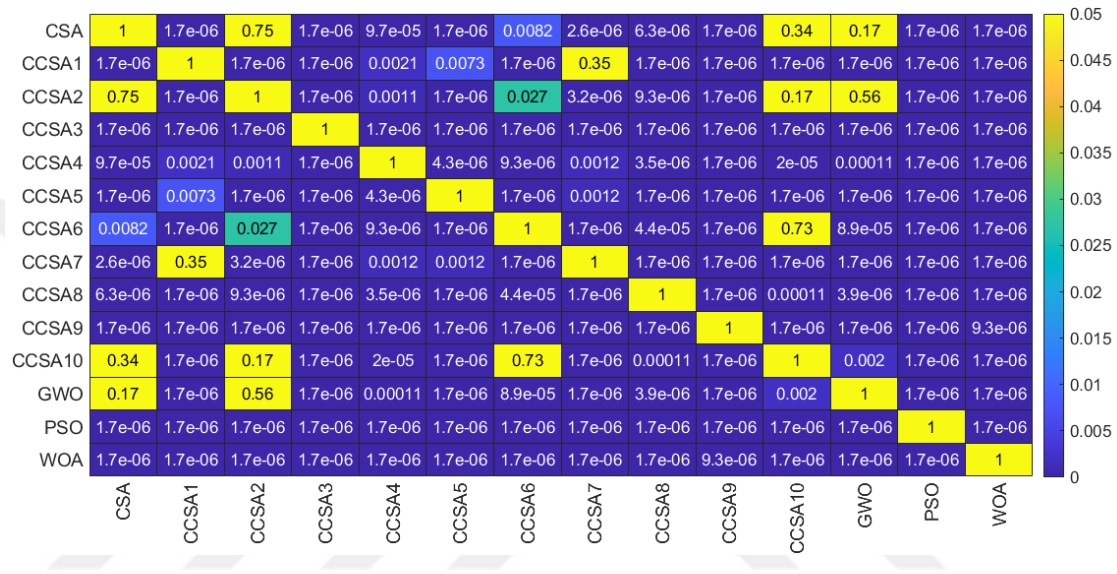
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	6,36894E-18	2,33478E-06	3,31194E-07	5,46777E-09	6,57301E-07
CCSA1	3,00303E-35	4,86392E-12	2,10763E-13	1,53357E-17	9,09892E-13
CCSA2	2,05983E-15	2,23866E-05	1,29357E-06	1,64869E-09	4,42203E-06
CCSA3	0	2,3353E-166	7,7853E-168	2,2743E-215	0
CCSA4	3,05939E-23	4,53367E-07	1,54253E-08	1,47943E-13	8,27208E-08
CCSA5	2,53665E-37	3,25071E-13	1,0843E-14	4,33281E-22	5,93482E-14
CCSA6	1,31032E-12	0,000104338	5,13279E-06	2,73902E-07	1,92417E-05
CCSA7	3,12705E-33	3,75629E-12	1,29237E-13	1,54807E-18	6,85142E-13
CCSA8	5,93254E-14	0,007190493	0,000804795	6,58933E-05	0,001851379
CCSA9	6118,911796	19701,0185	14059,57716	13717,04256	3630,250119
CCSA10	2,38628E-11	2,66817E-05	2,88999E-06	7,38811E-08	7,20369E-06
GWO	6,39491E-11	1,68508E-07	2,88809E-08	9,86704E-09	4,56122E-08
PSO	1,897618814	38,44615373	11,52593136	8,546776725	9,521330891
WOA	6059,359031	44991,83695	27994,21528	26327,64004	10668,40127

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F3 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.5'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA3 0 değeri ile 30 çözüm içinde optimuma ulaşmıştır en uzak kaldığı noktada bile diğer algoritmalara karşı üstünlük sağlamaktadır. Literatürdeki algoritmalara kıyasla optimuma ulaşma konusunda başarılıdır.



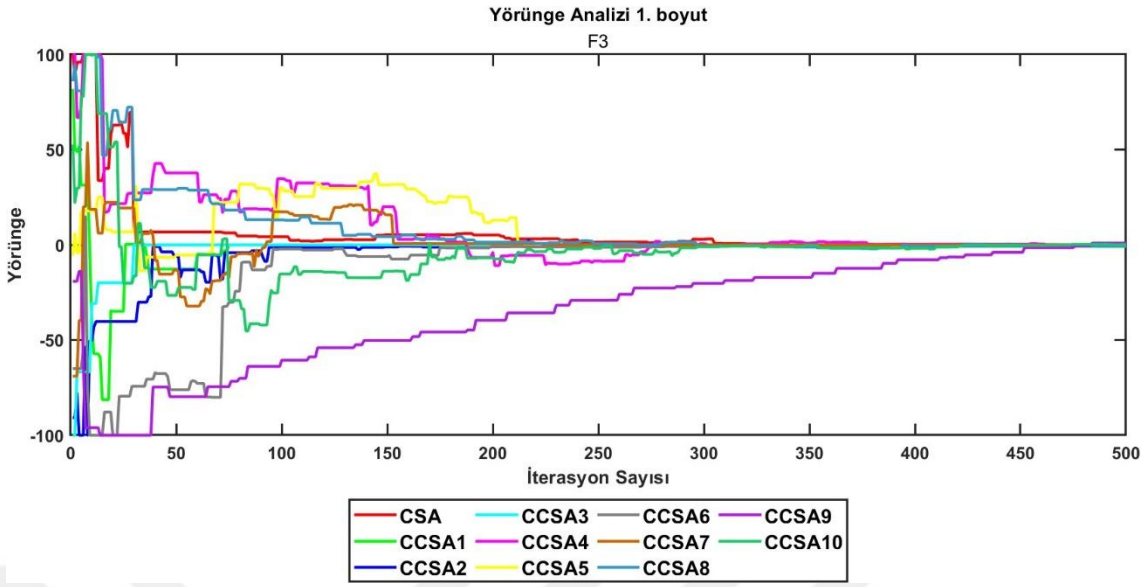
Şekil 4.18. F3 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F3 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.18'de verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler bu da güçlü keşifler yaptığını ancak kararlılıkta sınırlı davranış gösterdiğini ifade eder ancak optimum değerlerin düşük olması nedeniyle iyi bir yakınsama performansı sergilemektedir. CCS5 daha kararlı bir davranış sergilemiştir ancak optimum değere CCSA3 kadar yaklaşamamıştır. Logaritmik olarak 10^{200} değer farkı vardır.



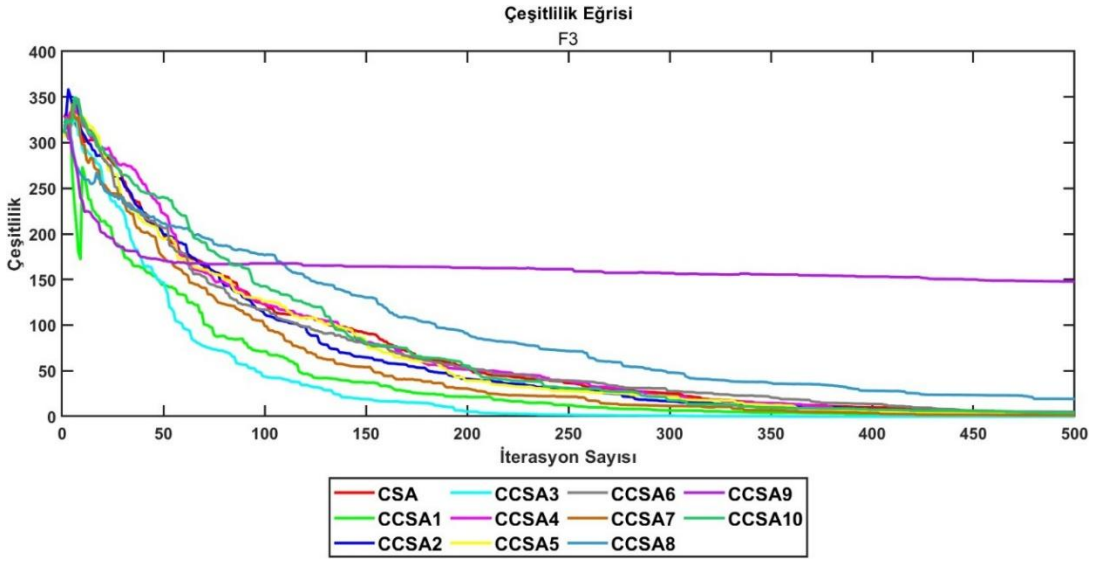
Şekil 4.19. F3 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F3 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.19'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilese de yakınsama eğrileri ve çözümler dikkate alındığında PSO ve WOA'dan yakınsama konusunda daha başarılıdır.



Şekil 4.20. F3 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F3 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.20'de verilmiştir. Algoritmalar yüksek genlikli davranış yaptıktan sonra sabit genliğe geçmiştir CCSA9 1. Boyutta yörüngeyi dengelemek konusunda başarılı olamamıştır. CCSA3 yaklaşık 25. iterasyonda sabit genliğe geçerek diğer kaotik hibrit algoritmalara göre iyi bir yörünge performansı sergilemiştir.

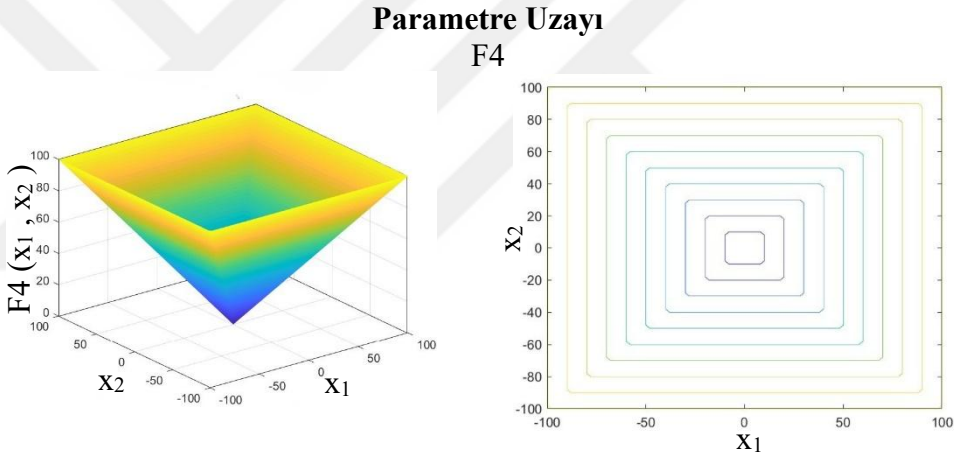


Şekil 4.21. F3 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

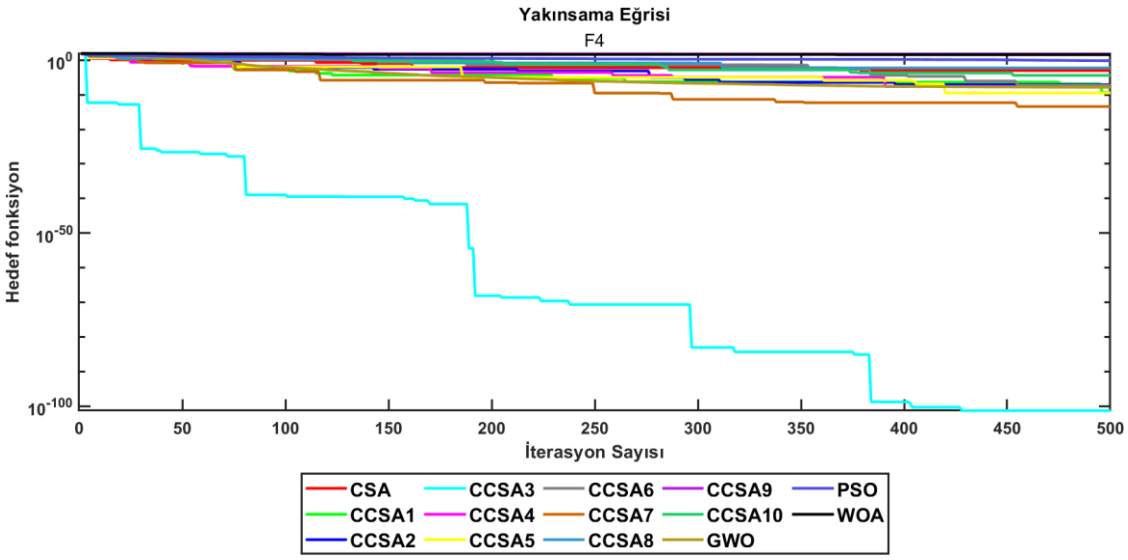
F3 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.21'de verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir, yakınsama eğrisindeki davranışı ve optimuma ulaşamaması da bu durumu desteklemektedir.

4.2.4. F4 Test Fonksiyonu

F4 test fonksiyonu tek modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.22'te F4 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.22. F4 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları



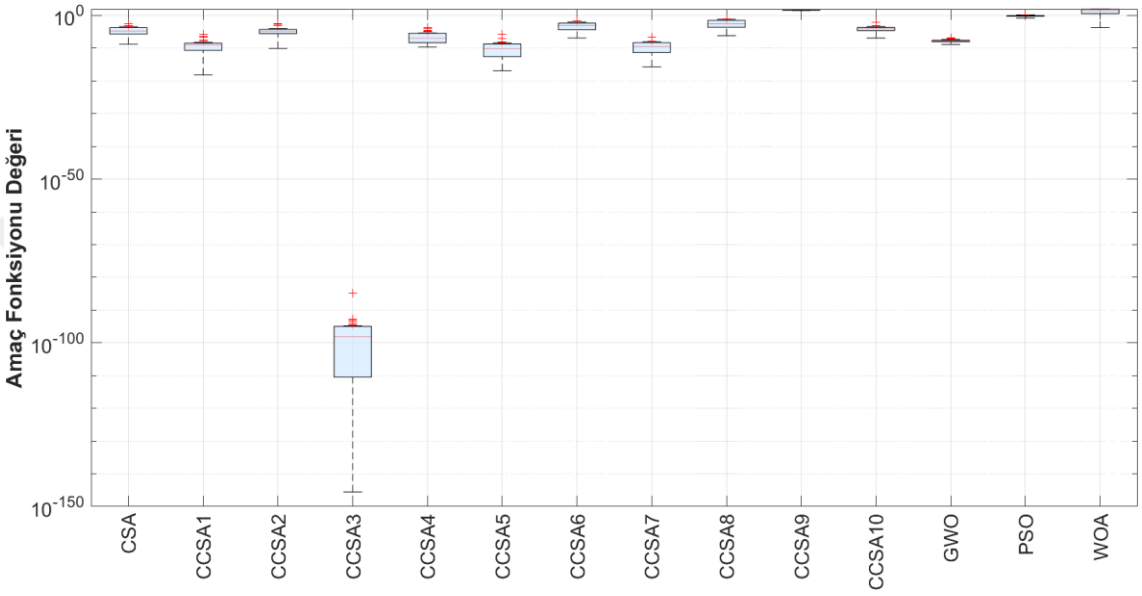
Şekil 4.23. F4 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F4 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.23'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. CCSA3 algoritması merdiven şeklinde inerek 400. İterasyonda yakınsama sağlamıştır ve en yakın rakibi CCSA7'ye göre iyi bir performans sergilemiştir.

Çizelge 4.6. F4 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

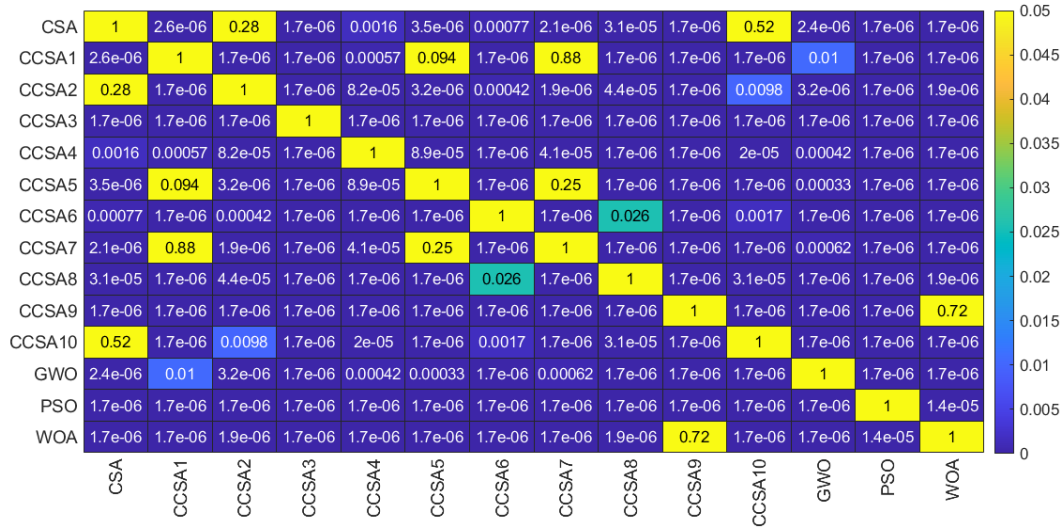
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	1,72557E-09	0,003653703	0,000357904	1,78767E-05	0,000880281
CCSA1	6,65222E-19	1,29524E-06	6,98341E-08	1,17682E-09	2,50334E-07
CCSA2	8,19981E-11	0,003514732	0,000241237	1,42469E-05	0,000739537
CCSA3	2,8301E-146	1,19497E-85	3,98323E-87	7,4727E-99	2,1817E-86
CCSA4	2,44357E-10	0,000176476	1,17843E-05	1,10276E-07	3,63535E-05
CCSA5	1,21628E-17	1,50695E-06	5,46437E-08	7,92084E-11	2,74884E-07
CCSA6	1,31842E-07	0,020364576	0,002701676	0,0008112	0,004317755
CCSA7	2,11732E-16	2,64082E-07	1,86225E-08	3,29112E-10	6,2742E-08
CCSA8	6,76367E-07	0,085557892	0,015635684	0,003128152	0,023141967
CCSA9	31,62411739	47,51026412	41,21016317	41,79062579	4,210950533
CCSA10	1,29079E-07	0,009098386	0,000445658	9,25759E-05	0,001644472
GWO	1,41367E-09	1,40482E-07	2,36197E-08	1,5714E-08	2,81388E-08
PSO	0,150130696	1,442049369	0,726983901	0,62747542	0,341215013
WOA	0,000182965	88,53366311	37,46456603	34,31555252	33,93975795

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F4 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.6'da 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA3 2,8301E-146 ile en düşük sonucu elde etmiştir. 30 çözüme ait sonuçlarda standart sapması 2,1817E-86 değerindedir. PSO ve WOA algoritmalarından iyi bir yakınsama davranışı göstermiştir.



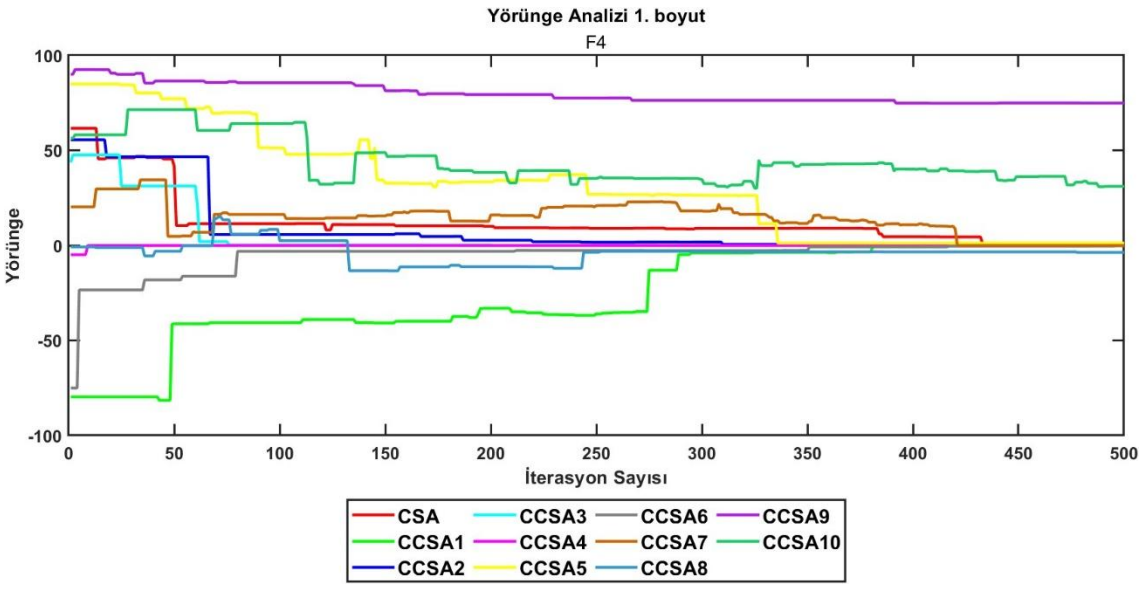
Şekil 4.24. F4 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F4 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.24'te verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler bu da güçlü keşifler yaptığını ancak kararlılıkta sınırlı davranış gösterdiğini ifade eder ancak optimum değerlerin düşük olması nedeniyle iyi bir yakınsama performansı sergilemektedir, bu durum yakınsama eğrisi grafiğinde de gözlemlenmektedir.



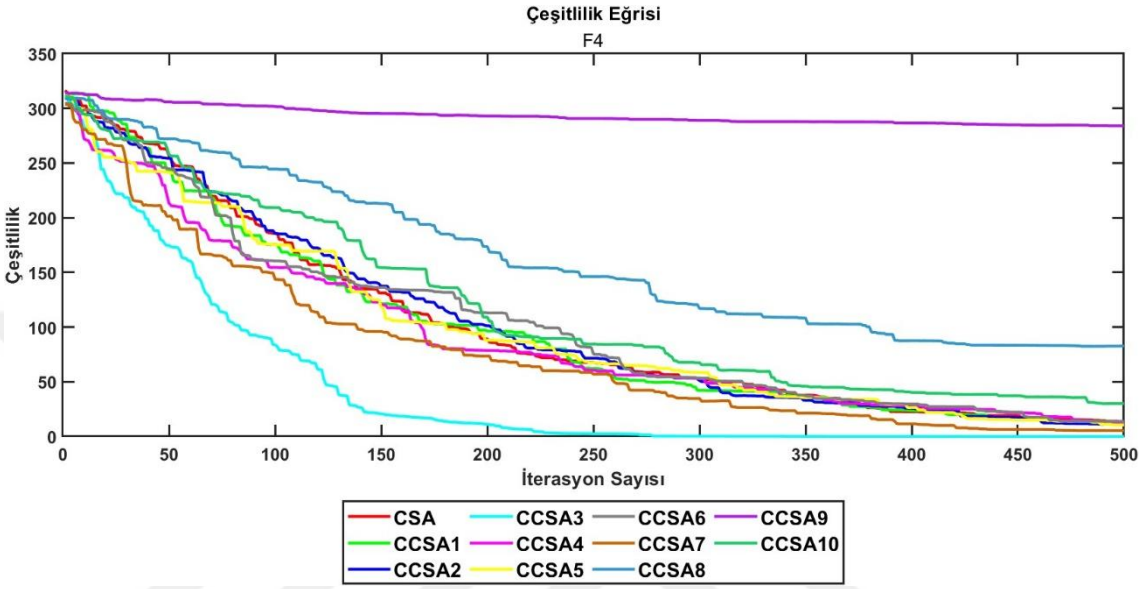
Şekil 4.25. F4 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F4 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.25'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir ancak onlara kısayla optimum değere daha iyi bir performansla yaklaşmıştır.



Şekil 4.26. F4 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F4 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.26'da verilmiştir. 1. boyutta yörüngeyi daha hızlı yakalayan algoritmalar olsa da CCSA3 55. iterasyonda yakalayarak rakiplerine göre iyi bir performans sergilemiştir.

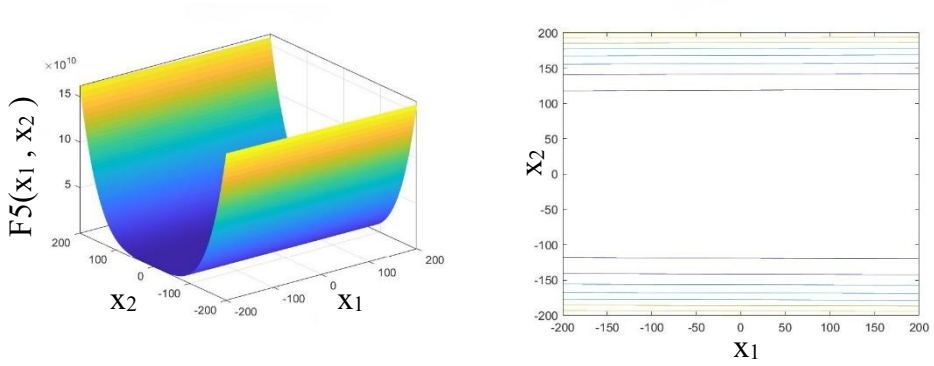


Şekil 4.27. F4 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

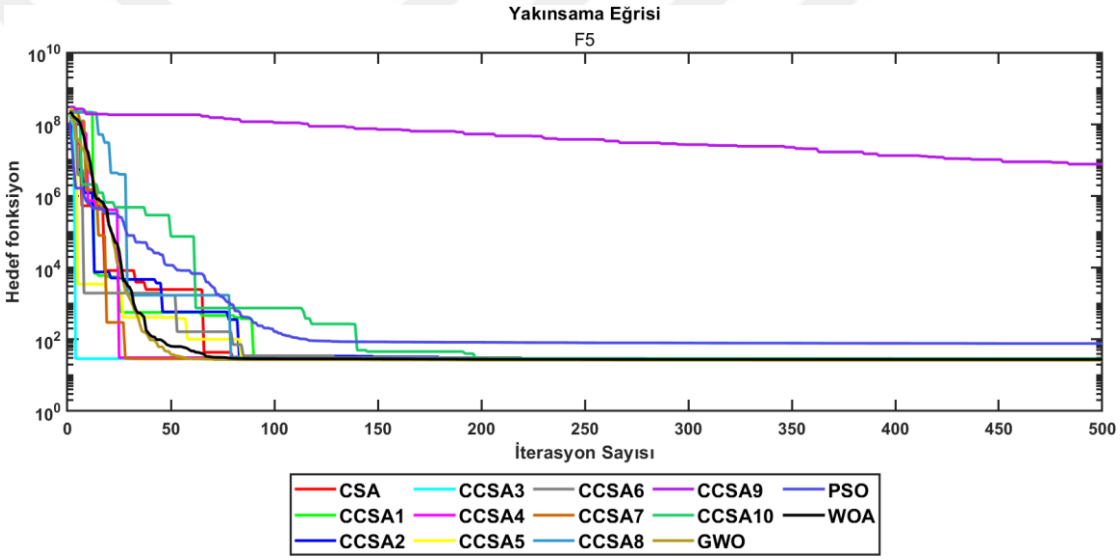
F4 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.27'de verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir, yakınsama eğrisindeki davranışı ve optimuma ulaşamaması da bu durumu desteklemektedir.

4.2.5. F5 Test Fonksiyonu

F5 test fonksiyonu tek modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.28'de F5 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.28. F5 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları



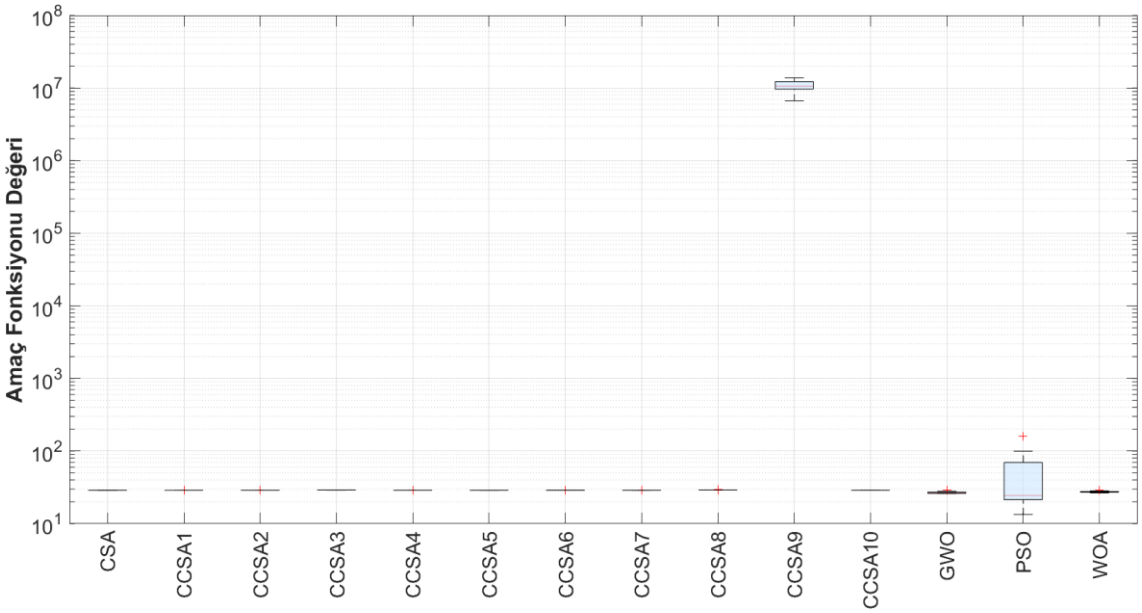
Şekil 4.29. F5 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F5 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.29'da algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. CCSA3 algoritması yakınsama eğrisinde erken iterasyonlarda sabitlense de diğer algoritmalar gibi optimum noktaya ulaşamamıştır.

Çizelge 4.7. F5 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

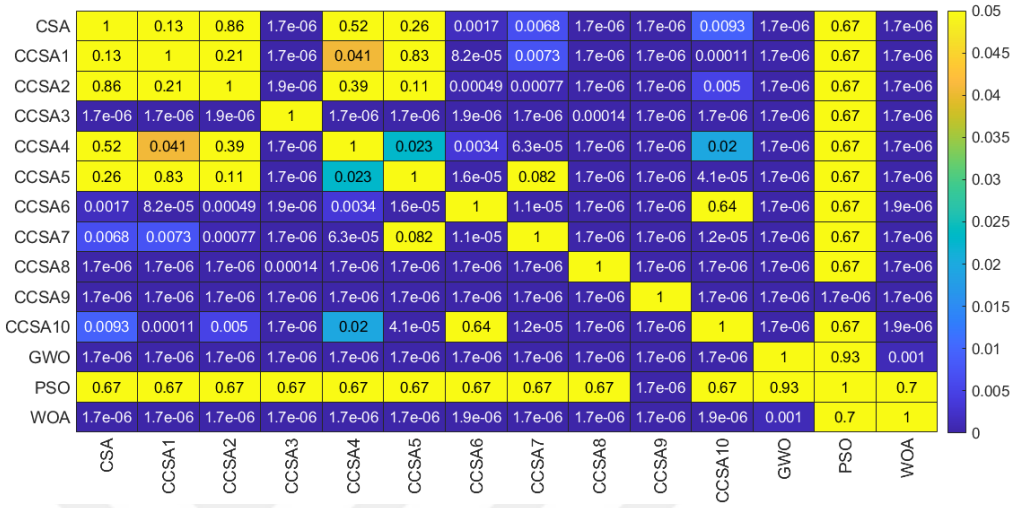
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	28,73417756	28,91137801	28,80975681	28,80857729	0,043343397
CCSA1	28,76107341	28,87208463	28,79723876	28,79210937	0,023603106
CCSA2	28,75257694	28,89324124	28,8083737	28,80636588	0,03431743
CCSA3	28,87282135	28,99819679	28,9378064	28,93928366	0,030639894
CCSA4	28,73354441	28,91843373	28,81537583	28,82090339	0,039638386
CCSA5	28,72641343	28,83810132	28,7934952	28,8029326	0,030745949
CCSA6	28,72961202	28,91419055	28,84504485	28,84907331	0,041354753
CCSA7	28,72747047	28,85247049	28,78083821	28,78196861	0,027263088
CCSA8	28,88239428	29,31069346	28,99240946	28,96990824	0,091852628
CCSA9	6674806,558	13780376,91	10648818,24	10649775,18	1906183,056
CCSA10	28,75271351	28,91668397	28,84027905	28,83731752	0,039577823
GWO	26,01398557	28,71738005	26,7173917	26,49479513	0,680107065
PSO	13,35547404	159,6051887	39,97587338	24,46403854	33,27077479
WOA	26,48759644	28,76396354	27,3907147	27,2692061	0,510645809

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F5 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7'de 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA9 Algoritması en kötü değerler üreterek problemden uzak kalmıştır. Diğer algoritmalar ise belirli bir noktada takılı kalarak problemde çözüme ulaşamamıştır.



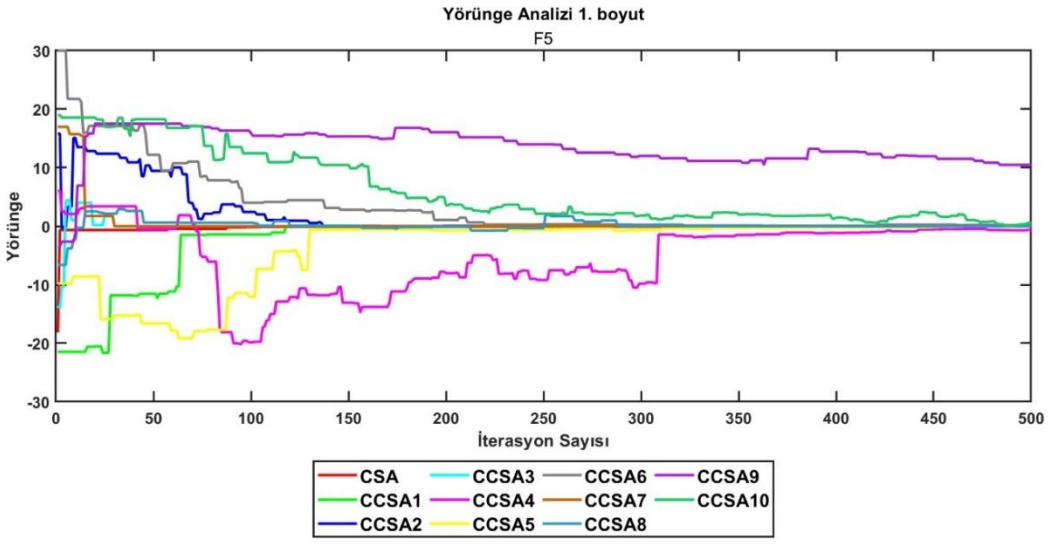
Şekil 4.30. F5 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F5 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.30'da verilmiştir. PSO geniş bir aralıkta değerler vermiş arama alanını geniş tutmuş ancak diğer algoritmalar gibi sonuca ulaşamamıştır.



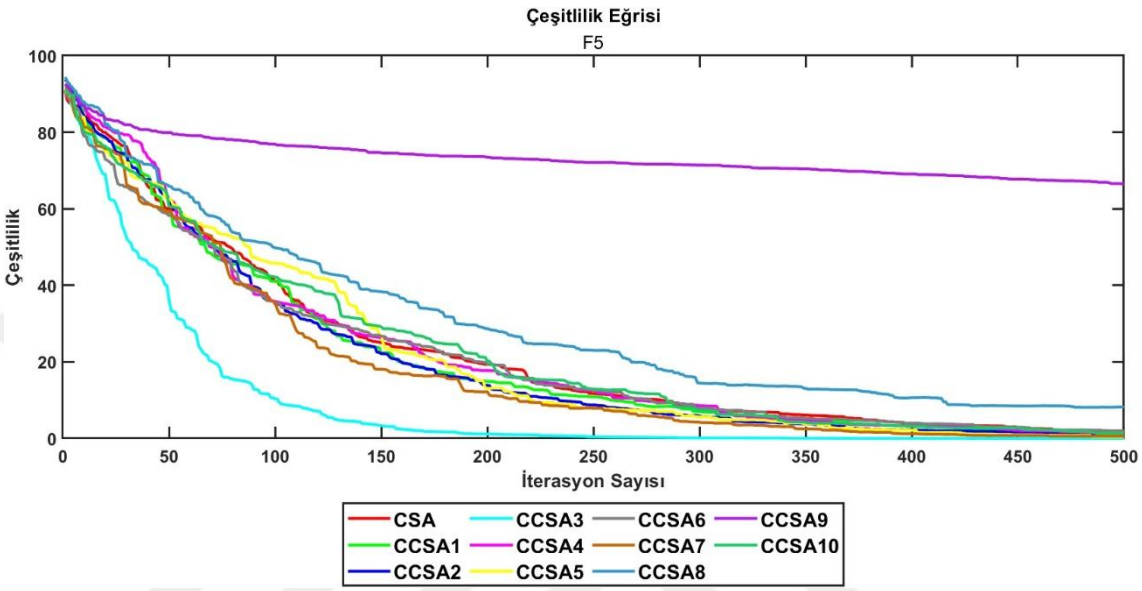
Şekil 4.31. F5 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F5 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.31'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. Kaotik hibrit algoritmalar istatistiksel olarak farklı aramalar yapsalar da sonuca ulaşma konusunda diğer algoritmalarla beraber başarısız olmuşlardır. PSO ile diğer algoritmalar arasında anlamlı bir fark oluşmamıştır.



Şekil 4.32. F5 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F5 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.32'de verilmiştir. Algoritmalar erken iterasyonlarda 1. boyut için yörüngede sabit kalmışlardır ancak çözüme ulamadıkları için bu bir dezavantaj olmuştur.

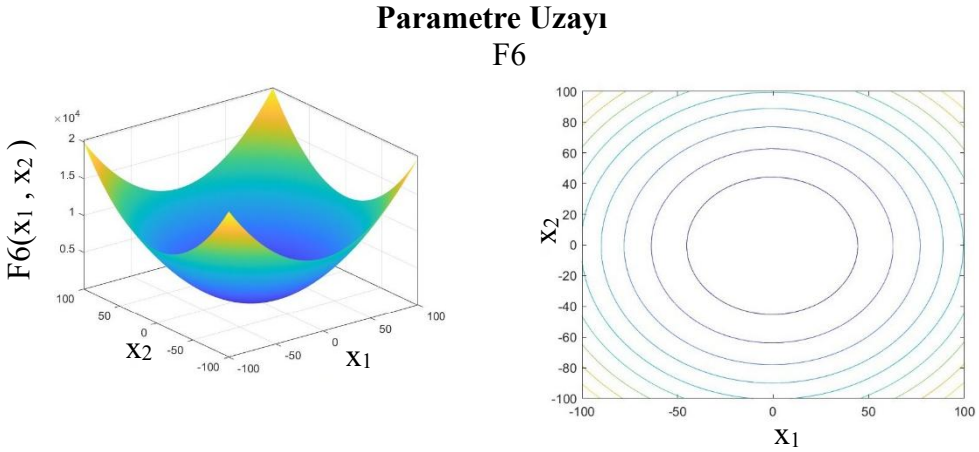


Şekil 4.33. F5 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

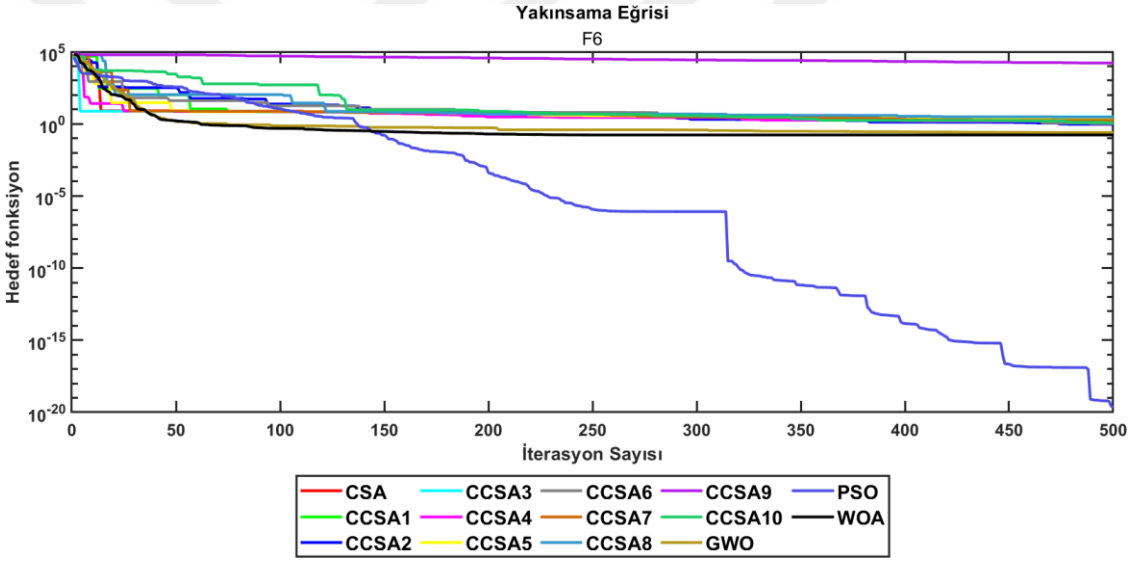
F5 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.33'te verilmiştir. Çeşitlilik, algoritmaların diğer fonksiyonlardaki performansına benzerlik gösterse de çözümü bulmada etkili olmamıştır.

4.2.6. F6 Test Fonksiyonu

F6 test fonksiyonu tek modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.34'te F6 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.34. F6 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları



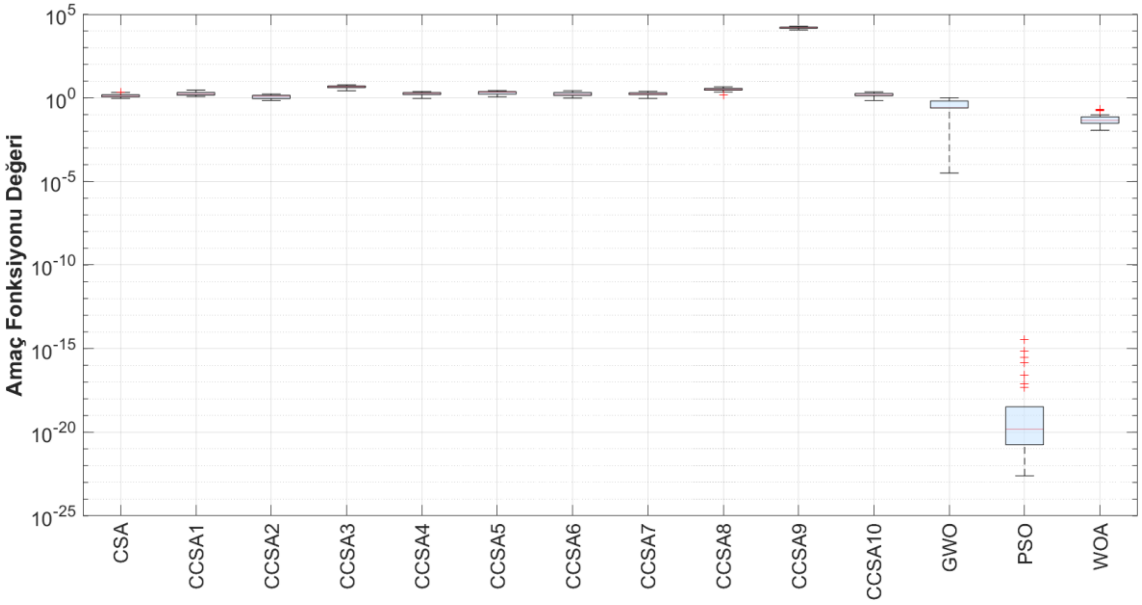
Şekil 4.35. F6 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F6 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.35'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. PSO algoritması güçlü bir yakınsama davranışı sergilemiştir. Kaotik hibrit yapılar erken yakınsama göstermiş ancak optimum noktaya yaklaşamamışlardır.

Çizelge 4.8. F6 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

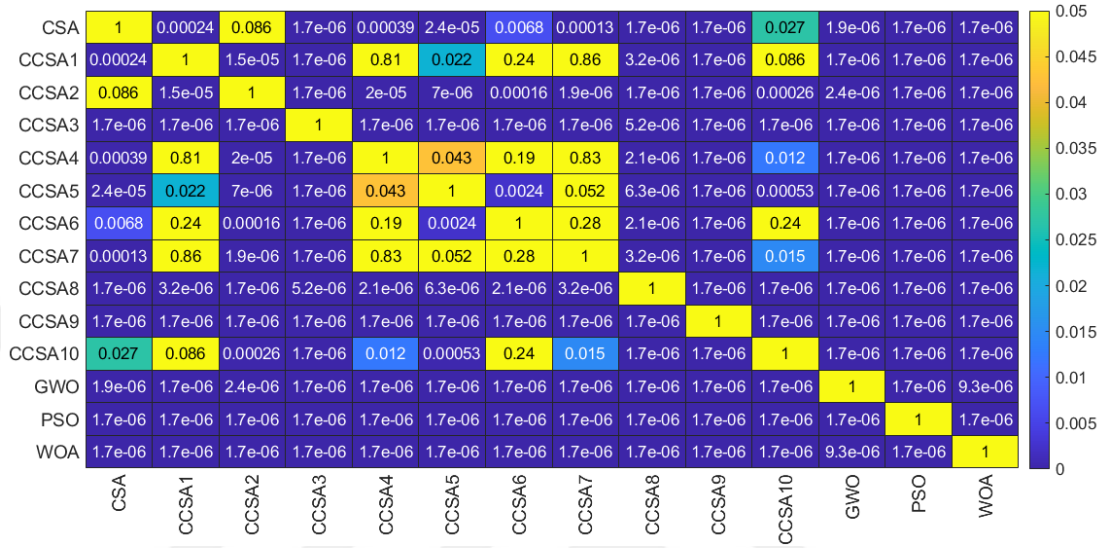
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0,925362979	2,237262477	1,36264344	1,287484389	0,340782955
CCSA1	1,193087295	2,864418228	1,829667313	1,750433867	0,472937734
CCSA2	0,699091972	1,696337415	1,187911198	1,230260425	0,279859663
CCSA3	2,674171838	5,966688946	4,599894042	4,694124933	0,837405991
CCSA4	0,926066645	2,392488604	1,802881568	1,868590706	0,367423325
CCSA5	1,145971742	2,711360879	2,050247718	2,162767811	0,44859814
CCSA6	0,973591598	2,699548783	1,69496274	1,628623267	0,425547496
CCSA7	0,927913667	2,480598039	1,796590753	1,753588322	0,379568194
CCSA8	1,446094347	4,625810947	3,208267441	3,200280907	0,688553998
CCSA9	11464,41353	19417,87592	15693,13144	15629,2821	2049,682184
CCSA10	0,696524885	2,240386745	1,576466303	1,554042767	0,343678388
GWO	3,1948E-05	1,004388601	0,410129228	0,255630988	0,300820438
PSO	2,48341E-23	3,50144E-15	1,57013E-16	1,54471E-20	6,47398E-16
WOA	0,011546362	0,200642198	0,060941054	0,044496809	0,047748656

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F6 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.8'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. PSO algoritmaları optimum noktayı 2,48341E-23 değerinde bulmuştur. Kaotik hibrit yapılar arasında CCSA2 ve CCSA10 optimum noktayı bulmakta en iyi performansları sergilemişlerdir.



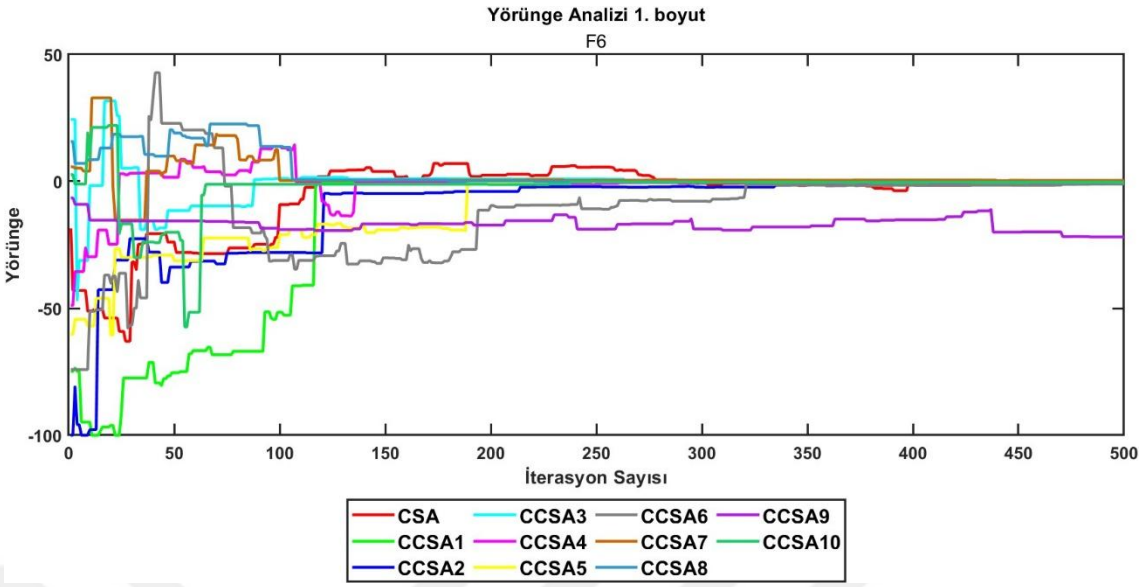
Şekil 4.36. F6 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F6 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.36'da verilmiştir. Kaotik hibrit yapılar dar bir alanda arama gerçekleştirmiştir. 30 arama içinde benzer çözümler ürettiklerini ve sabit bir davranış sergilediklerini göstermektedir. Kararlı bir davranış gibi görünse de optimum noktayı bulmakta problem yaşamışlardır.



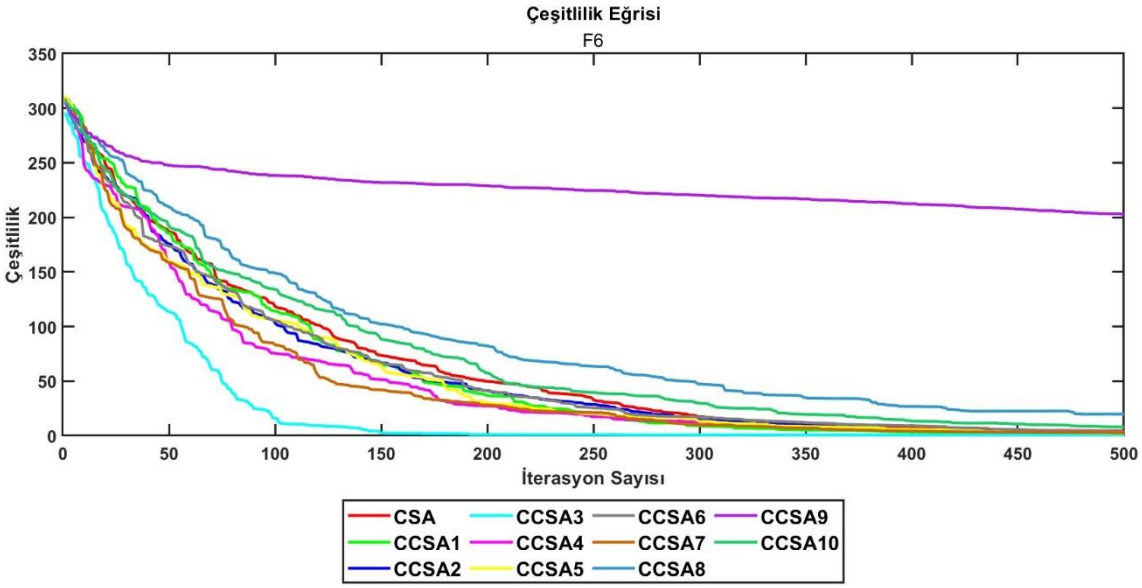
Şekil 4.37. F6 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F6 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.37'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koyma konusunda literatürdeki algoritmalara benzer bir davranış sergilese de optimum noktayı bulmakta düşük bir performans sergilemiştir.



Şekil 4.38. F6 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F6 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.38'de verilmiştir. Algoritmalar 200. iterasyona kadar sabit bir yörüngeye geçememişlerdir. Buda optimuma ulaşmadaki zorluğu ifade etmektedir.

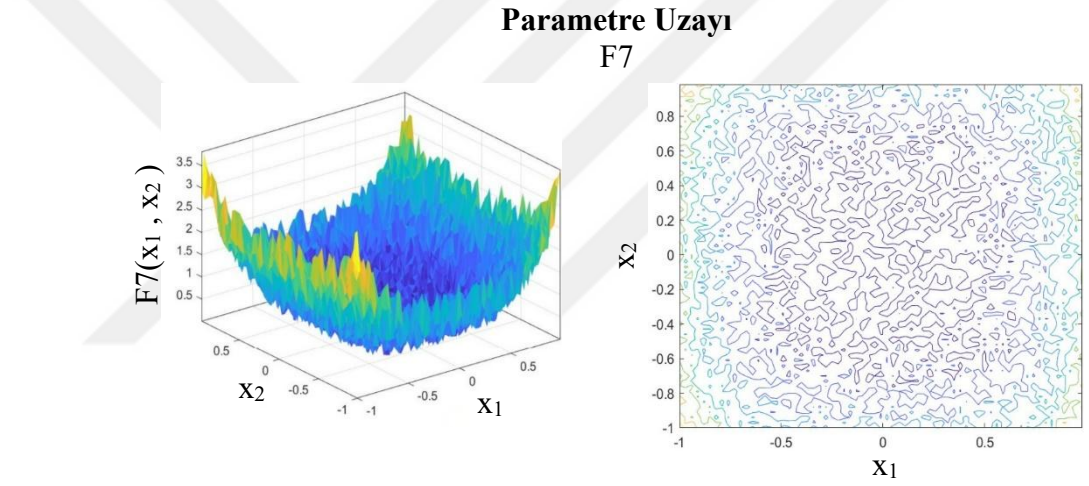


Şekil 4.39. F6 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

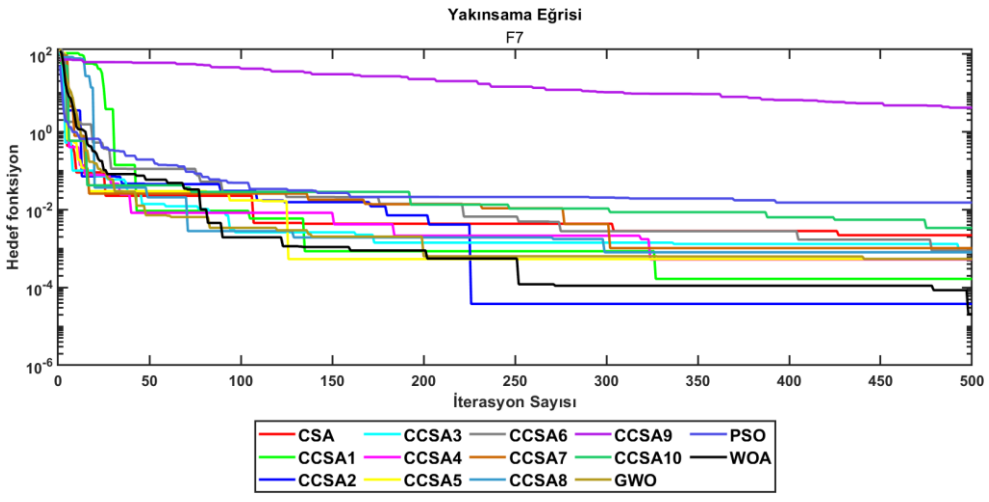
F6 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.39'da verilmiştir. Çeşitlilik, algoritmaların diğer fonksiyonlardaki performansına benzerlik gösterse de çözümü bulmada etkili olmamıştır.

4.2.7. F7 Test Fonksiyonu

F7 test fonksiyonu tek modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.40'ta F7 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.40. F7 Test Fonksiyonu Parametre Uzayları



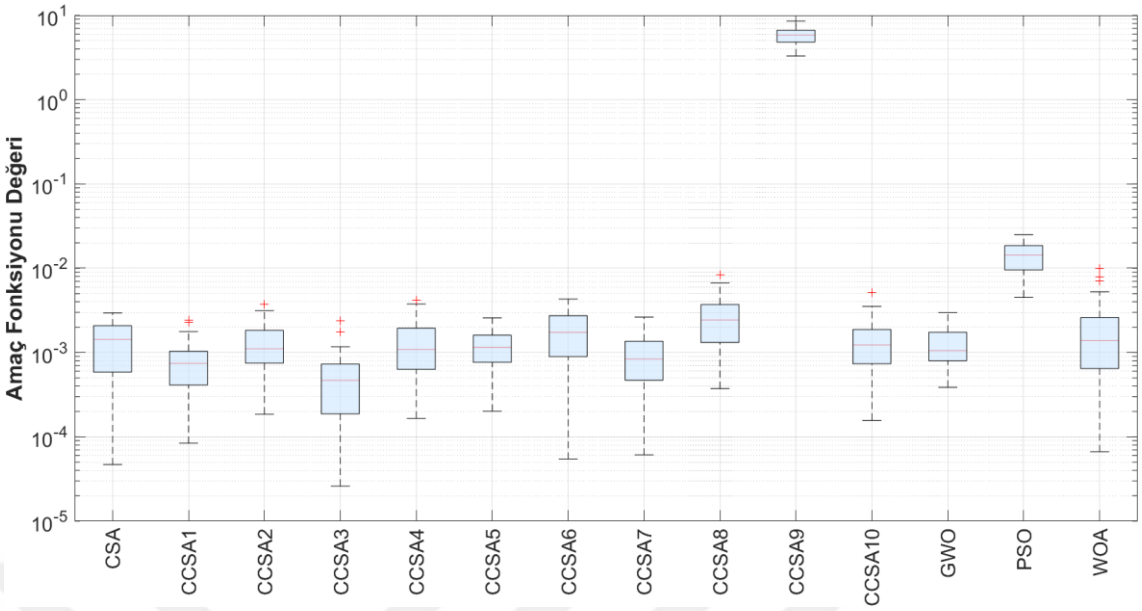
Şekil 4.41. F7 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F7 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.41'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. PSO ve WOA algoritmaları erken yakınsama göstermiştir. CCSA1 bu algoritmalara yakın bir yakınsama davranışı sergileyerek optimum noktaya yaklaşmıştır.

Çizelge 4.9. F7 Test Fonksiyonu 30 Çözüme ait Sonuçlar

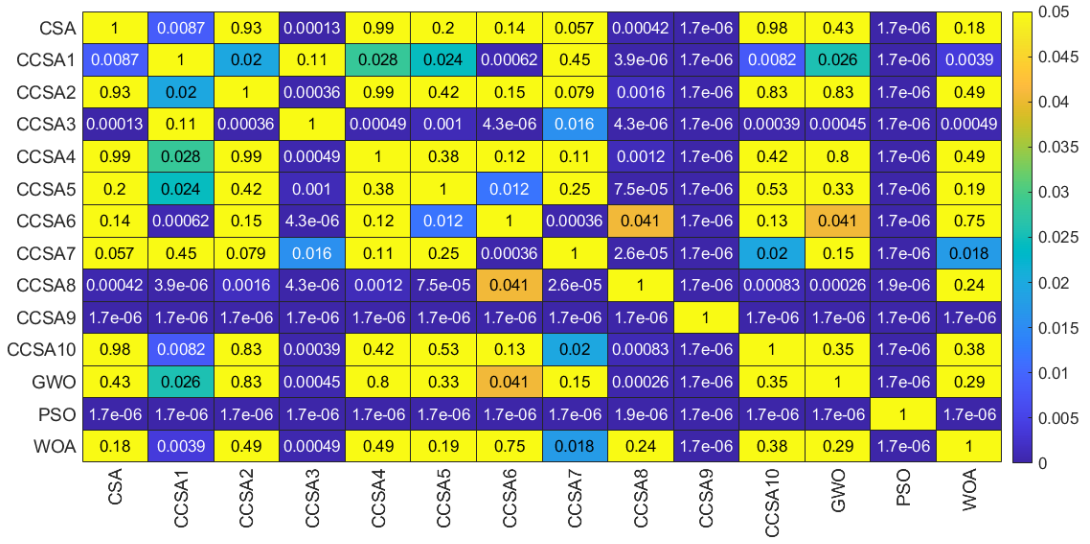
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	4,68704E-05	0,002955067	0,001388287	0,00143292	0,000805462
CCSA1	8,40238E-05	0,002402158	0,000821385	0,000744773	0,000590466
CCSA2	0,000185342	0,003749784	0,001411595	0,001110305	0,00091523
CCSA3	2,59802E-05	0,002363306	0,000588735	0,000467693	0,000531775
CCSA4	0,000165485	0,00417357	0,001402301	0,001085624	0,001054258
CCSA5	0,000201489	0,002579589	0,00118152	0,001147641	0,000598984
CCSA6	5,46477E-05	0,004305471	0,001893927	0,001735255	0,001233192
CCSA7	6,10558E-05	0,002634032	0,000969701	0,00083664	0,000701697
CCSA8	0,000373108	0,008395285	0,002878061	0,002434633	0,001965174
CCSA9	3,30062963	8,546695597	5,771334537	5,843846193	1,133377167
CCSA10	0,000156583	0,005103399	0,00147116	0,001227103	0,001045384
GWO	0,00038632	0,002988164	0,001288554	0,001053492	0,000666525
PSO	0,004503642	0,024937307	0,014380668	0,014358925	0,005416955
WOA	6,66073E-05	0,009872276	0,002262714	0,001384332	0,002492792

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F7 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.9'da 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA3 2,59802E-05 ile en düşük sonucu elde ederek kaotik hibrit algoritmalar içinde en iyi sonucu vermiştir. PSO ve WOA algoritmaları ile rekabet ederek yüksek bir başarı göstermiştir.



Şekil 4.42. F7 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

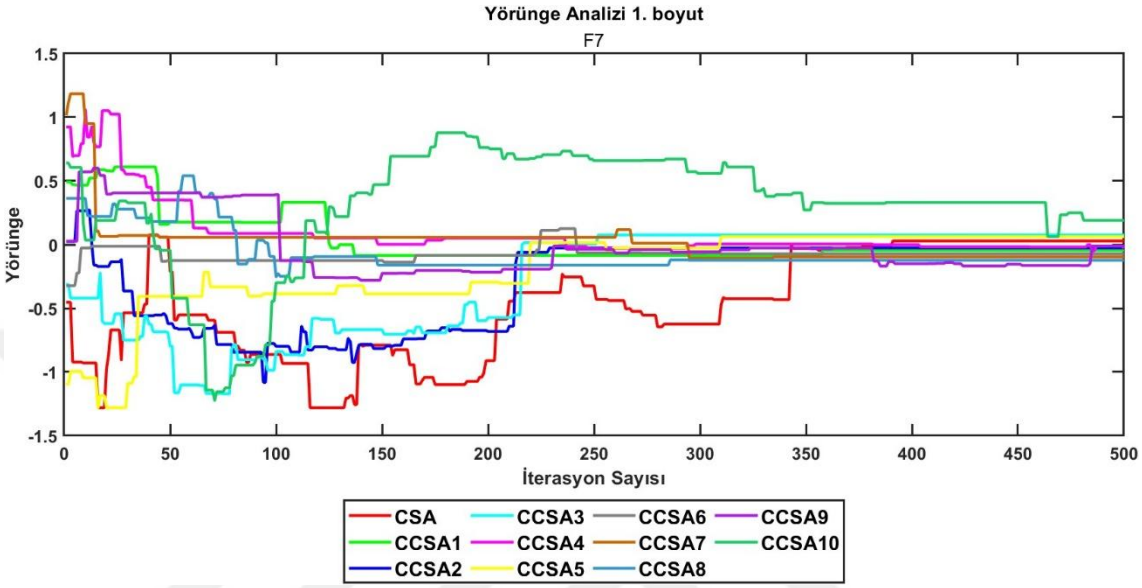
Algoritmaların F7 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.42'de verilmiştir. Kaotik yapılar CCSA9 dışında literatürdeki algoritmalara yakın bir dağılım göstermişlerdir. Optimuma ulaşma konusunda benzer bir performans yakalamışlardır.



Şekil 4.43. F7 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

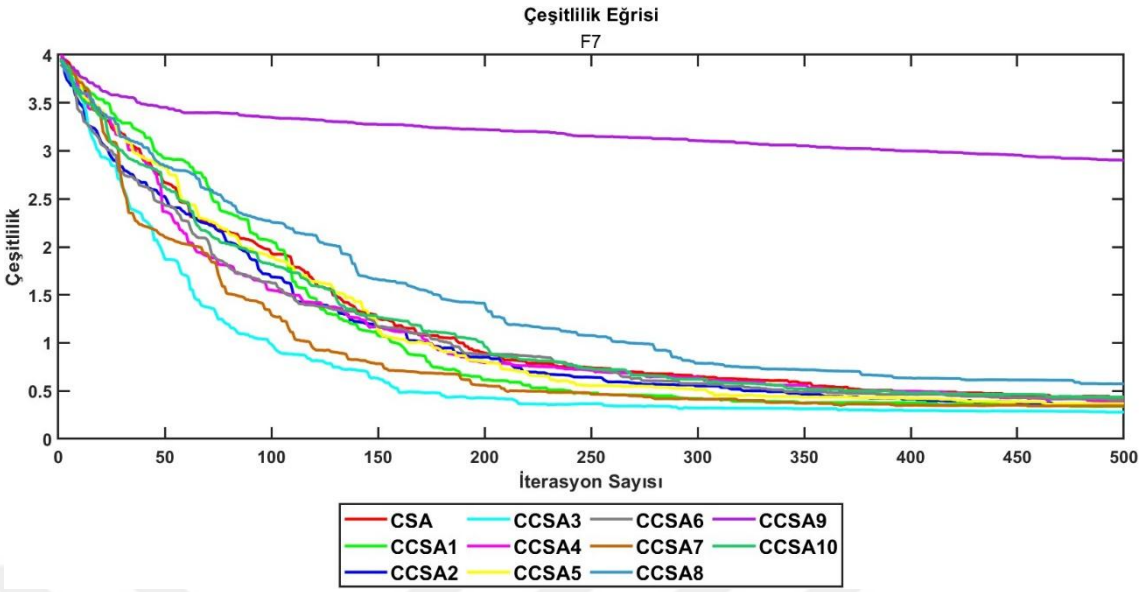
Algoritmaların F7 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.43'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var

olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve PSO algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir. Kaotik yapılardan CCSA1 ile benzer bir performanstadır. Algoritma performans dağılımı da bu durumu desteklemektedir.



Şekil 4.44. F7 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F7 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.44'te verilmiştir. Algoritmalar yüksek genlikli davranış yaptıktan sonra 200. İterasyondan sonra sabit genliğe geçmiştir. Bu durumda yakınsama eğrisindeki davranışlarını desteklemektedir.

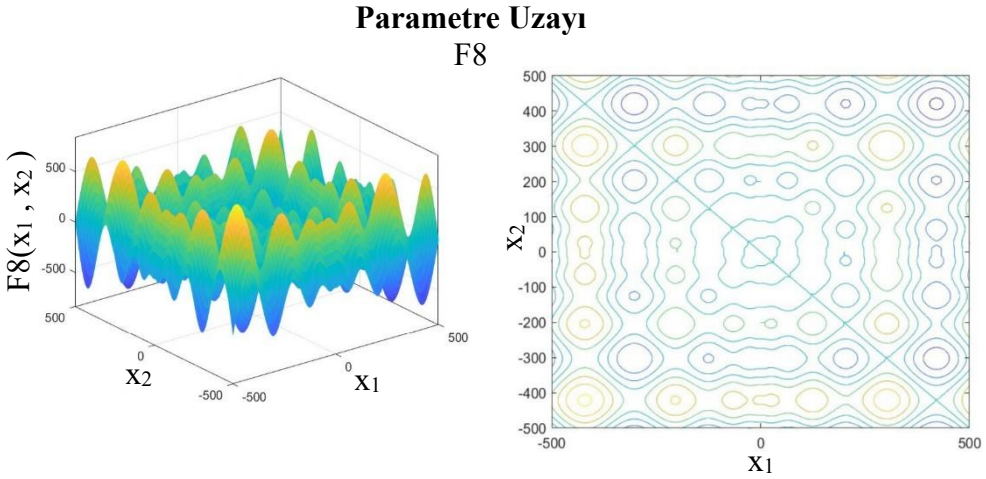


Şekil 4.45. F7 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

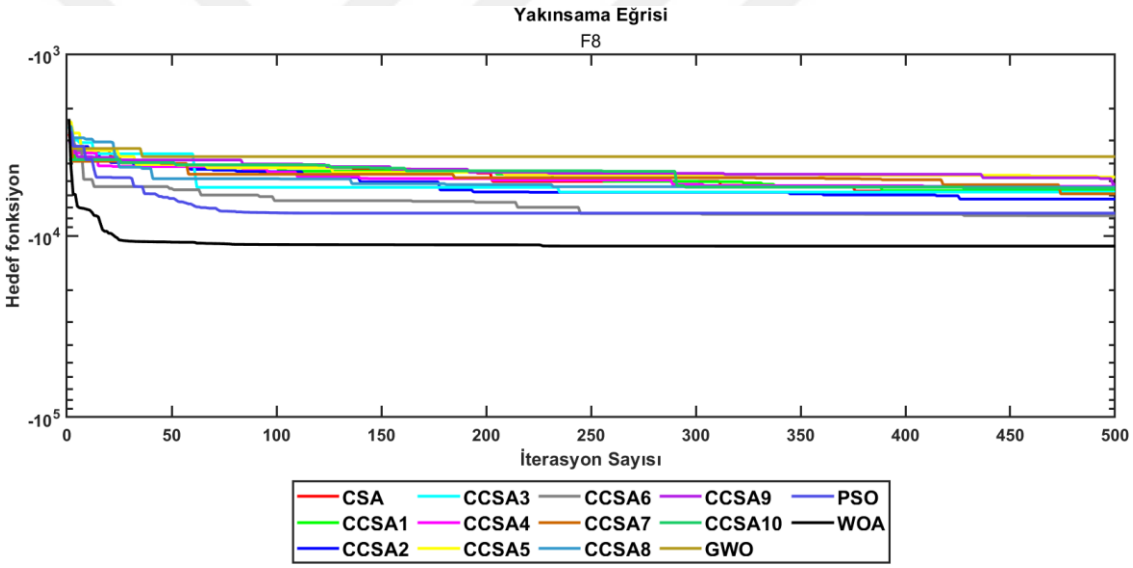
F7 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.45'te verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.8. F8 Test Fonksiyonu

F8 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.46'de F8 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.46. F8 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı

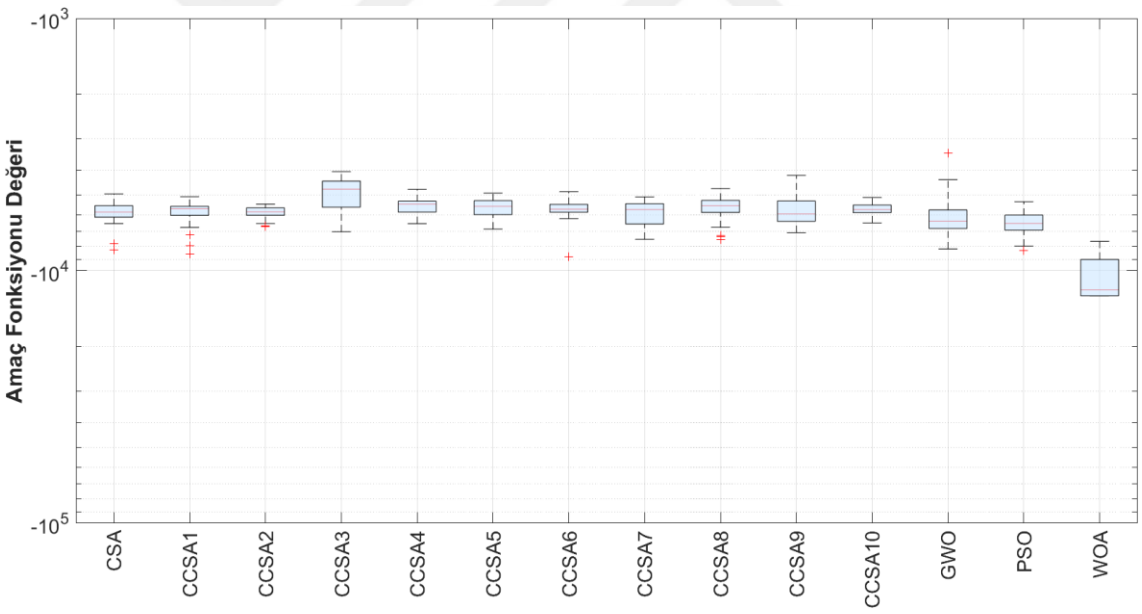


Şekil 4.47. F8 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F8 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.47'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Tüm algoritmalar erken iterasyonlarda yakınsama gerçekleştirmişlerdir. Ancak Çizelge 4.10'da verilen 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri incelendiğinde algoritmalar optimum değere ulaşmada problem yaşamışlardır. Yüksek standart sapma değerleriyle çözümler kendi içinde değişkenlik göstermektedir.

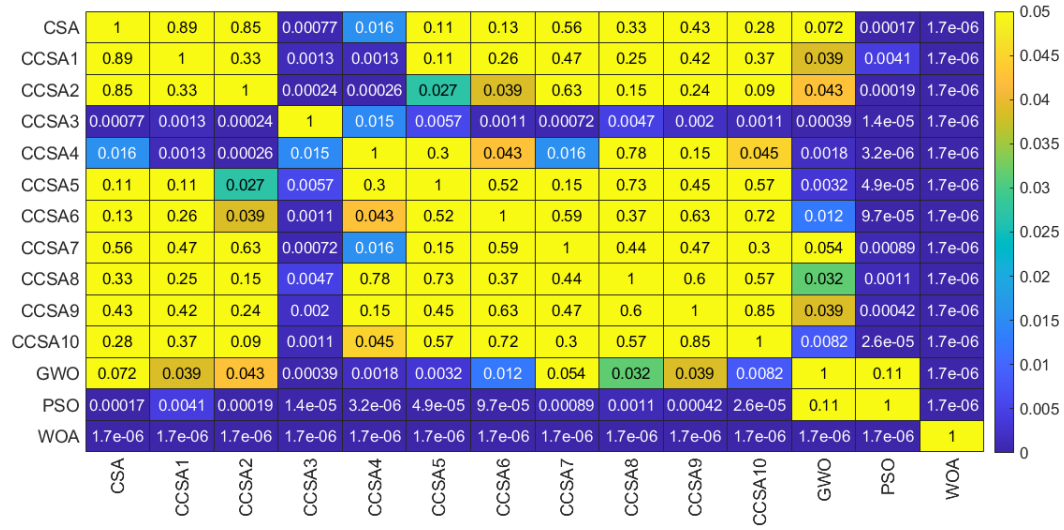
Çizelge 4.10. F8 Test Fonksiyonu 30 Çözüme ait Sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	-4961,429217	-8285,892903	-5950,984574	-5851,711169	681,2128556
CCSA1	-5087,956619	-8553,192989	-5954,72655	-5676,307931	763,8739509
CCSA2	-5444,519004	-6674,423187	-5898,33655	-5837,182825	346,2413422
CCSA3	-4045,915175	-7005,800168	-5068,111781	-4750,815833	844,8181687
CCSA4	-4756,86372	-6501,77077	-5530,445023	-5442,915852	397,8208762
CCSA5	-4923,186816	-6838,070801	-5646,550603	-5554,474869	537,1025085
CCSA6	-4863,214662	-8780,429638	-5769,077178	-5700,781178	652,5053889
CCSA7	-5096,915122	-7506,208155	-5909,256163	-5716,246731	657,2367536
CCSA8	-4727,451936	-7516,464217	-5713,332604	-5527,673531	714,8550003
CCSA9	-4188,430117	-7059,871836	-5753,709272	-5948,079213	720,3473136
CCSA10	-5120,360519	-6463,707146	-5729,737781	-5716,034716	328,5622228
GWO	-3420,98108	-8195,258456	-6240,507337	-6352,557044	995,7263609
PSO	-5323,898763	-8304,030964	-6538,826531	-6488,500822	700,5558046
WOA	-7650,554225	-12569,18654	-10959,41264	-11894,19763	1783,087912



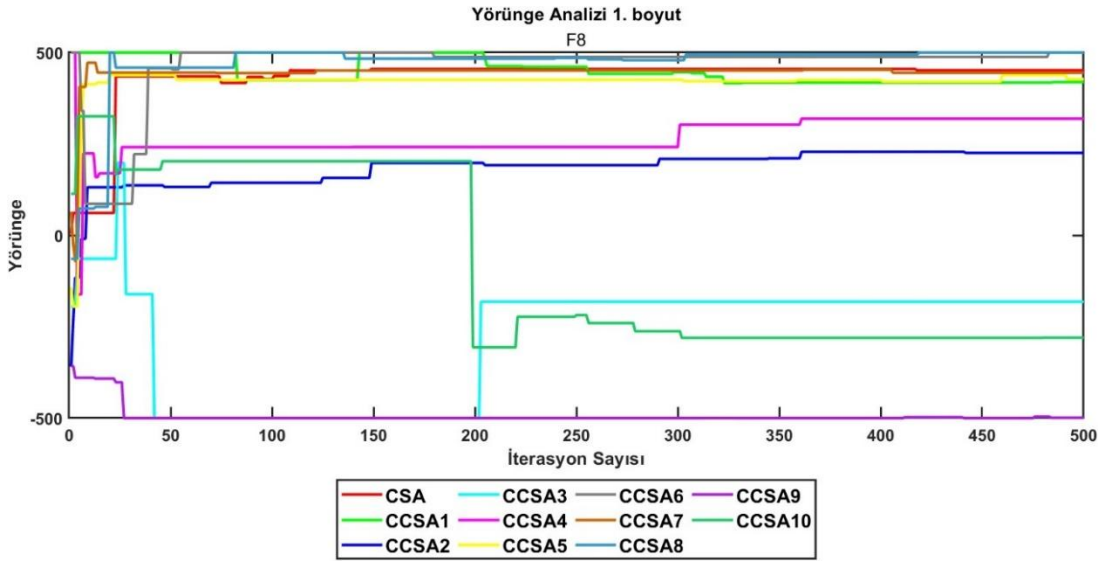
Şekil 4.48. F8 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F8 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.48'de verilmiştir. Tüm algoritmaların belirli değer aralıklarında arama yaptığı gözlemlenmiştir. Kaotik yapılardan CCSA3 daha geniş aralıkta çalışmıştır.



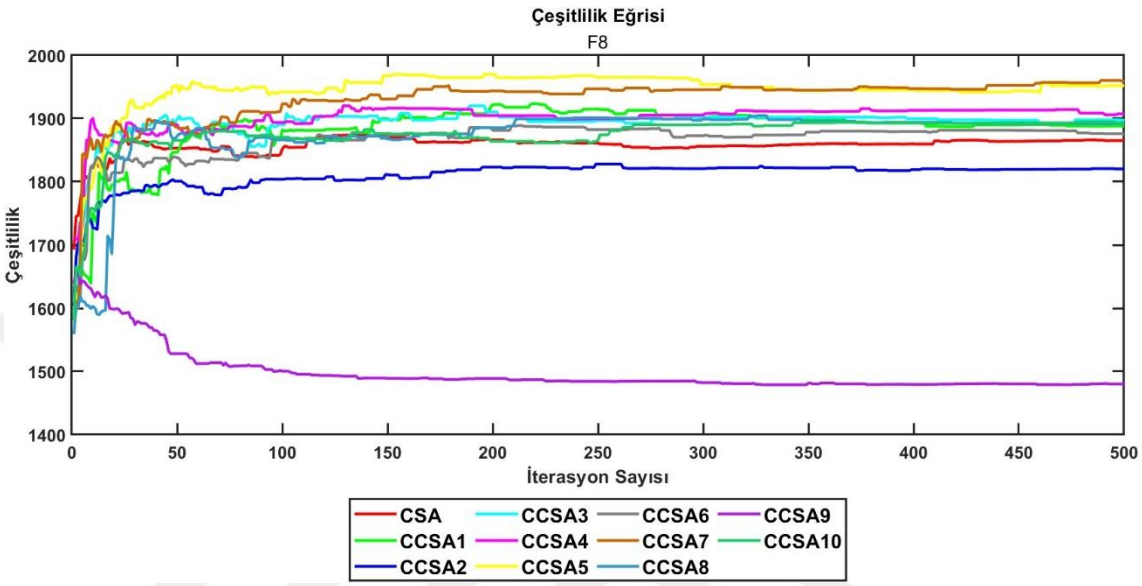
Şekil 4.49. F8 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F8 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.49'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir. Buda algoritma performans dağılımındaki kutu grafiğini desteklemektedir. Ancak optimum noktaya ulaşmadaki performansı tüm algoritmalar gibi düşüktür.



Şekil 4.50. F8 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F8 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.50'de verilmiştir. Algoritmaların 1. Boyuttaki yörünge davranışları birbirinden farklıdır ve genliği yakalamakta zorlanmışlardır. Buda optimuma yakınsamadaki problemin bir göstergesidir.

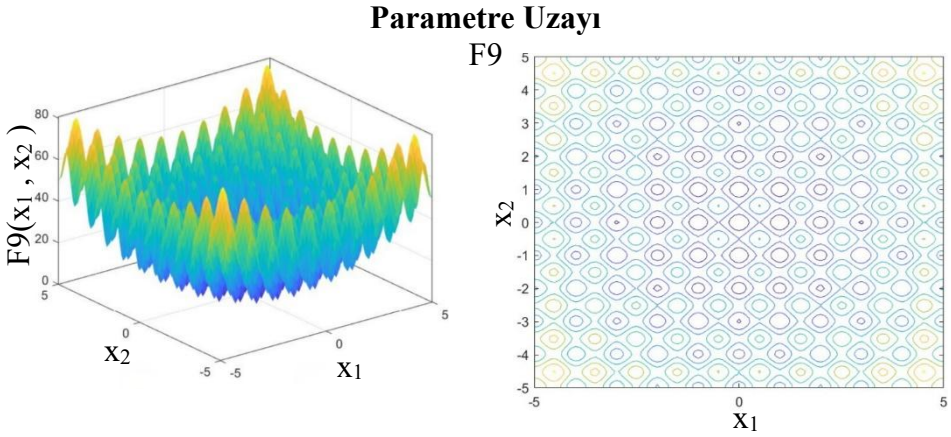


Şekil 4.51. F8 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

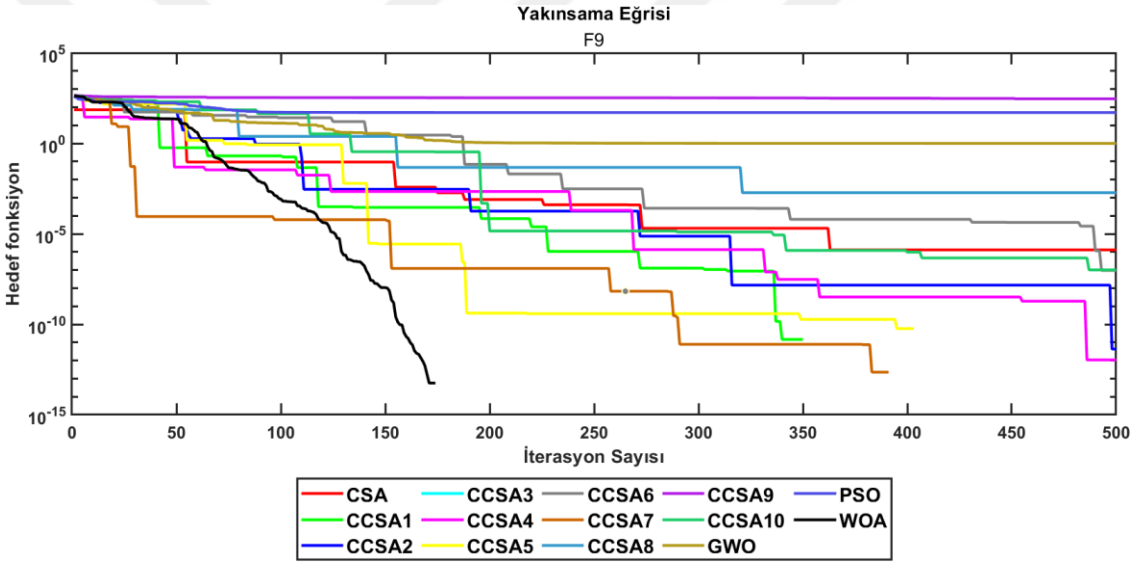
F8 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.52'de verilmiştir. Hibrit kaotik yapılar CCSA9 haricinde benzer çeşitlilik eğrileri göstermiştir. Kutu grafiğindeki davranışı desteklemektedir.

4.2.9. F9 Test Fonksiyonu

F9 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.52'de F9 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.52. F9 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı

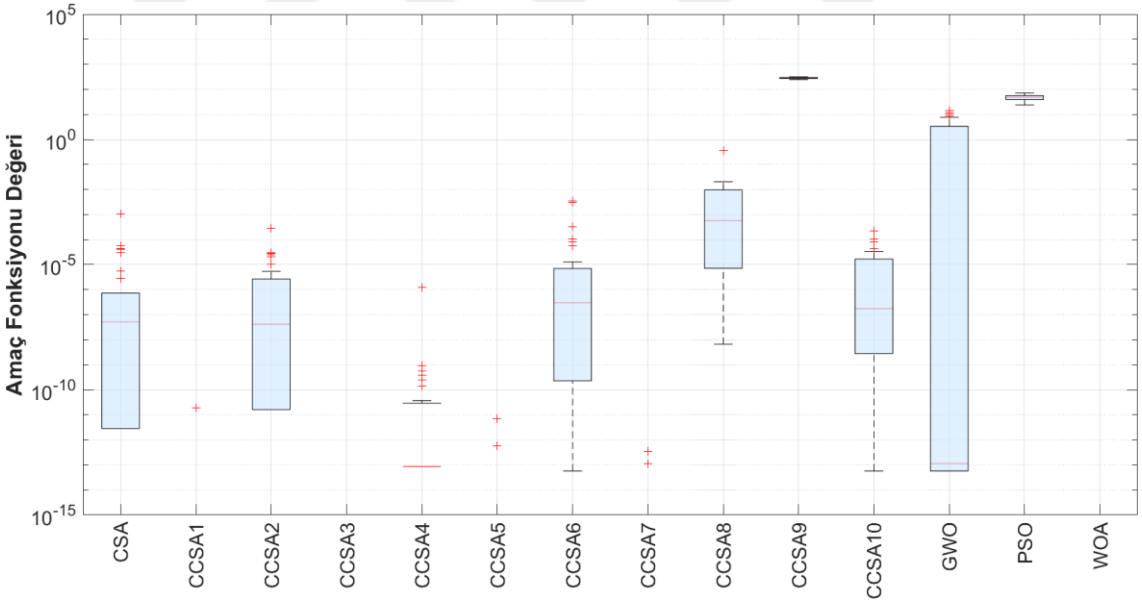


Şekil 4.53. F9 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F9 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.53'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Yakınsama eğrisini değerlendirilirken, Çizelge 4.10'da verilen 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri de incelenirse algoritmalar optimum değere ulaşmada yüksek bir performans sergilemişlerdir. Yüksek standart sapma değerleriyle çözümler kendi içinde değişkenlik göstermektedir. CCSA3 algoritması optimuma ulaşmış ve bunu her çözümde gerçekleştirmiştir. WOA ile benzer davranış sergilemiştir.

Çizelge 4.11. F9 Test Fonksiyonu 30 Çözüme ait Sonuçlar

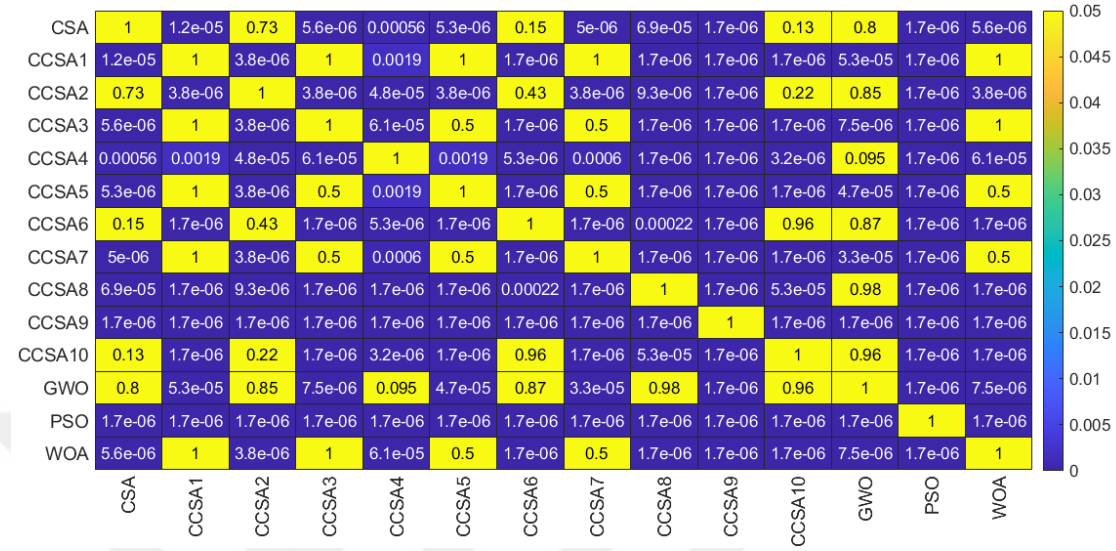
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0	0,001035328	4,05493E-05	5,14659E-08	0,000188478
CCSA1	0	1,89857E-11	6,32857E-13	0	3,4663E-12
CCSA2	0	0,000276281	1,33794E-05	4,17615E-08	5,04258E-05
CCSA3	0	0	0	0	0
CCSA4	0	1,2099E-06	4,04075E-08	8,52651E-14	2,20883E-07
CCSA5	0	6,82121E-12	2,46321E-13	0	1,24612E-12
CCSA6	5,68434E-14	0,003383796	0,000234695	3,00252E-07	0,000816556
CCSA7	0	3,41061E-13	1,51582E-14	0	6,49546E-14
CCSA8	6,6297E-09	0,356141355	0,016276716	0,000573953	0,0645412
CCSA9	247,1643793	316,8132755	285,7858733	291,4056126	18,44377077
CCSA10	5,68434E-14	0,000214663	1,87505E-05	1,73227E-07	4,44286E-05
GWO	0	14,69344924	2,220261529	1,13687E-13	4,12678303
PSO	23,87900729	71,63692099	48,78608581	48,25543105	12,76436367
WOA	0	0	0	0	0



Şekil 4.54. F9 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

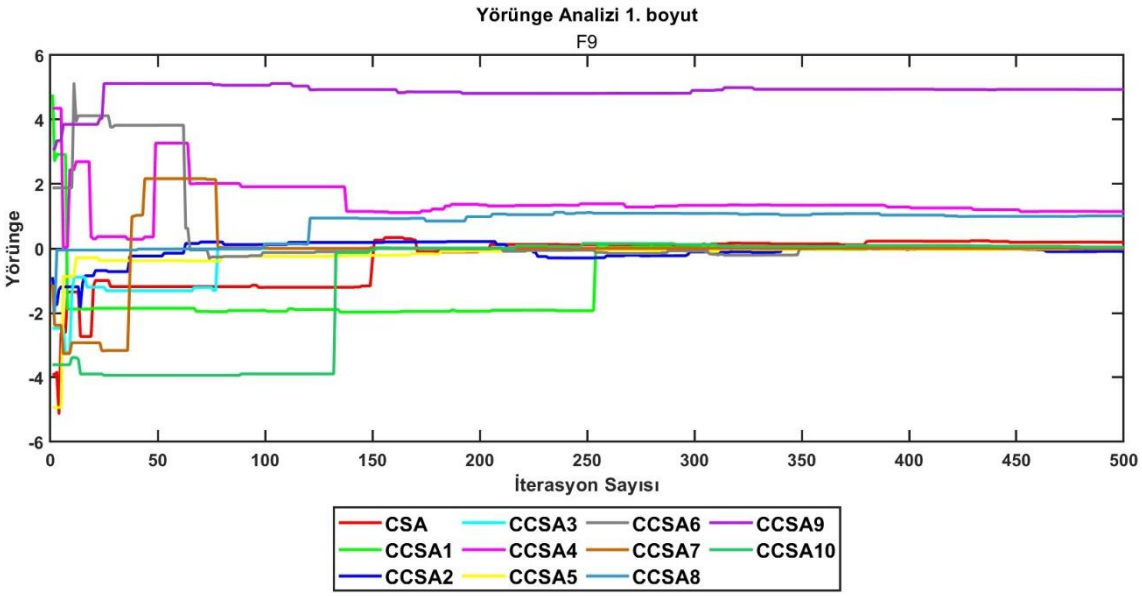
Algoritmaların F9 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.54'te verilmiştir. CCSA3 ve WOA diğer algoritmalara kıyasla logaritmik ölçekte daha iyi performans göstermişlerdir. CCSA 1 ve CCSA7 bu algoritmaları takip etmiştir. GWO çok geniş bir

aralıkta çözümler üretmiştir, standart sapmasının da yüksek olması itibariyle kararsız bir davranış sergilemiştir.



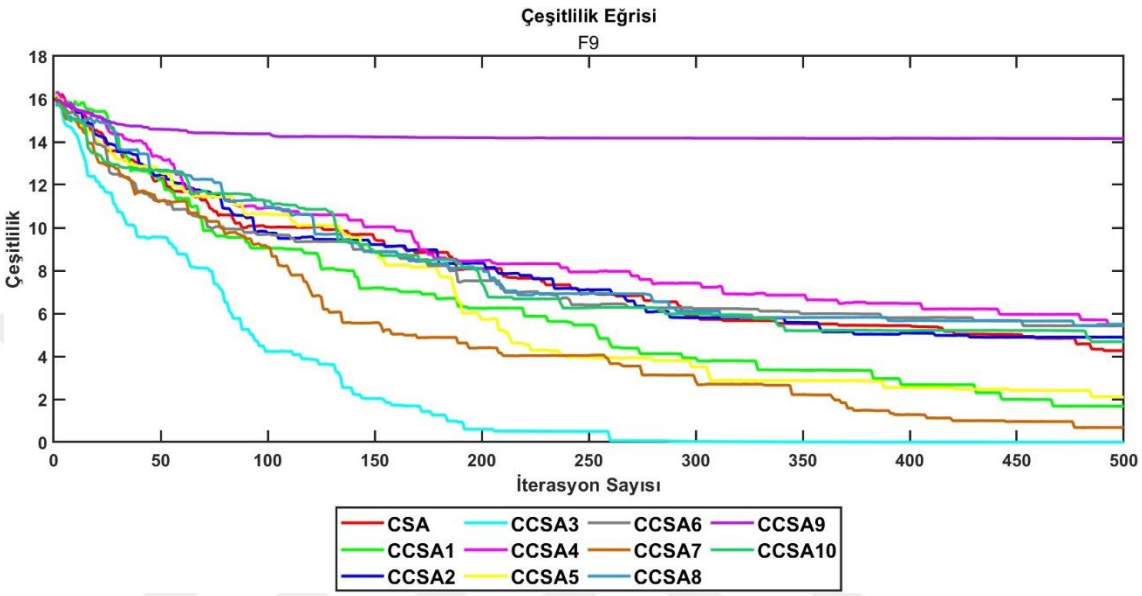
Şekil 4.55. F9 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F9 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.55'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA1, CCSA3 ve WOA optimumu bulma konusunda benzer bir performans sergilediklerinden dolayı istatistiksel olarak da birbirlerine benzemektedirler.



Şekil 4.56. F9 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F9 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.56'da verilmiştir. Algoritmalar 1. Boyutta yörüngeyi erken iterasyonlarda sabit genlikle yakalamışlardır. Buda optimumu bulma konusundaki performanslarını desteklemektedir.

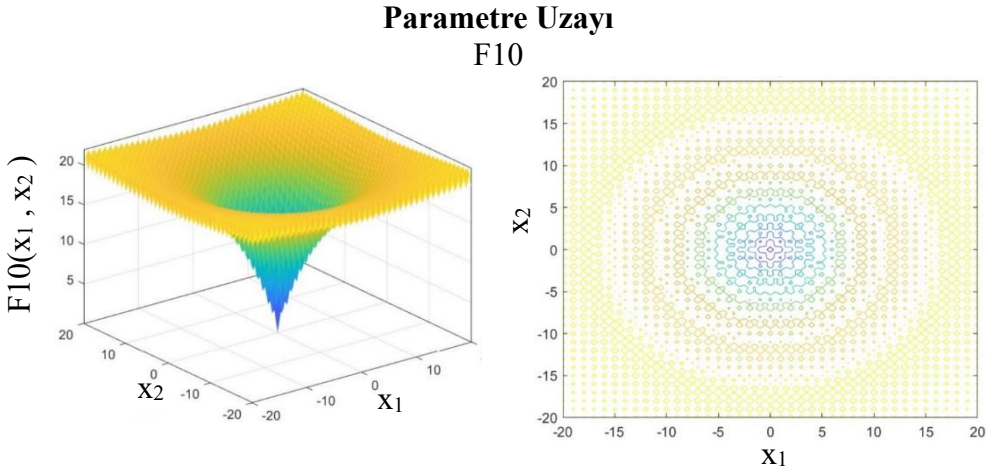


Şekil 4.57. F9 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

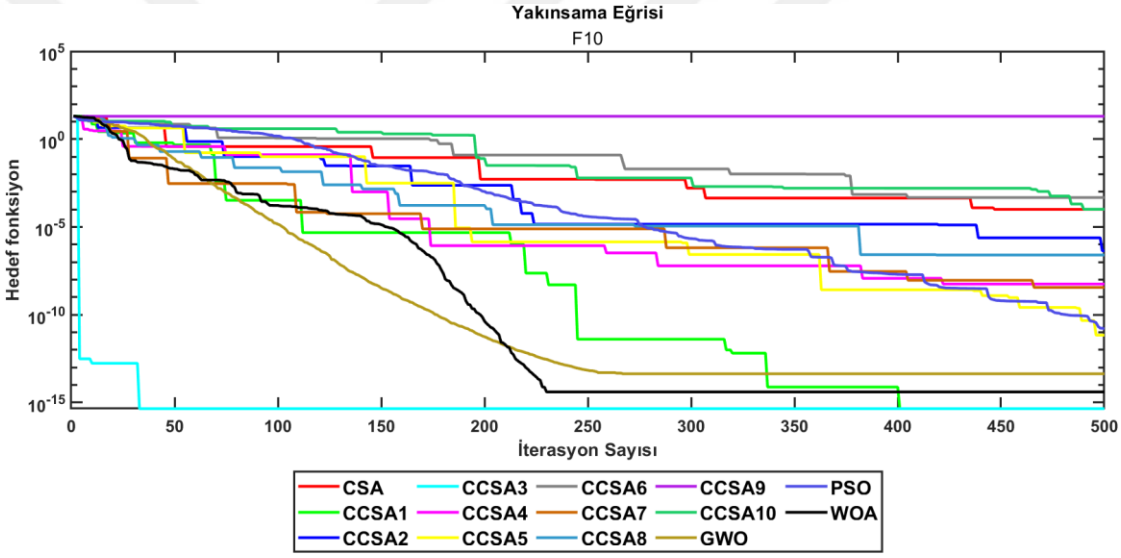
F9 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.57'de verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.10. F10 Test Fonksiyonu

F10 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.58'de F10 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir



Şekil 4.58. F10 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



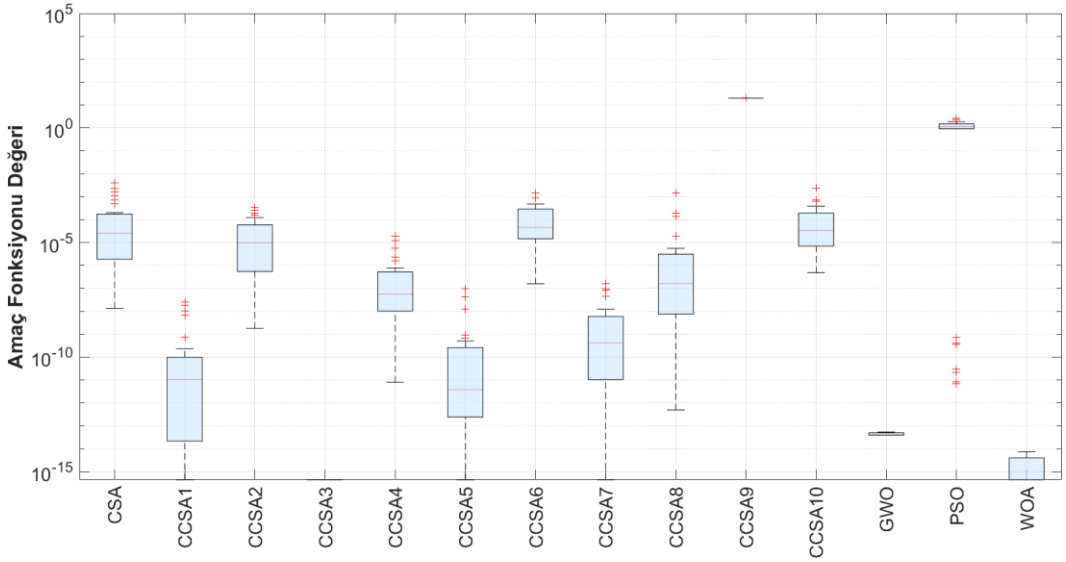
Şekil 4.59. F10 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F10 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.59'da algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. CCSA3 algoritması merdiven şeklinde inerek yaklaşık 30. iterasyonda yakınsama sağlamıştır ve en yakın rakibi CCSA1 ve WOA göre iyi bir performans sergilemiştir.

Çizelge 4.12. F10 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

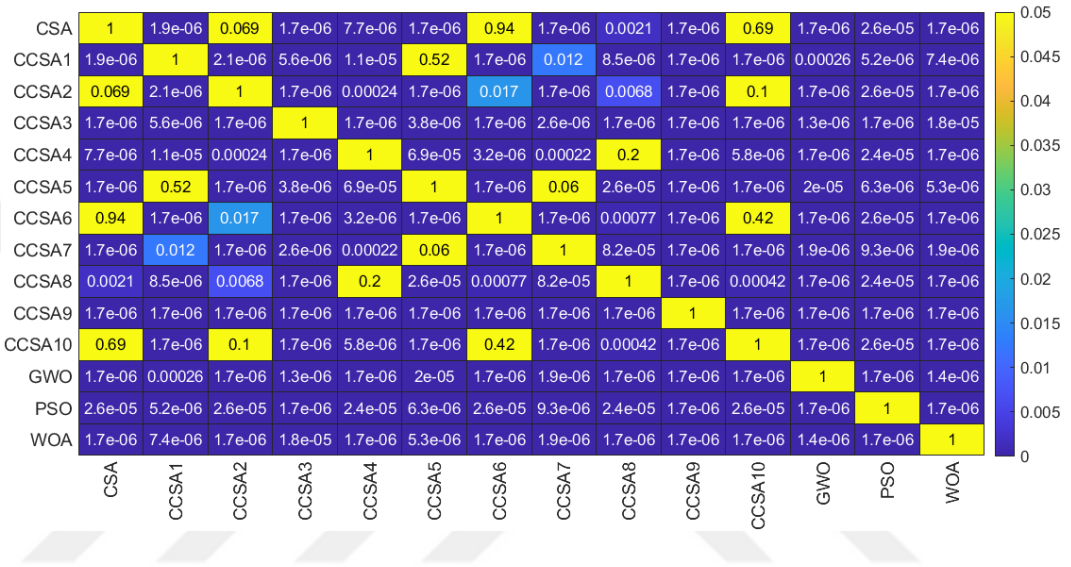
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	1,34455E-08	0,004042275	0,000377379	2,56108E-05	0,000872188
CCSA1	4,44089E-16	2,53611E-08	2,07301E-09	1,06017E-11	5,90144E-09
CCSA2	1,7927E-09	0,000334508	5,16921E-05	9,56758E-06	8,44993E-05
CCSA3	4,44089E-16	4,44089E-16	4,44089E-16	4,44089E-16	0
CCSA4	7,9976E-12	1,9511E-05	1,50534E-06	5,72678E-08	4,18291E-06
CCSA5	4,44089E-16	9,85905E-08	5,23358E-09	3,81428E-12	1,93523E-08
CCSA6	1,58628E-07	0,001460601	0,000189657	4,60541E-05	0,000310808
CCSA7	4,44089E-16	1,60306E-07	1,46826E-08	4,17101E-10	3,64173E-08
CCSA8	4,94271E-13	0,001478154	6,13836E-05	1,63184E-07	0,000270667
CCSA9	19,95478764	19,9650032	19,96167763	19,96299752	0,002532788
CCSA10	4,83887E-07	0,002381447	0,000200146	3,34469E-05	0,000452175
GWO	3,95239E-14	5,37348E-14	4,37872E-14	4,30767E-14	4,5132E-15
PSO	7,02771E-12	2,660839511	1,058119347	1,155148503	0,720359308
WOA	4,44089E-16	7,54952E-15	3,87838E-15	3,9968E-15	2,55225E-15

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F10 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.12'de 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA3 4,44089E-16 ile en düşük sonucu elde etmiştir. WOA algoritmaları ile rekabet ederek yüksek bir başarı göstermiştir. Tüm çözümlerde aynı başarıyı sergilemiş ve standart sapması 0'dır. CCSA1'de kaotik yapılar içinde güçlü bir performans sergilemiştir.

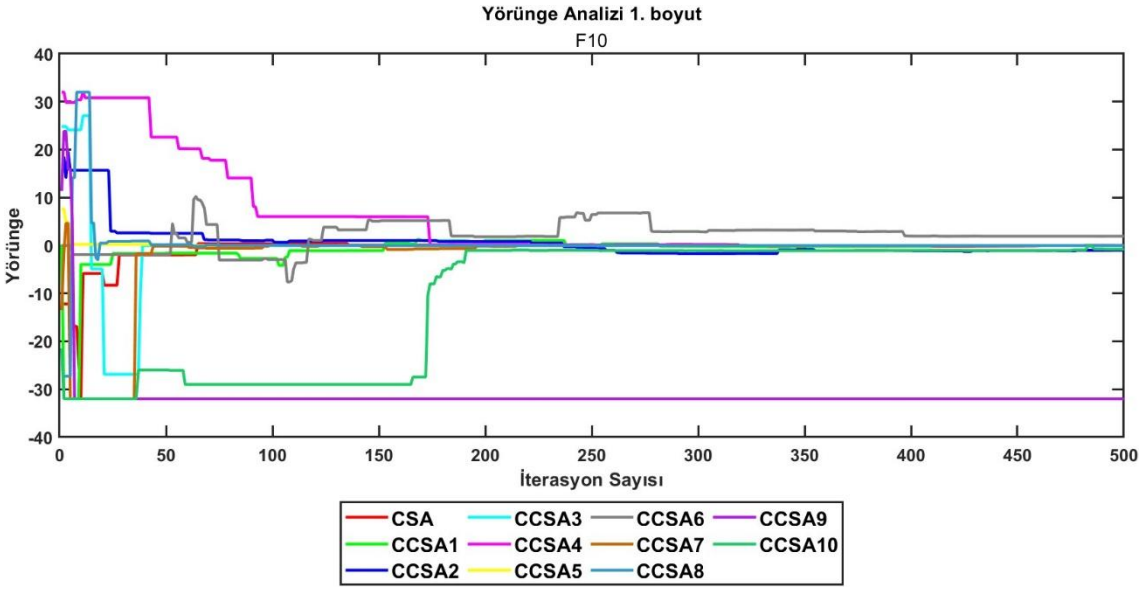


Şekil 4.60. F10 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F10 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.60'ta verilmiştir. CCSA3'ün kararlı yapısı kutu grafiğinde de gözlemlenmektedir. Algoritmaların F19 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.61'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir.

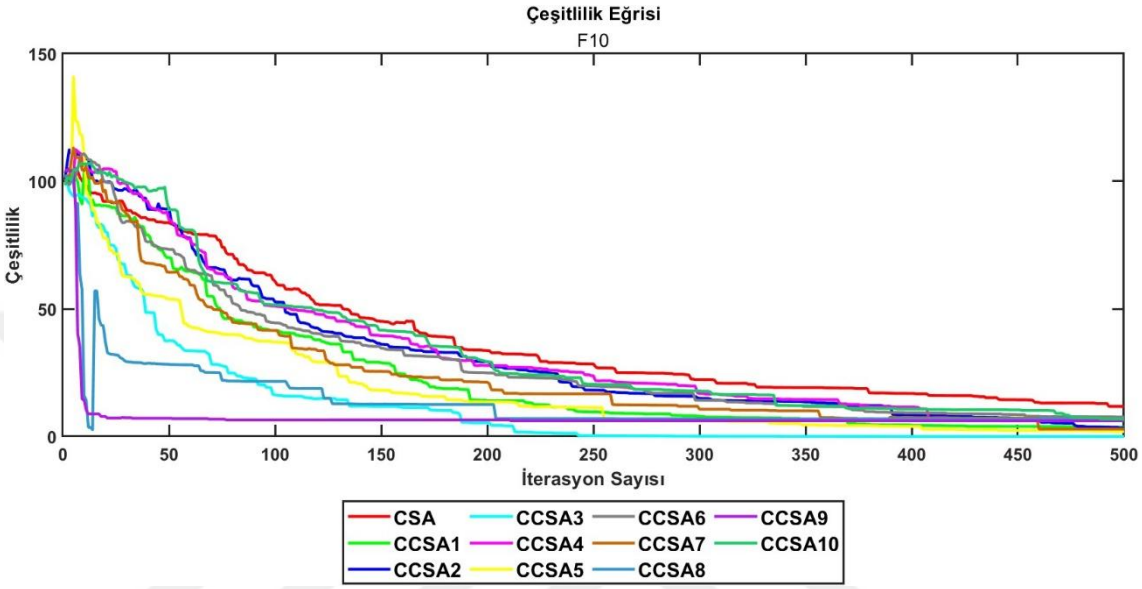


Şekil 4.61. F10 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri



Şekil 4.62. F10 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F10 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.62'de verilmiştir. CCSA3 yörüngeyi yaklaşık 30. İterasyonda yakınsamıştır bu durum yakınsama eğrisi davranışını desteklemektedir.

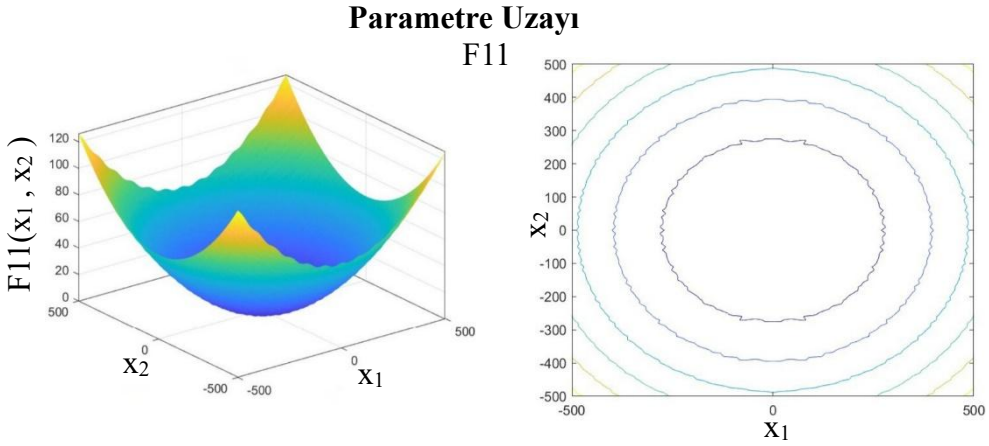


Şekil 4.63. F10 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

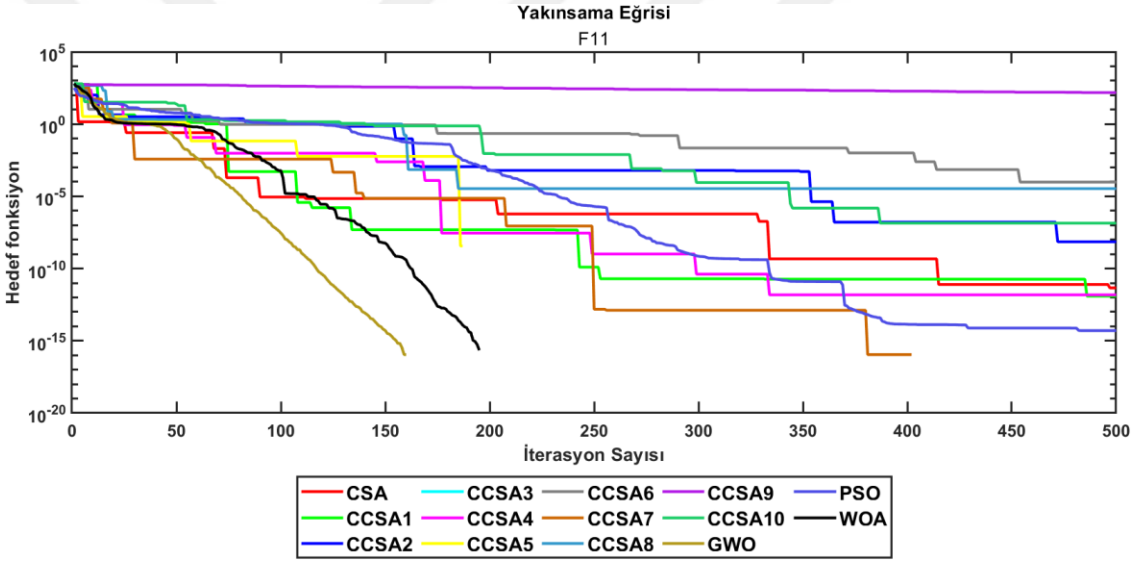
F10 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.63'te verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. Algoritmalar 250. İterasyondan sonra benzer bir çeşitlilik davranışı sergilemiştir.

4.2.11. F11 Test Fonksiyonu

F11 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.64'te F11 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.64. F11 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı

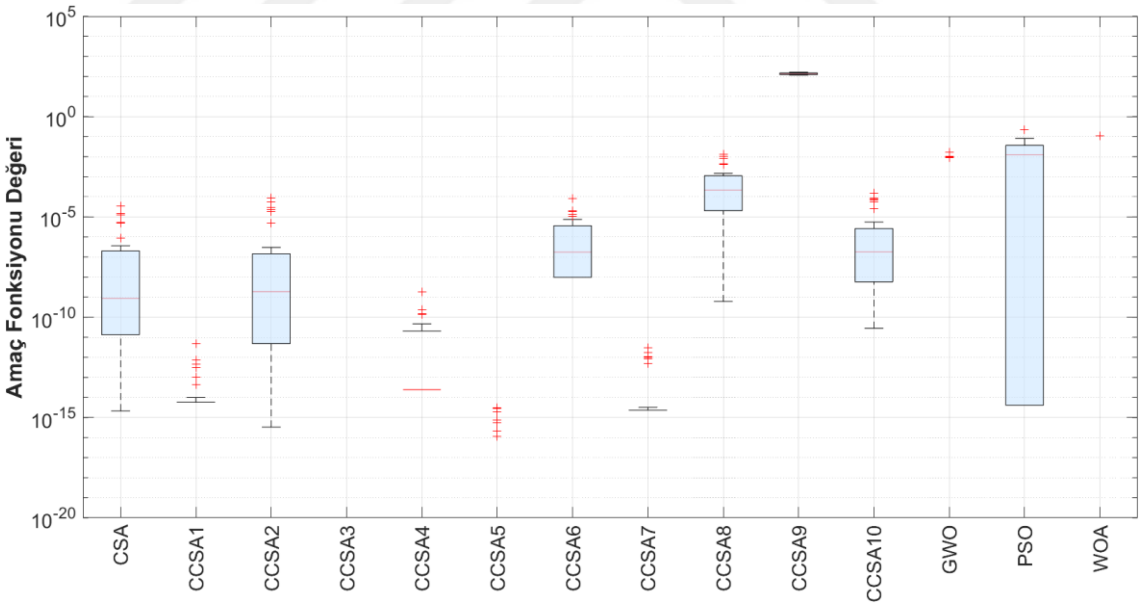


Şekil 4.65. F11 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F11 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.65'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Yakınsama eğrisini değerlendirilirken, Çizelge 4.11'de verilen 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri de incelenirse algoritmalar optimum değere ulaşmada yüksek bir performans sergilemişlerdir. Yüksek standart sapma değerleriyle çözümler kendi içinde değişkenlik göstermektedir. CCSA3 algoritması optimuma ulaşmış ve bunu her çözümde gerçekleştirmiştir. WOA ile benzer davranış sergilemiştir.

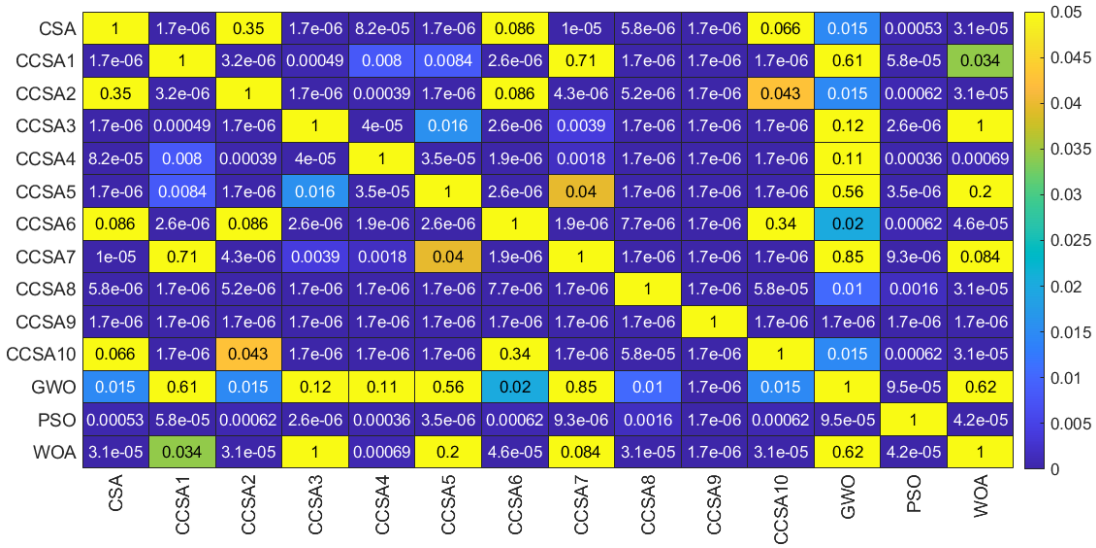
Çizelge 4.13. F11 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	2,10942E-15	3,34995E-05	2,44398E-06	8,74498E-10	6,91477E-06
CCSA1	0	4,88465E-12	2,19547E-13	0	8,96401E-13
CCSA2	3,33067E-16	8,87515E-05	7,40203E-06	1,88321E-09	1,96598E-05
CCSA3	0	0	0	0	0
CCSA4	0	1,78687E-09	8,17331E-11	2,44249E-14	3,26835E-10
CCSA5	0	2,9976E-15	3,14563E-16	0	8,06983E-16
CCSA6	0	7,9307E-05	5,54023E-06	1,75099E-07	1,50264E-05
CCSA7	0	2,88902E-12	2,686E-13	0	6,52558E-13
CCSA8	6,07361E-10	0,013146303	0,001635765	0,000216094	0,003324856
CCSA9	117,3182673	161,3455527	135,900961	134,8317931	13,12872244
CCSA10	2,81678E-11	0,000153859	1,61709E-05	1,82485E-07	3,64448E-05
GWO	0	0,017092117	0,001550152	0	0,004191577
PSO	0	0,222163954	0,028106354	0,012322224	0,043742746
WOA	0	0,112150308	0,003738344	0	0,020475751



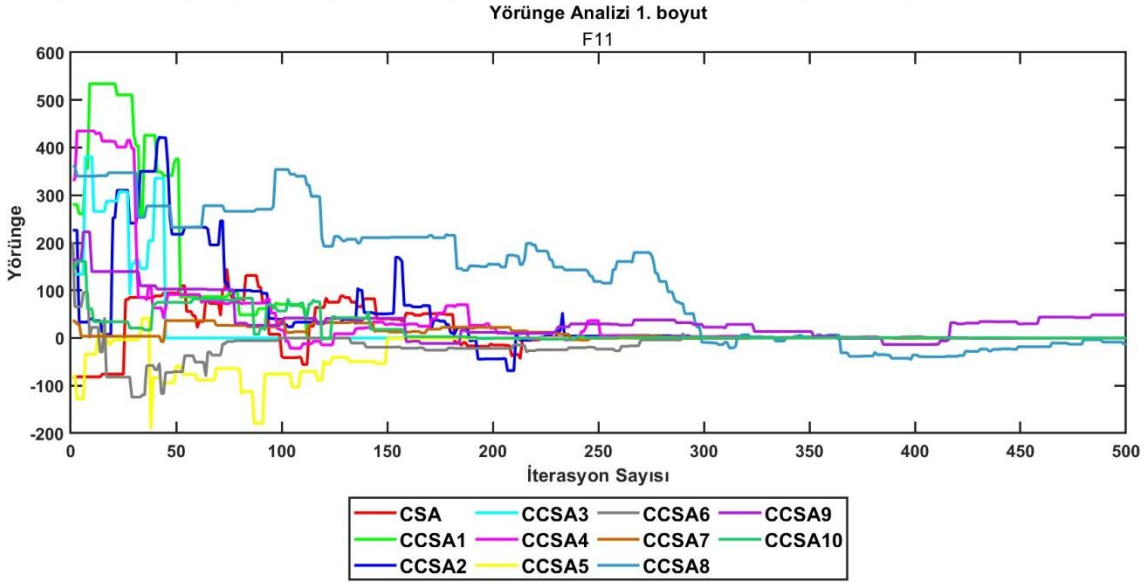
Şekil 4.66. F11 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F11 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.66'da verilmiştir. Kutu grafiği incelendiğinde CCSA3, GWO ve WOA ile benzer kararlılıkta performans sergileyerek optimuma ulaşmıştır.



Şekil 4.67. F11 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

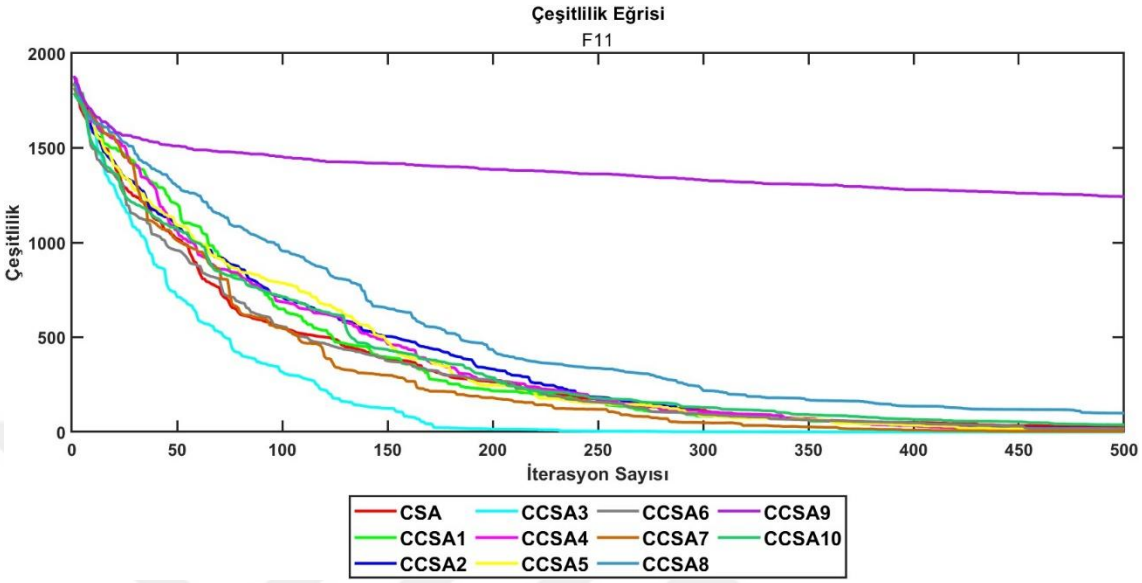
Algoritmaların F11 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.67'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ancak literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir.



Şekil 4.68. F11 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F11 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.68'de verilmiştir. CCSA3 yörüngeyi

erken iterasyonlarda yakalamıştır. Bu da optimuma ulaşma ve yakınsama eğrisindeki davranışı desteklemektedir.

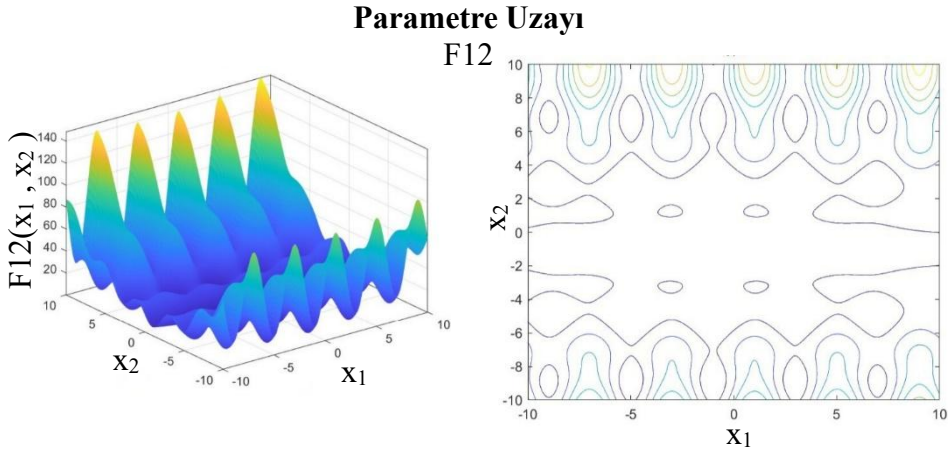


Şekil 4.69. F11 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

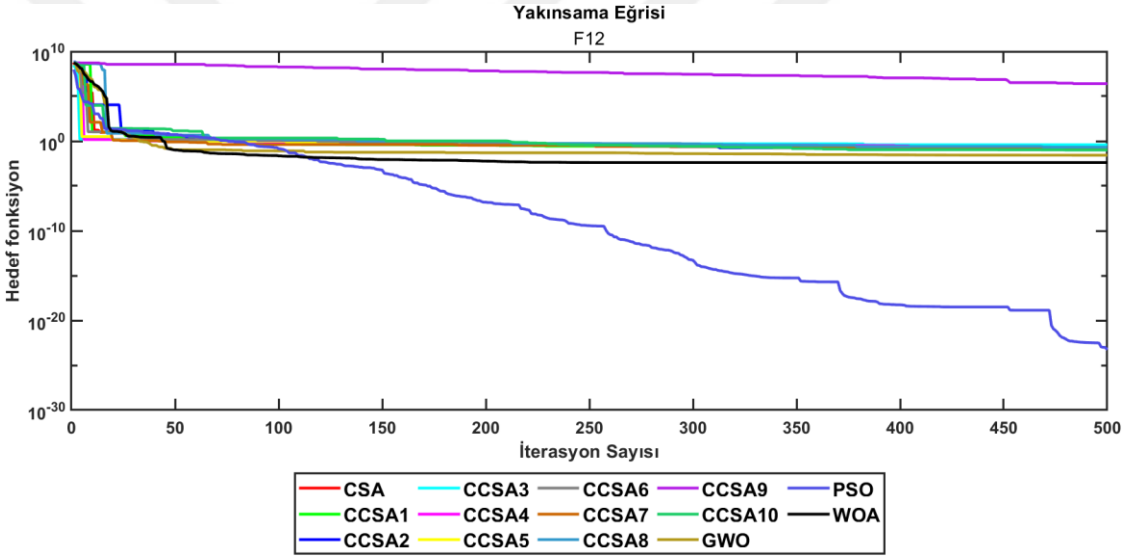
F11 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.69'da verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.12. F12 Test Fonksiyonu

F12 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.70'te F12 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.70. F12 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



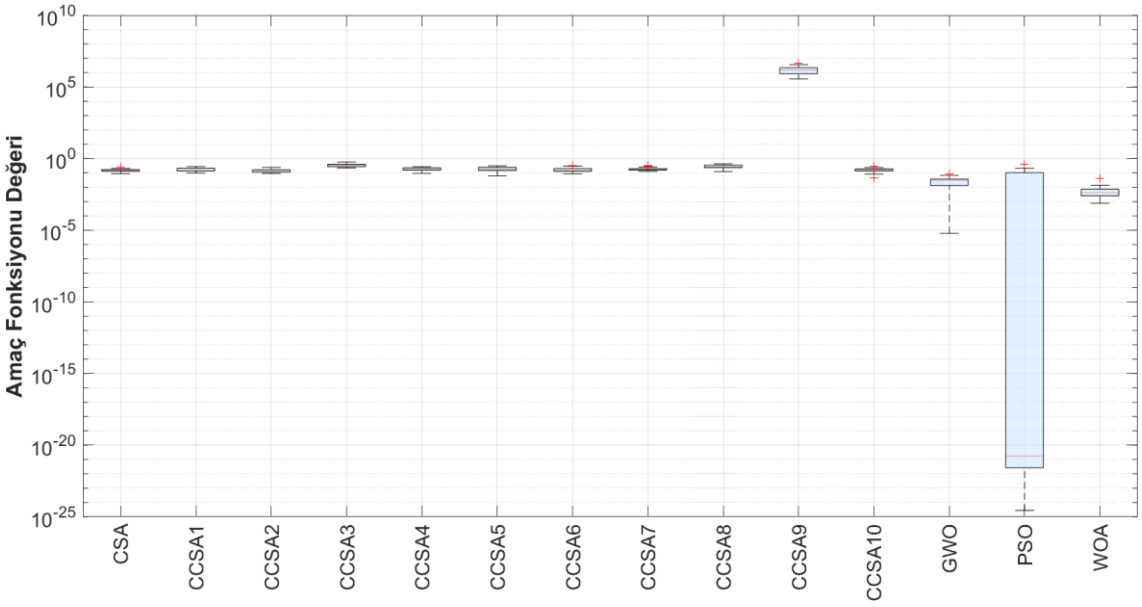
Şekil 4.71. F12 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F12 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.71'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. PSO optimuma yakınsamada en iyi performansı sergilemiştir. CCSA9 haricindeki tüm kaotikler optimuma ulaşmada benzer bir yakınsama gerçekleştirmişlerdir.

Çizelge 4.14. F12 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

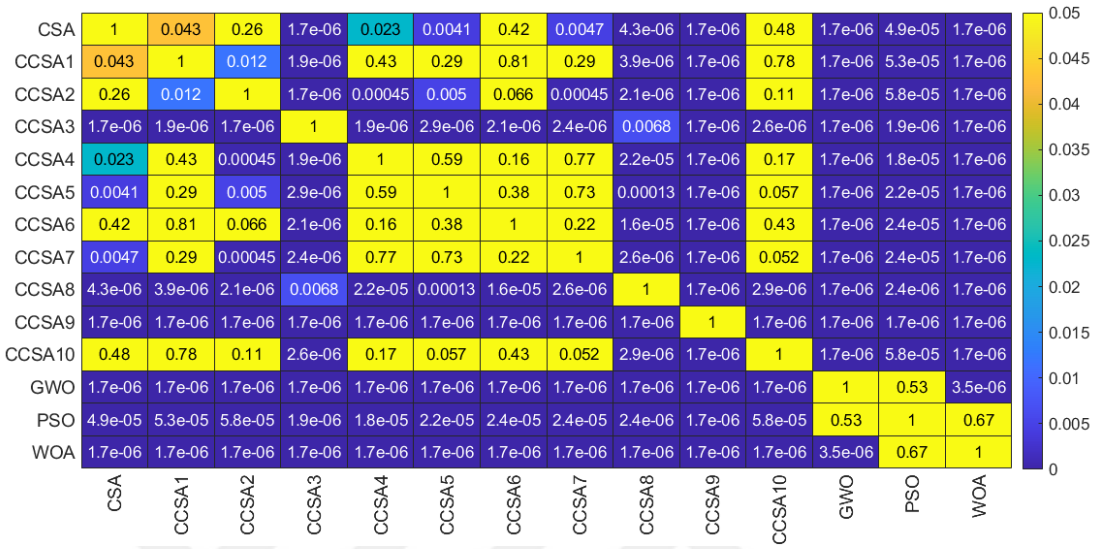
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0,089141418	0,254112302	0,153501151	0,154687475	0,035062102
CCSA1	0,096774968	0,2779479	0,172005178	0,165221699	0,045436655
CCSA2	0,091862138	0,240936126	0,142110027	0,143514848	0,035776542
CCSA3	0,221462461	0,582946293	0,355071425	0,328475708	0,105749388
CCSA4	0,092683449	0,272973676	0,178853646	0,174329026	0,044505282
CCSA5	0,063040927	0,309498153	0,190769804	0,180273164	0,063681366
CCSA6	0,08625769	0,32469036	0,170461943	0,15594353	0,056821668
CCSA7	0,129207097	0,314521635	0,186353624	0,179518846	0,045553936
CCSA8	0,125038263	0,428001297	0,289209256	0,273584932	0,078776944
CCSA9	357422,9157	4512034,679	1629392,585	1489480,221	992150,7062
CCSA10	0,043872728	0,283767573	0,160518108	0,159139606	0,047154083
GWO	5,97317E-06	0,08515781	0,030887567	0,031091764	0,020247433
PSO	2,77463E-25	0,414611228	0,041464736	1,73097E-21	0,088626796
WOA	0,000756831	0,039317084	0,006262799	0,004250438	0,007070779

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F12 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.14'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Kaotik algoritmalar içinde CCSA5 0,063040927 ile en düşük sonucu elde etmiştir.



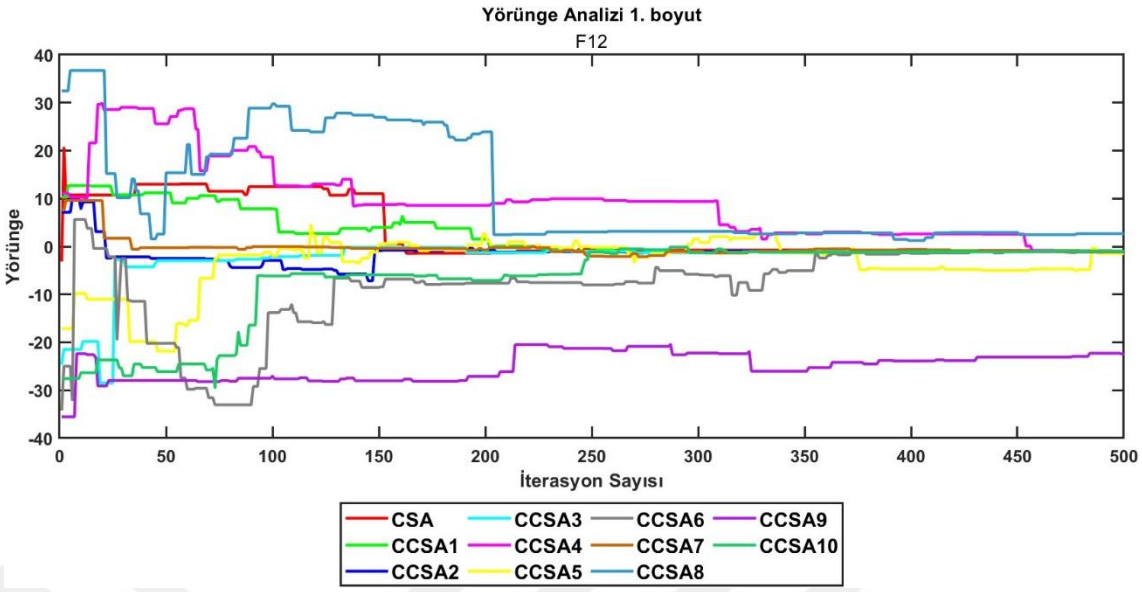
Şekil 4.72. F12 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F12 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.72'de verilmiştir. Kaotik yapılar birbirine yakın performans göstermişlerdir. CCSA9 yakınsama da uzak kalmıştır. PSO geniş aralıkta çalışarak kararsız bir davranış sergilemiştir.



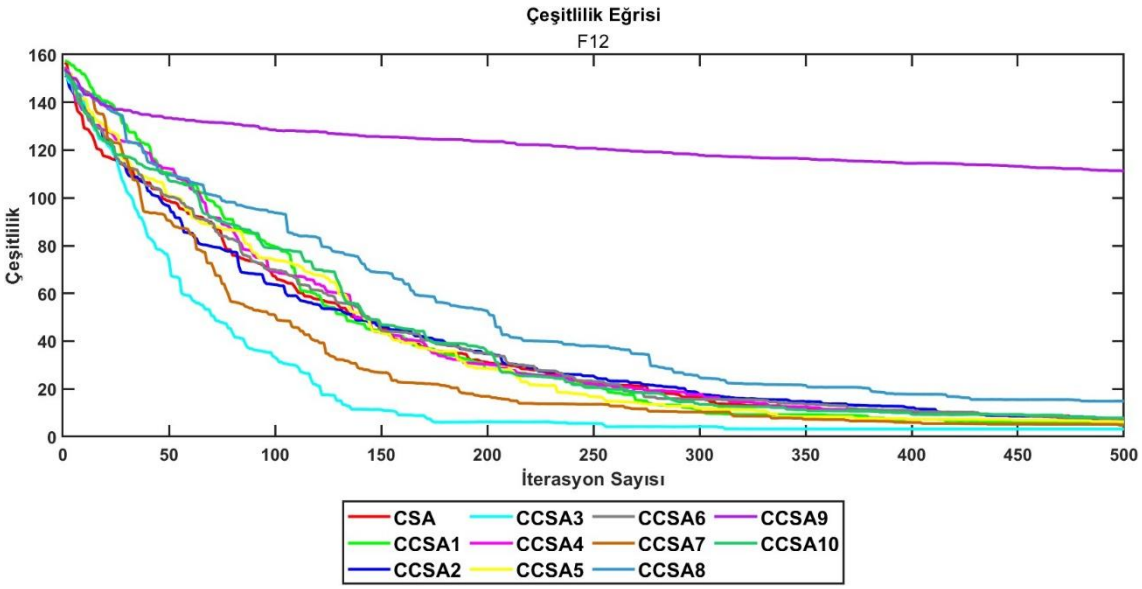
Şekil 4.73. F12 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F12 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.73'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir. CCSA4, CCSA5, CCSA6 ve CCSA7 birbirlerine karşı anlamlı fark üretememiştir.



Şekil 4.74. F12 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F12 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.74'te verilmiştir. CCSA3 yörüngeyi erken iterasyonlarda yakalamıştır. Kaotik algoritmalara karşı bir üstünlük sergilemiştir. Bu da optimuma ulaşma ve yakınsama eğrisindeki davranışı desteklemektedir.

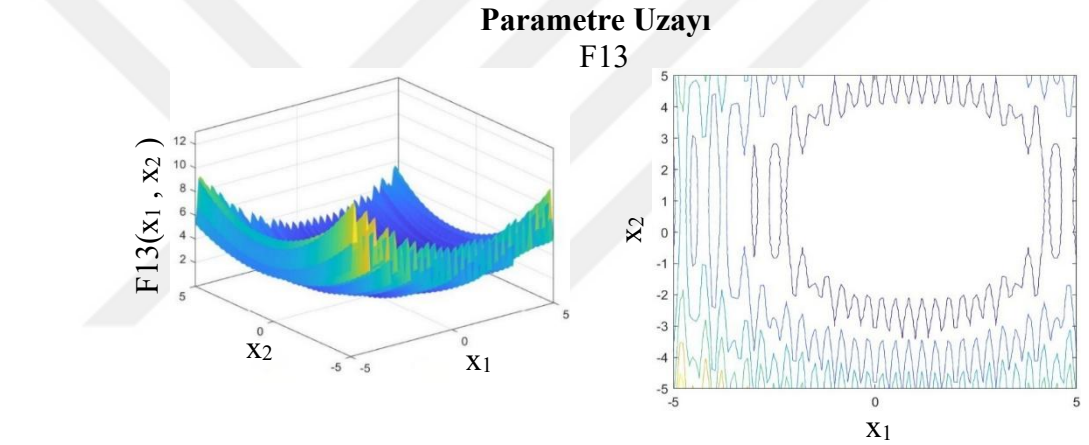


Şekil 4.75. F13 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

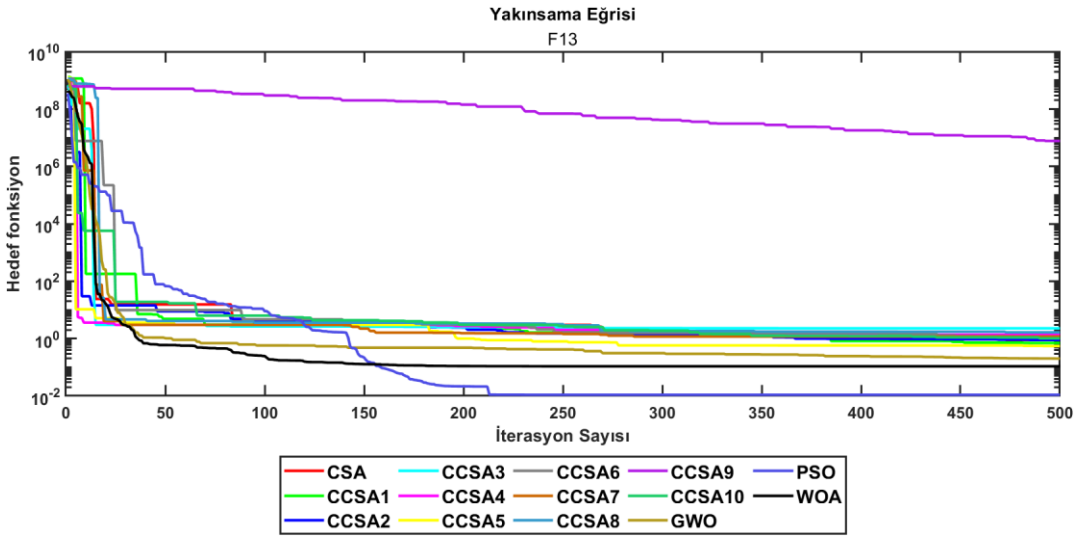
F13 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.75'te verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.13. F13 Test Fonksiyonu

F13 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.76'da F13 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.76. F13 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



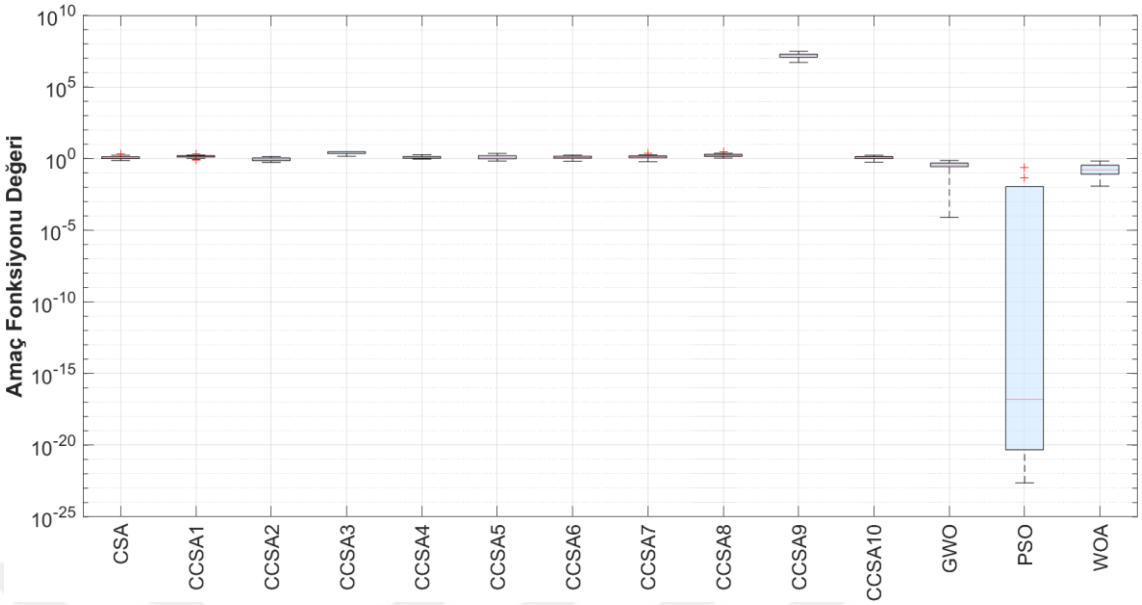
Şekil 4.77. F13 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F13 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.77'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir PSO optimuma yakınsamada en iyi performansı sergilemiştir. CCSA9 haricindeki tüm kaotikler optimuma ulaşmada benzer bir yakınsama gerçekleştirmişlerdir.

Çizelge 4.15. F13 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

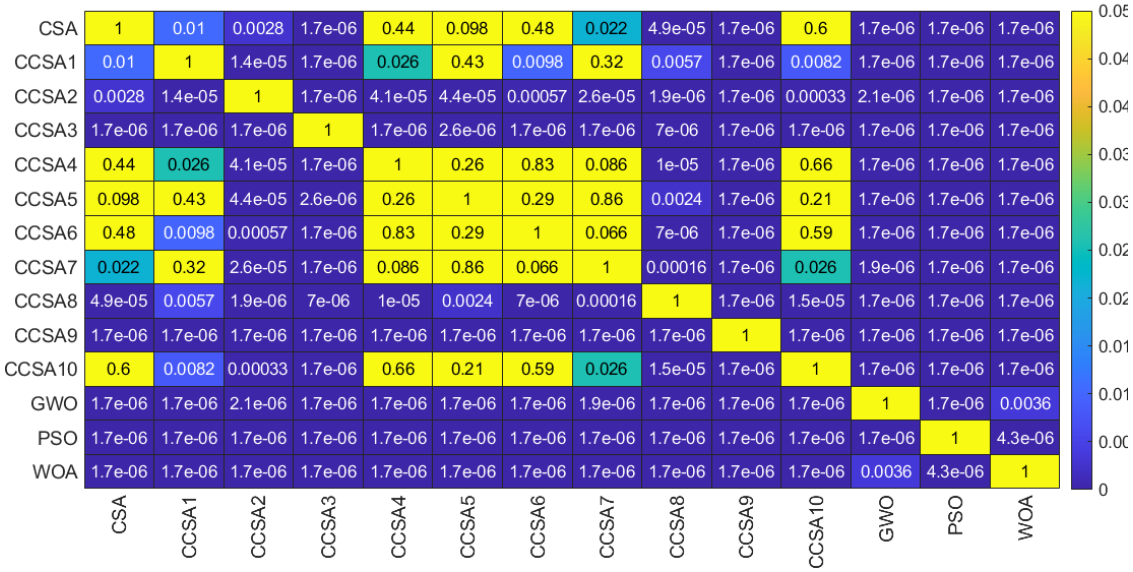
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0,726354875	2,097532629	1,183424209	1,112737883	0,313668174
CCSA1	0,751268093	2,195049489	1,420058348	1,416468789	0,282180067
CCSA2	0,545902545	1,374560088	0,902879429	0,852988878	0,242392332
CCSA3	1,438681631	2,999674836	2,661970109	2,991739446	0,466806693
CCSA4	0,919294664	1,850915335	1,235724519	1,11725325	0,257498764
CCSA5	0,665860458	2,282453871	1,350531961	1,245616884	0,445379119
CCSA6	0,646553565	1,758611647	1,232031995	1,185589826	0,281853923
CCSA7	0,602944314	2,256987421	1,360177409	1,406401701	0,315471764
CCSA8	1,071637187	2,995132468	1,714096784	1,596991164	0,437306359
CCSA9	5086705,481	30281409,65	15975230,87	15430343,8	6292288,801
CCSA10	0,563957451	1,735841813	1,192676455	1,231621259	0,280765328
GWO	7,81608E-05	0,733526196	0,35970003	0,353165094	0,1751252
PSO	2,32805E-23	0,233414464	0,014006616	1,57757E-17	0,042970021
WOA	0,011939355	0,667655833	0,206056199	0,162988329	0,160164724

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F13 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.15'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA2 0,545902545 ile en düşük sonucu elde etmiştir. Ancak tüm hibrit algoritmalar optimum noktaya ulaşmada PSO ve GWO gerisinde kalmıştır.



Şekil 4.78. F13 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

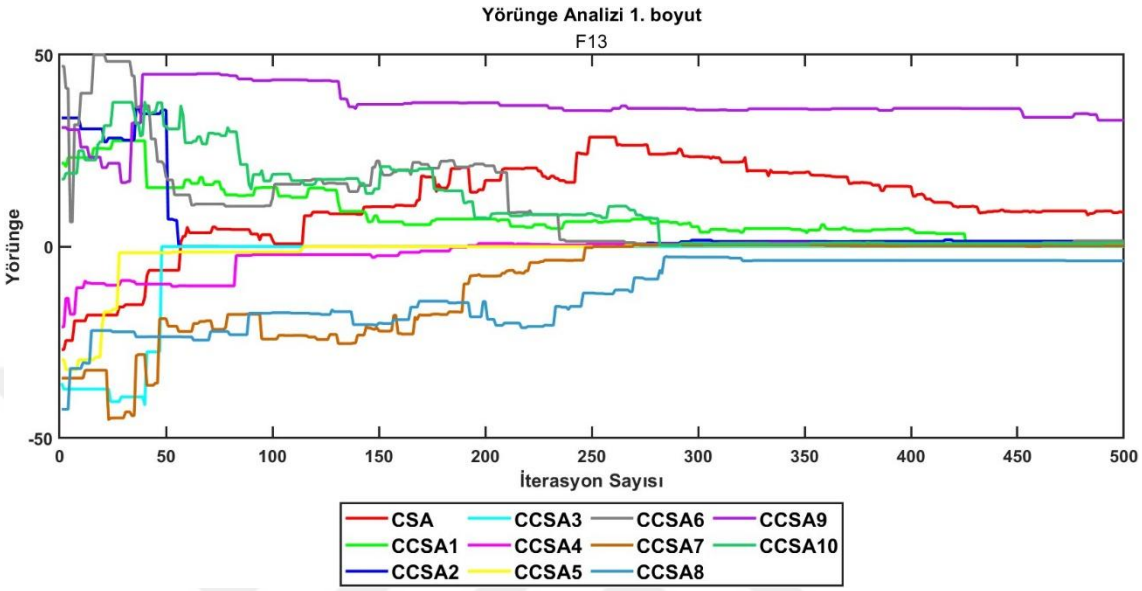
Algoritmaların F13 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.78'de verilmiştir. Kaotik yapılar birbirine yakın performans göstermişlerdir. CCSA9 yakınsama da uzak kalmıştır. PSO geniş aralıkta çalışarak kararsız bir davranış sergilemiştir.



Şekil 4.79. F13 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

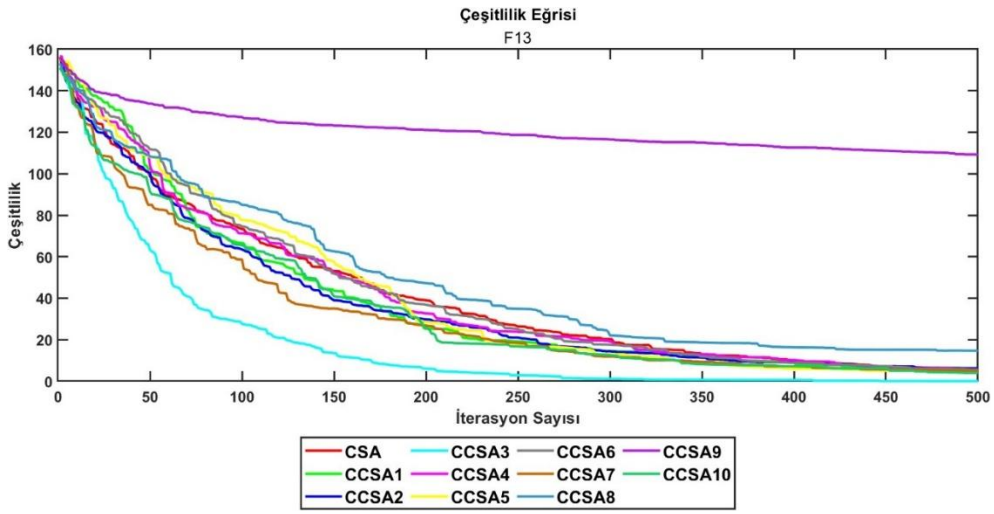
Algoritmaların F13 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.79'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var

olmaktadır. CCSA2 ve CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir. CCSA4, CCSA5, CCSA6 ve CCSA7 birbirlerine karşı anlamlı fark üretememiştir.



Şekil 4.80. F13 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F13 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.80'de verilmiştir. CCSA3 yörüngeyi erken iterasyonlarda yakalamıştır. Kaotik algoritmalara karşı bir üstünlük sergilemiştir. Bu da optimuma ulaşma ve yakınsama eğrisindeki davranışı desteklemektedir.

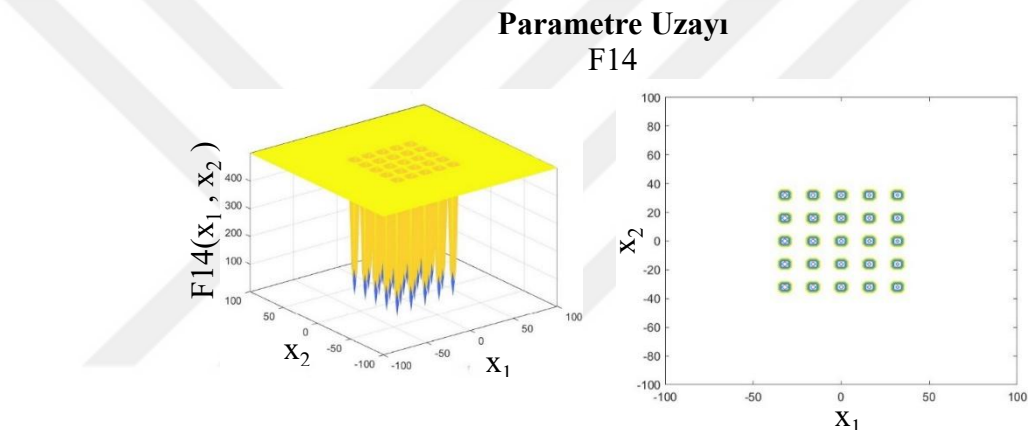


Şekil 4.81. F13 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

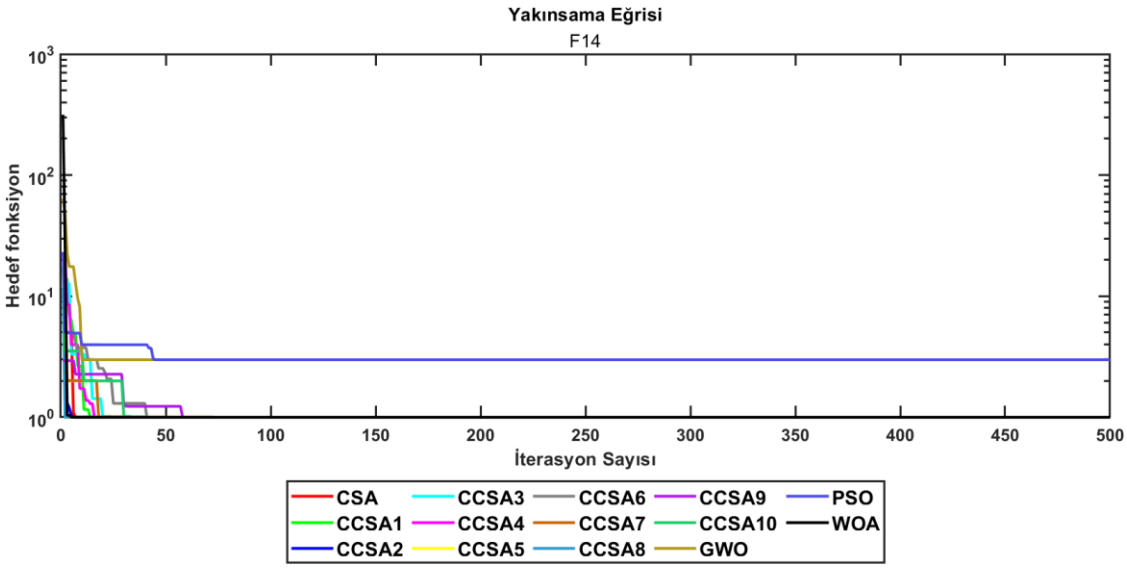
F13 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.81'de verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.14. F14 Test Fonksiyonu

F14 test fonksiyonu sabit boyutlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.82'te F14 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.82. F14 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı

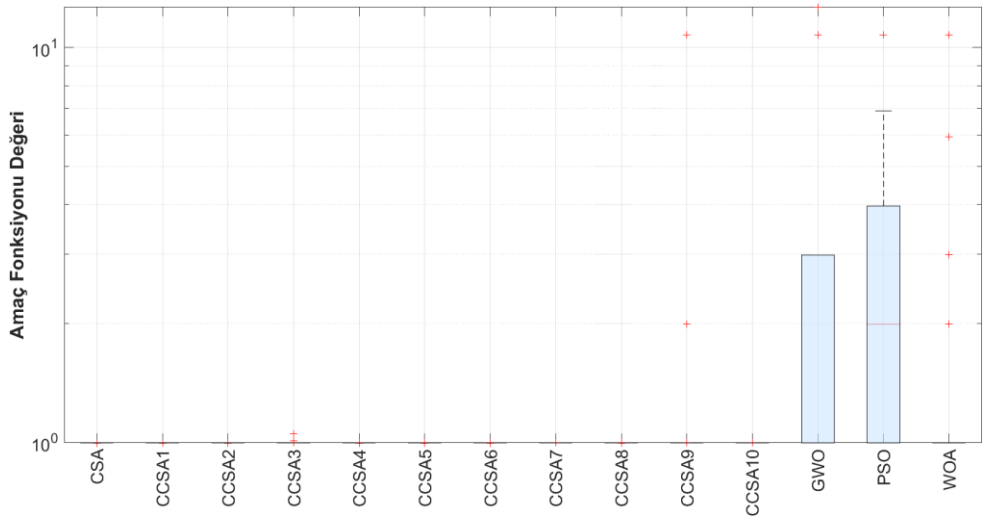


Şekil 4.83. F14 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F14 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.83'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Tüm algoritmalar optimum noktayı erken iterasyonlarda yakınsamışlardır. Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F14 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.16'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri karşılaştırıldığında, tüm algoritmaların en iyi sonucu 0,998003838 değerindedir.

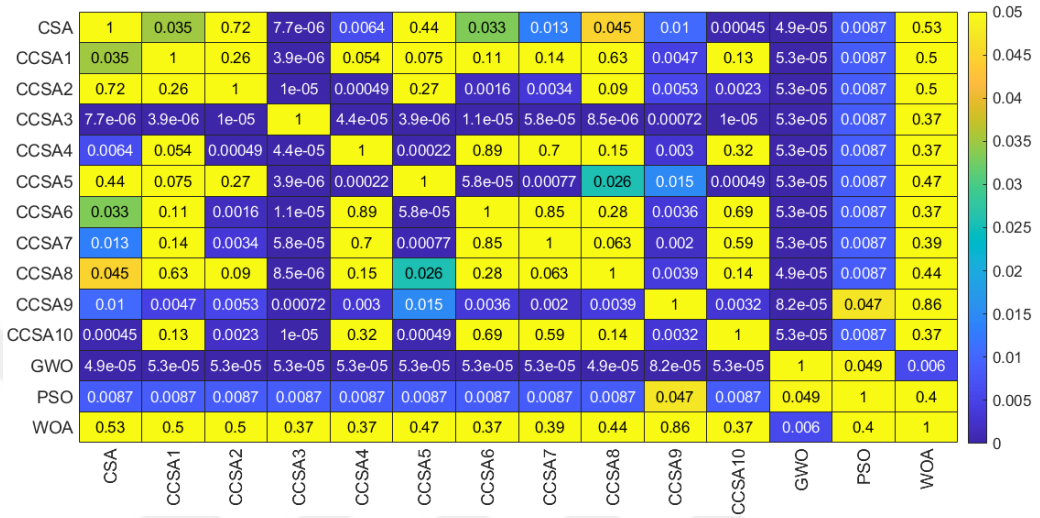
Çizelge 4.16. F14 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0,998003838	0,998004084	0,998003852	0,998003839	4,67647E-08
CCSA1	0,998003838	0,998004125	0,99800387	0,99800384	7,26558E-08
CCSA2	0,998003838	0,998004009	0,998003852	0,998003839	3,49428E-08
CCSA3	0,998003838	1,054061765	1,000346159	0,998018558	0,010334315
CCSA4	0,998003838	0,998005739	0,998004016	0,998003855	4,50617E-07
CCSA5	0,998003838	0,998004252	0,998003858	0,998003839	7,69566E-08
CCSA6	0,998003838	0,998012826	0,99800432	0,998003847	1,68866E-06
CCSA7	0,998003838	0,998058922	0,998007803	0,998003844	1,14534E-05
CCSA8	0,998003838	0,99800828	0,998004029	0,998003842	8,12724E-07
CCSA9	0,998003838	10,76319064	1,356644366	0,998003838	1,785847352
CCSA10	0,998003838	0,998004684	0,998003919	0,998003855	1,79051E-07
GWO	0,998003838	12,67050581	4,395750767	2,982105157	3,991358519
PSO	0,998003838	10,76318067	2,932873113	1,9920309	2,881372453
WOA	0,998003838	10,76318067	2,011918895	0,998003838	2,586698976



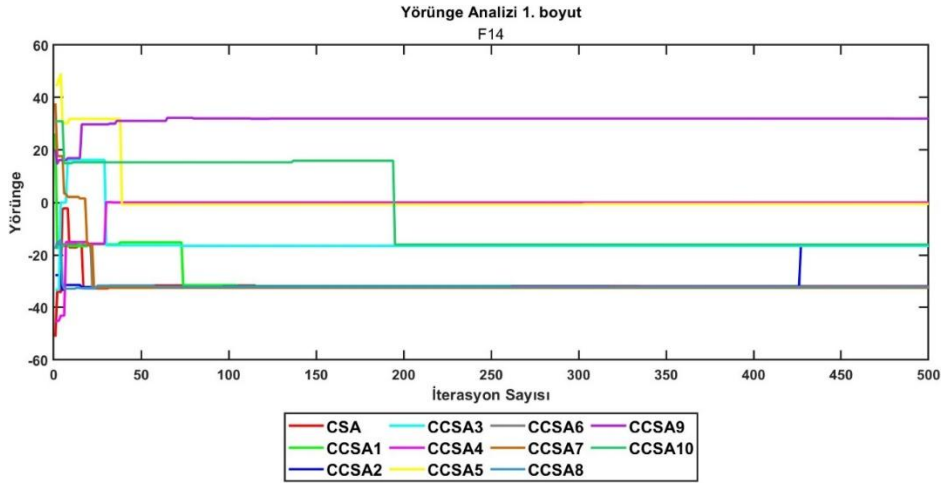
Şekil 4.84. F14 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F14 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.84'te verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler vermiş ve düşük bir yakınsama performansı sergilemiştir. Kaotik algoritmalar GWO ve PSO'ya göre çözümlerde daha kararlı bir davranış sergilemiştir.



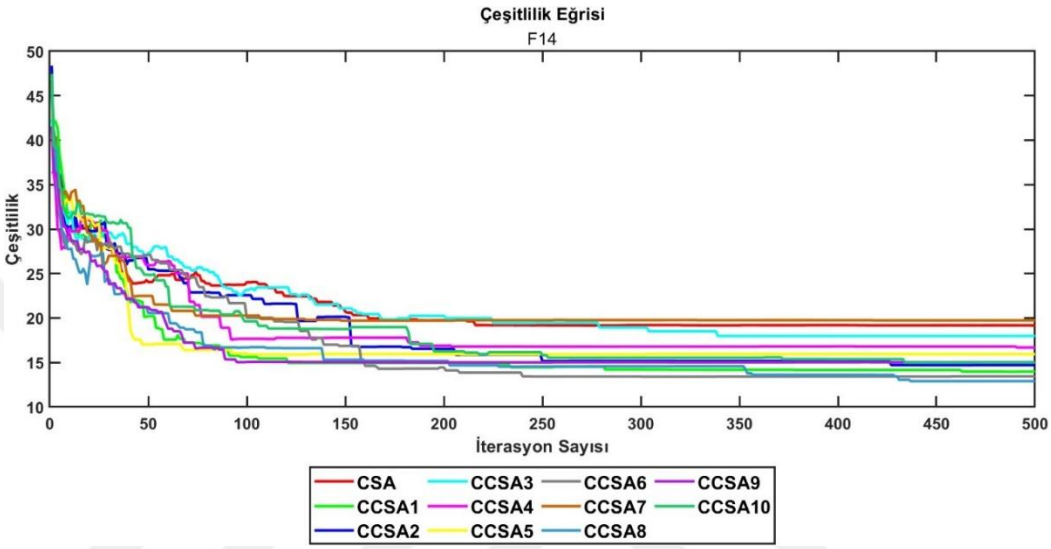
Şekil 4.85. F14 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F14 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.85'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3, WOA hariç tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur. CCSA6, CCSA7 ve CCSA8 birbiriyle anlamlı bir fark oluşturamamış ve benzer bir özellik göstermiştir.



Şekil 4.86. F14 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F14 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.86'da verilmiştir. Algoritmalar birbirlerinden farklı noktalarda yörüngeyi yakınsamışlardır. CCSA6, CCSA7 ve CCSA8 erken iterasyonlarda benzer yörüngelerde yakınsama gerçekleştirmişlerdir. Buda aralarındaki benzerliği desteklemektedir.

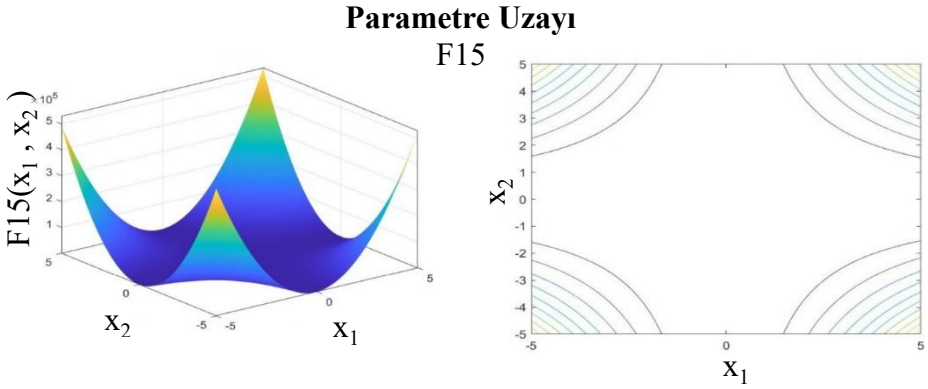


Şekil 4.87. F14 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

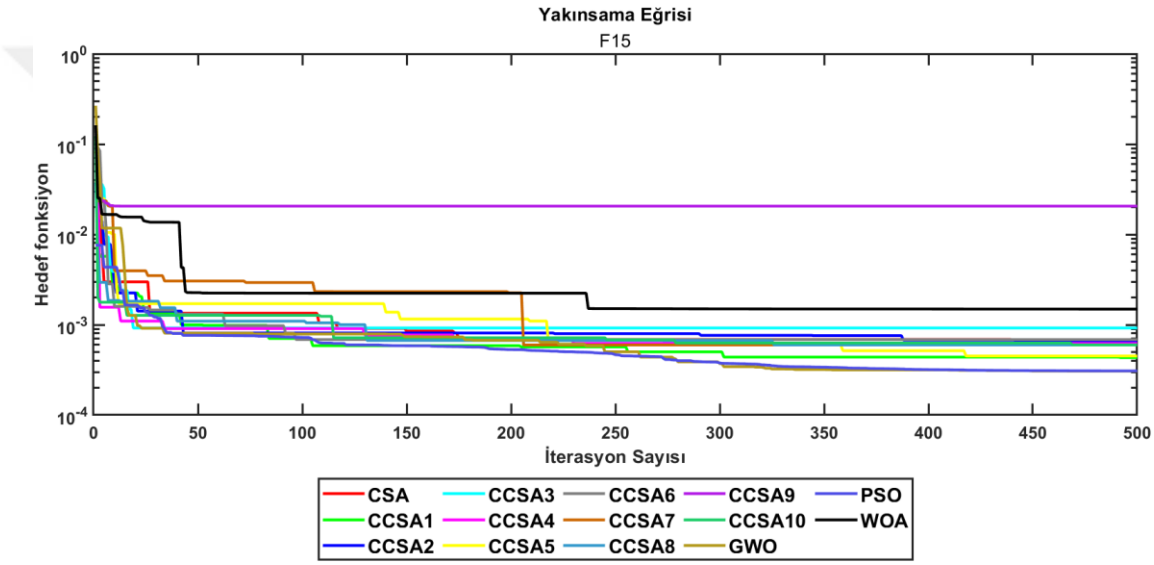
F14 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.87'de verilmiştir. Algoritmalar çeşitlilik konusunda birbiriyle benzer davranış sergilemiştir. Bu da performans dağılımındaki benzerliği desteklemektedir.

4.2.15. F15 Test Fonksiyonu

F15 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.88'de F15 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.88. F15 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



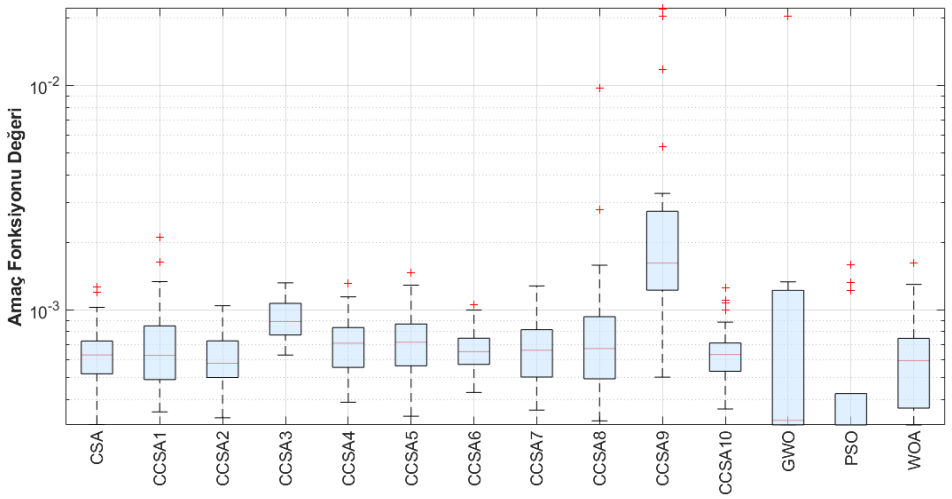
Şekil 4.89. F15 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F15 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.89'da algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar CCSA9 hariç literatürdeki diğer algoritmalarla benzer yakınsama davranışı sergilemiştir. Erken iterasyonlarda yakınsam gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.17. F15 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

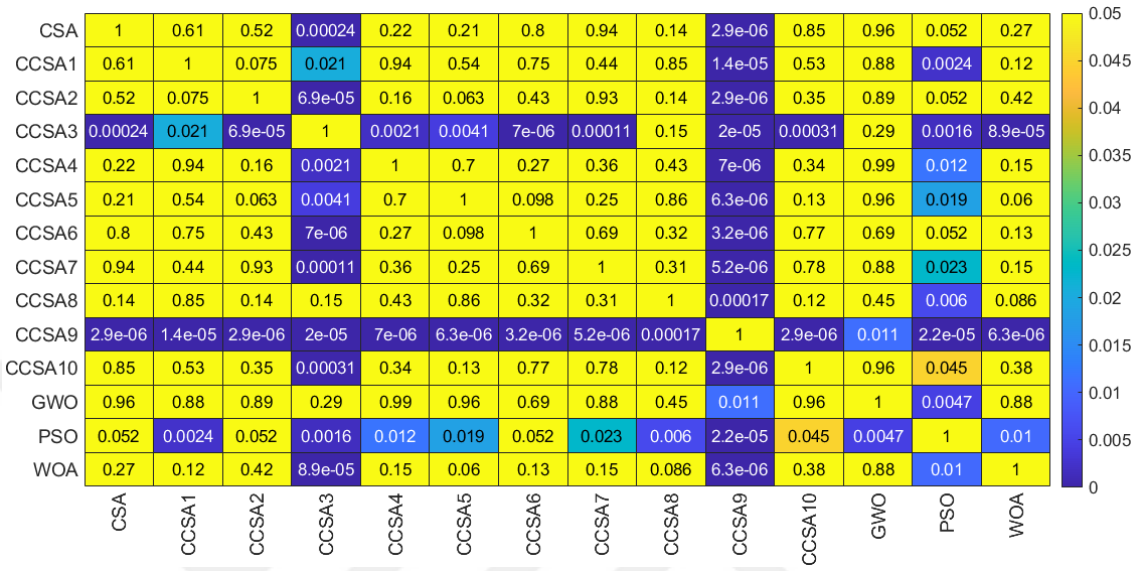
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0,000309023	0,00126175	0,000663326	0,000630207	0,000218242
CCSA1	0,000351601	0,002109397	0,000759342	0,000627888	0,00040121
CCSA2	0,000330915	0,001044855	0,000627685	0,000579078	0,000186681
CCSA3	0,000629569	0,001320499	0,000917223	0,000888081	0,00018955
CCSA4	0,000388122	0,001319065	0,000722165	0,000711257	0,000227031
CCSA5	0,000336303	0,001458839	0,000759998	0,00071885	0,000271956
CCSA6	0,000429265	0,001059791	0,000664242	0,000652189	0,000140839
CCSA7	0,000358246	0,001279653	0,000678774	0,000662065	0,000221945
CCSA8	0,000320551	0,009697935	0,001101179	0,00067319	0,001698246
CCSA9	0,000502347	0,022175877	0,004075583	0,001617258	0,006249634
CCSA10	0,000362276	0,001252399	0,000664748	0,000633236	0,00021164
GWO	0,000307498	0,020363343	0,003815643	0,000322529	0,007534756
PSO	0,000307486	0,00159405	0,00051246	0,000307487	0,000440526
WOA	0,000307599	0,001615537	0,00062424	0,000593955	0,00031019

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F15 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.17'de 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir.



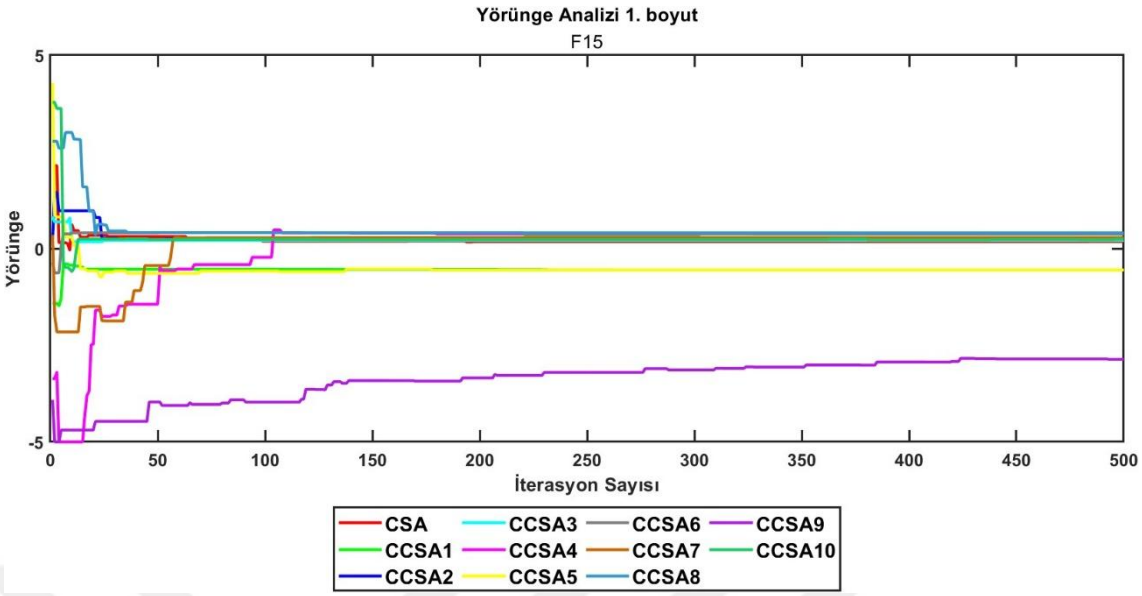
Şekil 4.90. F15 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F15 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.90'da verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmaların kutu grafiği dağılımları birbiriyle benzerlik göstermektedir. CCSA9 algoritmalar içinde en aykırı değerlere sahip olan algoritmadır.



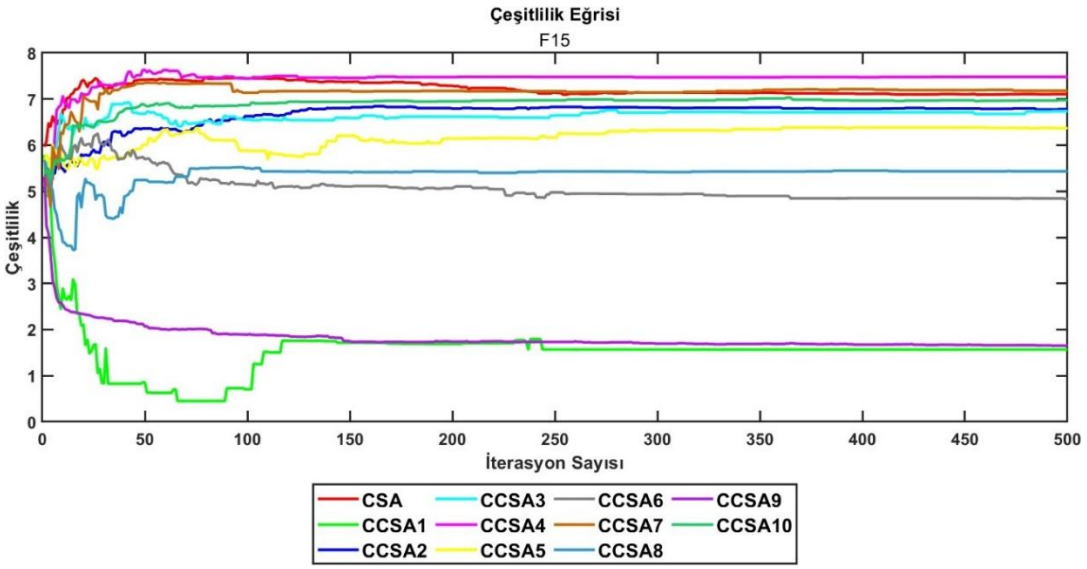
Şekil 4.91. F15 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F15 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.91'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur. CCSA9 da anlamlı bir fark koymuştur ancak optimuma yakınsama ve kutu grafiğindeki aykırı değerleri ile problemde yakınsama gerçekleştirememiştir.



Şekil 4.92. F15 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F15 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.92'de verilmiştir. Algoritmalar yörüngeyi erken iterasyonlarda yakalamıştır. CCSA9 yörünge analizinde farklı bir noktada yakınsayarak aykırı davranış göstermiştir.

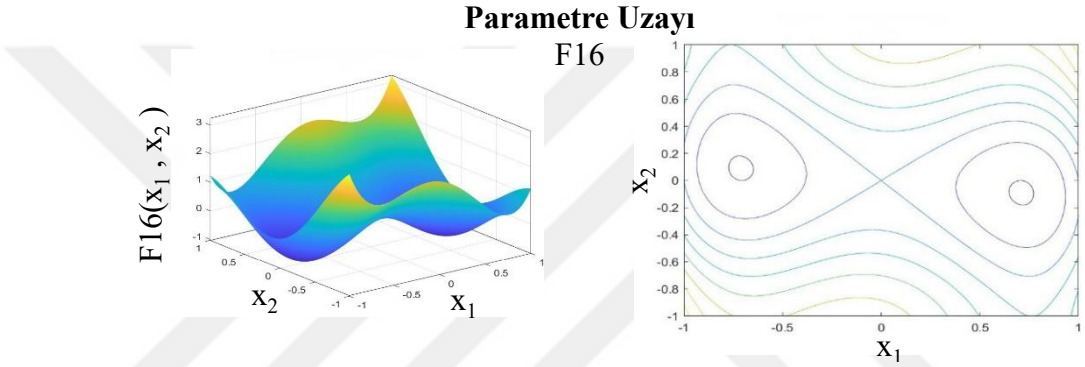


Şekil 4.93. F15 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

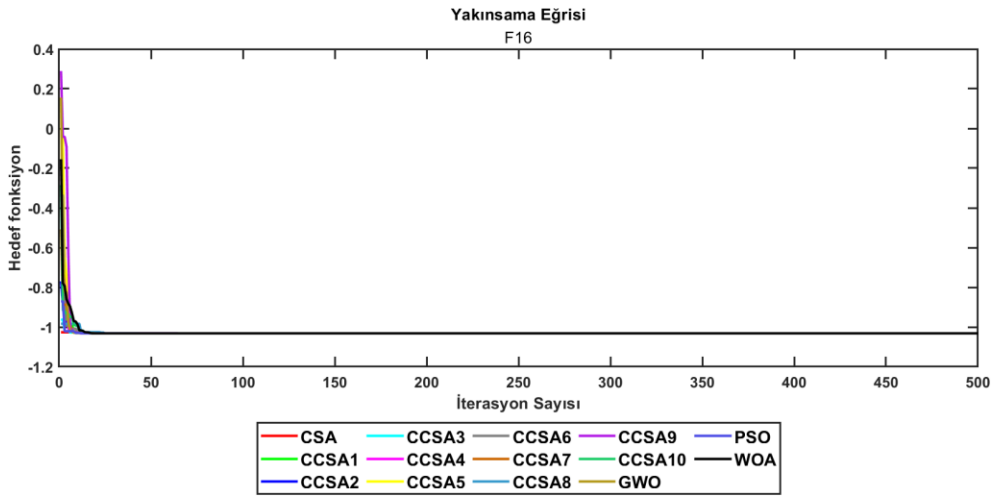
F15 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.93'te verilmiştir. CCSA1 ve CCSA9 çeşitlilikte diğer algoritmalara göre aykırı hareket etmiştir.

4.2.16. F16 Test Fonksiyonu

F16 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.94'te F16 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.94. F16 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



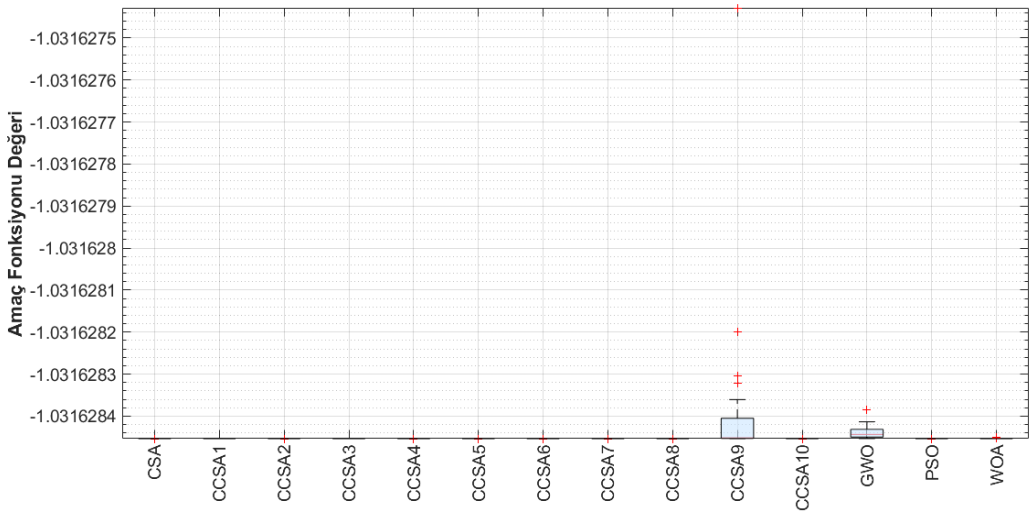
Şekil 4.95. F16 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F16 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.95'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Tüm algoritmalar erken iterasyonlarda yakınsama davranışı göstermişlerdir.

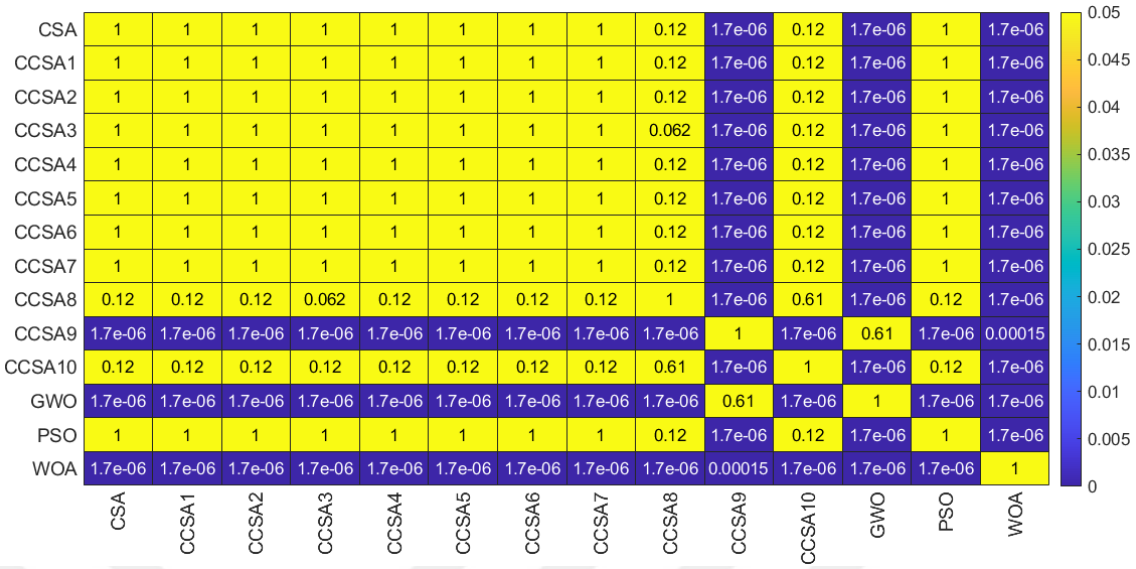
Çizelge 4.18. F16 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	4,60995E-16
CCSA1	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	4,51681E-16
CCSA2	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	4,55429E-16
CCSA3	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	6,04589E-16
CCSA4	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	4,45999E-16
CCSA5	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	4,60995E-16
CCSA6	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	4,34413E-16
CCSA7	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	4,70125E-16
CCSA8	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	2,79986E-14
CCSA9	-1,031628453	-1,031627428	-1,031628385	-1,031628452	1,90415E-07
CCSA10	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	1,63897E-15
GWO	-1,031628453	-1,031628385	-1,031628439	-1,031628444	1,49939E-08
PSO	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	-1,031628453	6,51945E-16
WOA	-1,031628453	-1,03162845	-1,031628453	-1,031628453	7,23932E-10

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F16 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.18'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Algoritmalar birbirleri ile yakın performans sergileyerek optimum değere ulaşmışlardır.

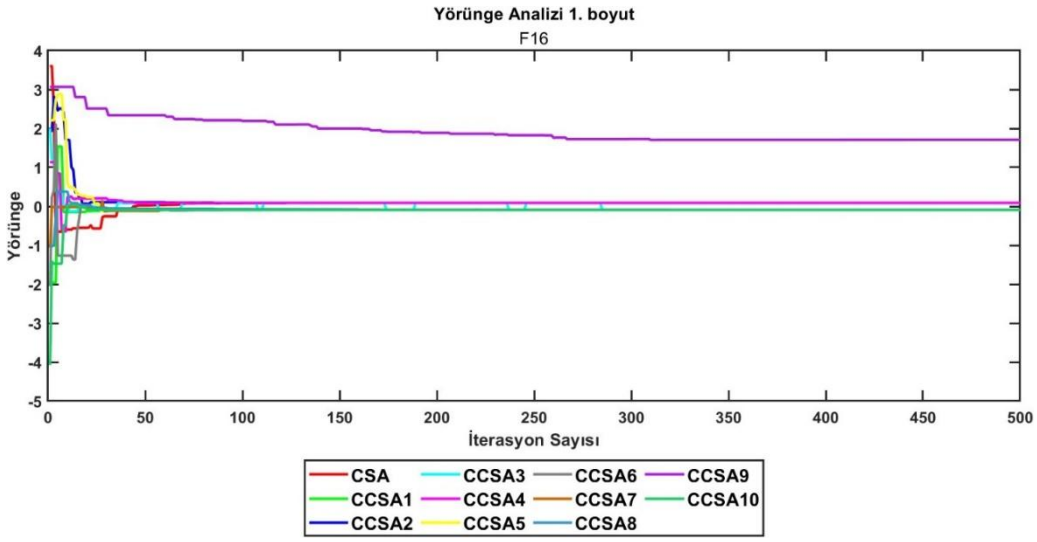


Şekil 4.96. F16 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı



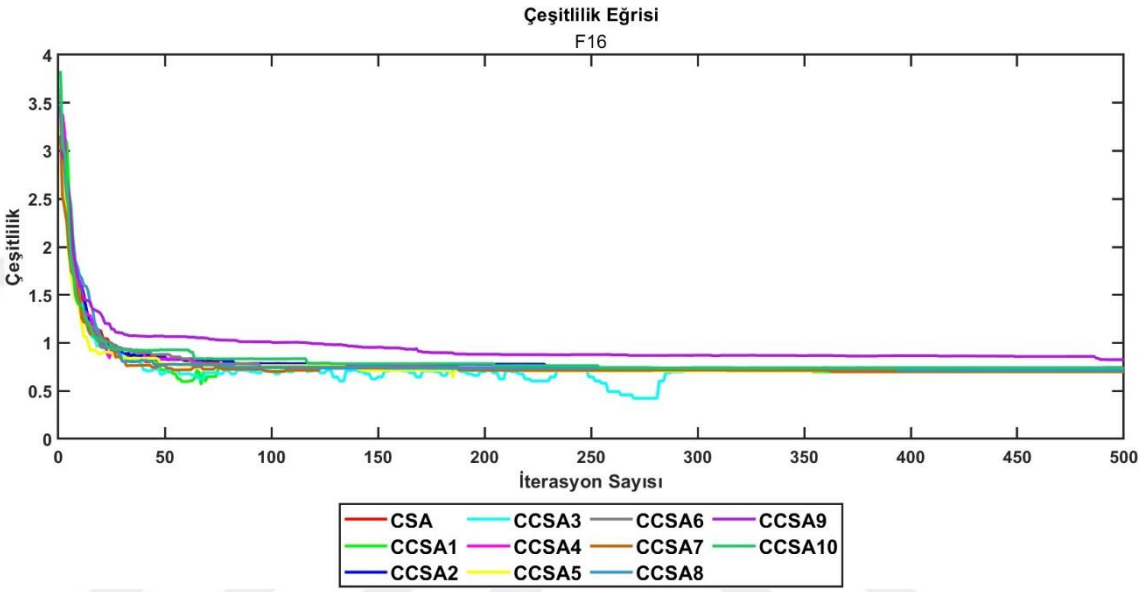
Şekil 4.97. F16 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F16 test fonksiyonundaki, performans grafiği Şekil 4.96 ve Wilcoxon p değerleri Şekil 4.97'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. Kaotik hibrit algoritmalar birbiri ile benzer performans sergilemektedir. Bu durumda p değerleri kendi aralarında anlamlı bir fark oluşturmamaktadır. CCSA9 aykırı değere sahip olduğu için anlamlı farklar üretme konusunda GWO ile benzerlik göstererek diğer kaotik hibrit algoritmalardan ayrılmıştır.



Şekil 4.98. F16 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F16 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.98'de verilmiştir. Kaotik hibirit algoritmalar erken iterasyonlarda benzer yörüngeye gelmişlerdir. CCSA9 yörüngede farklı bir noktada sabit kalarak diğer algoritmalardan ayrılmıştır. Bu durumda anlamlı bir fark oluşturmasını desteklemektedir.

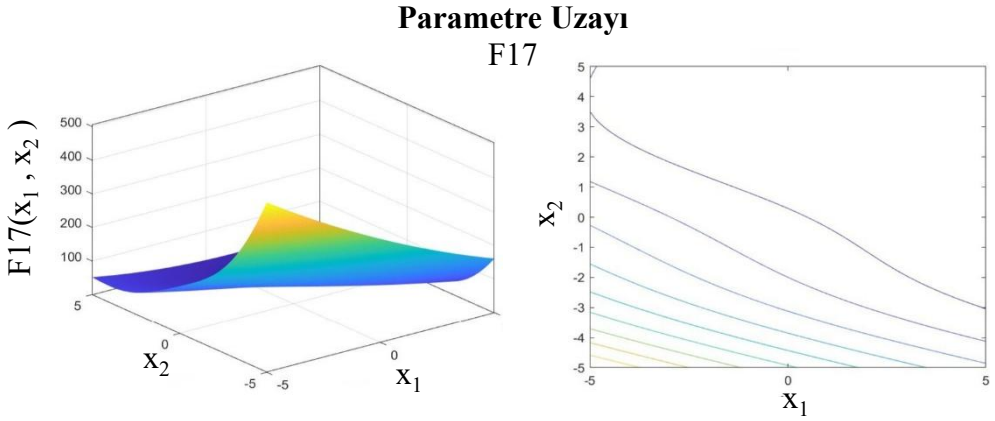


Şekil 4.99. F16 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

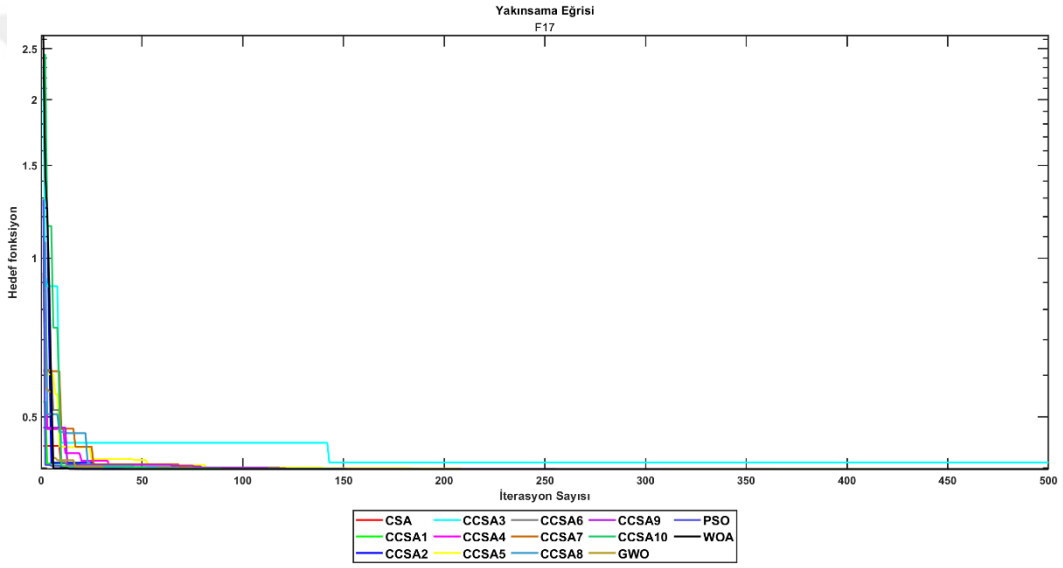
F16 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.99'da verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar benzer çeşitlilik dağılımda kalmıştır. CCSA3 250 ile 300. iterasyonlar arasında çeşitliliği düşürerek aramayı daraltıp tekrar genişletmiştir.

4.2.17. F17 Test Fonksiyonu

F17 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.100'de F17 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.100. F17 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı

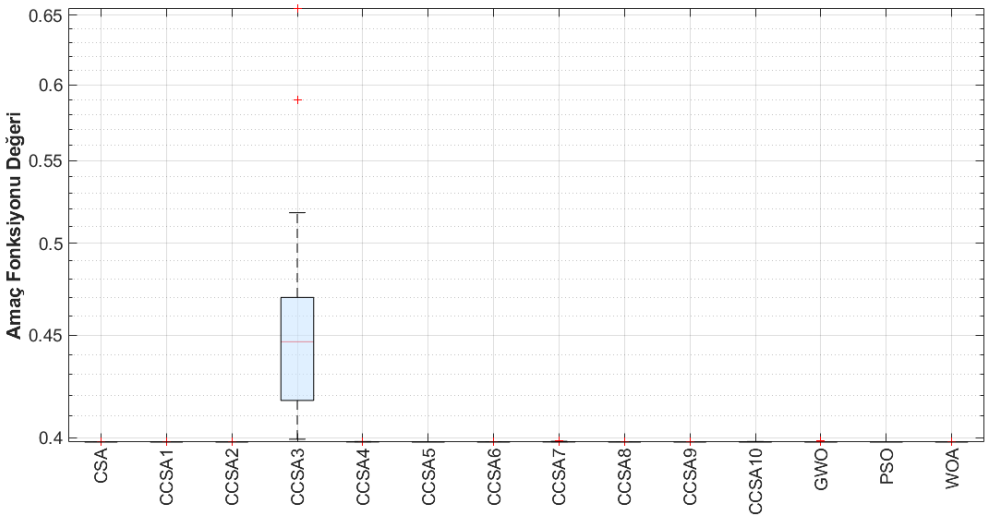


Şekil 4.101. F17 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F17 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.101'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F17 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.19'da 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Algoritmalar erken iterasyonlarda optimuma ulaşmıştır. Elde edilen 30 çözümde birbiriyle benzerlik göstermektedir. CCSA3 0,055824652 standart sapma değeri ile yakınsama performansında geride kalmıştır.

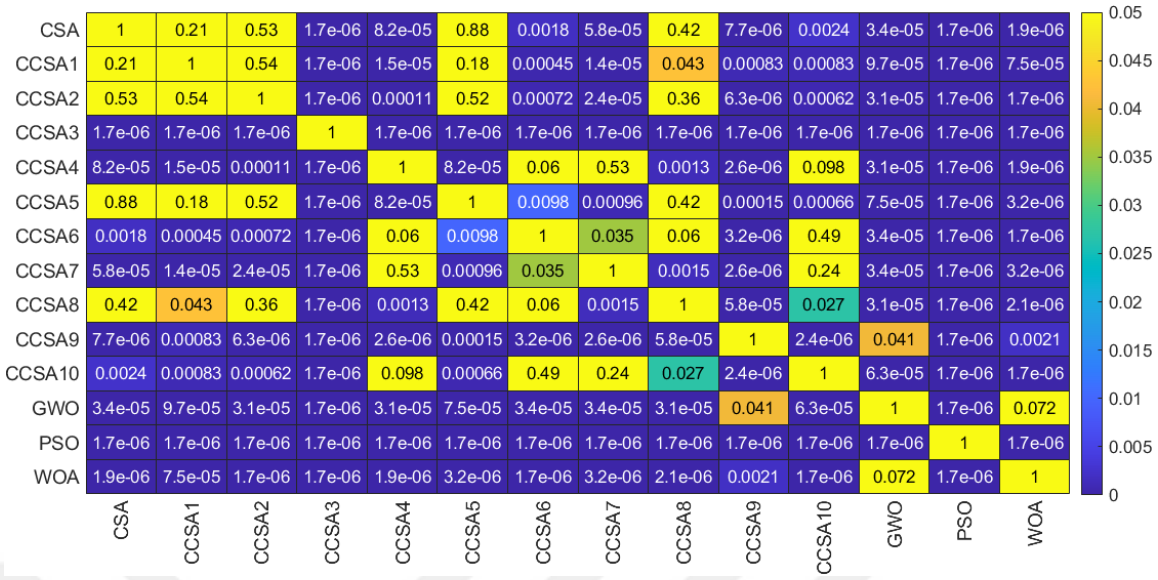
Çizelge 4.19. F17 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0,397887448	0,397998994	0,397916563	0,397911843	2,57116E-05
CCSA1	0,3978877	0,398012254	0,397910407	0,397897789	3,04158E-05
CCSA2	0,397887989	0,398006184	0,39791439	0,397903451	2,77106E-05
CCSA3	0,399222079	0,65544845	0,454839309	0,446528207	0,055824652
CCSA4	0,397891097	0,398256238	0,397994539	0,397966184	9,30666E-05
CCSA5	0,397888074	0,398001169	0,397920815	0,397906713	3,53343E-05
CCSA6	0,397887414	0,398116526	0,397954796	0,397947667	5,3947E-05
CCSA7	0,397887662	0,398679836	0,398039178	0,397991573	0,000164882
CCSA8	0,397887738	0,398128669	0,397930306	0,397909852	5,09024E-05
CCSA9	0,397887367	0,397908282	0,397892377	0,397890139	5,51401E-06
CCSA10	0,397887585	0,398159198	0,397967984	0,397965813	7,1137E-05
GWO	0,397887384	0,398455456	0,39790794	0,397888125	0,000103428
PSO	0,397887358	0,397887358	0,397887358	0,397887358	0
WOA	0,397887358	0,397908147	0,397888986	0,397887535	3,93922E-06



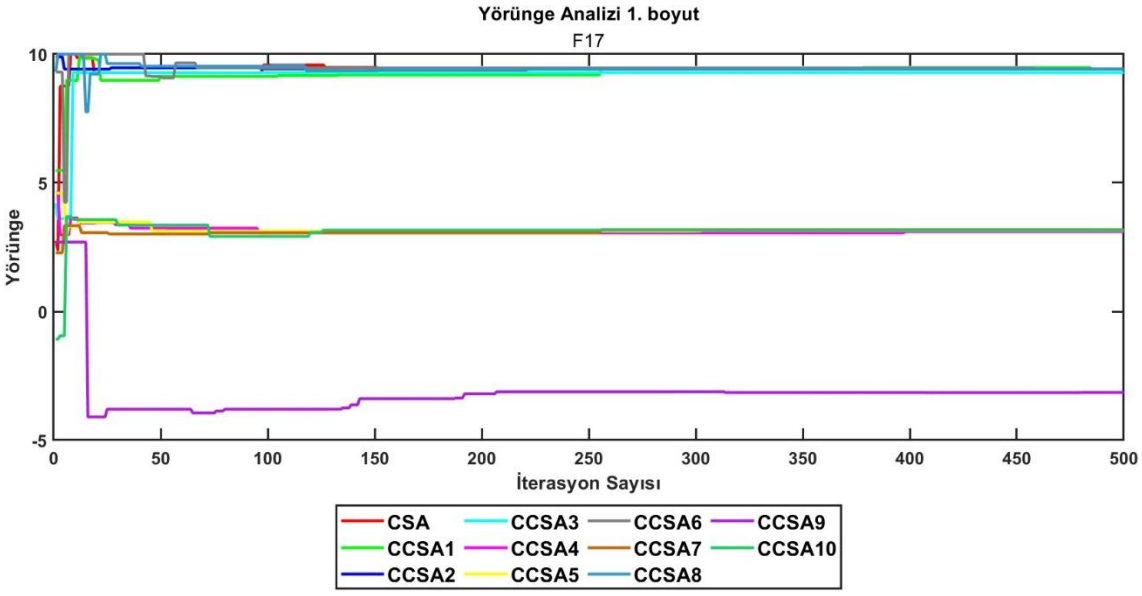
Şekil 4.102. F17 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F17 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.102'da verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler vermiş ve aykırı değerler oluşturmuştur. Bu durumda yakınsama ve optimum noktayı bulmadaki performansını desteklemektedir.



Şekil 4.103. F17 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

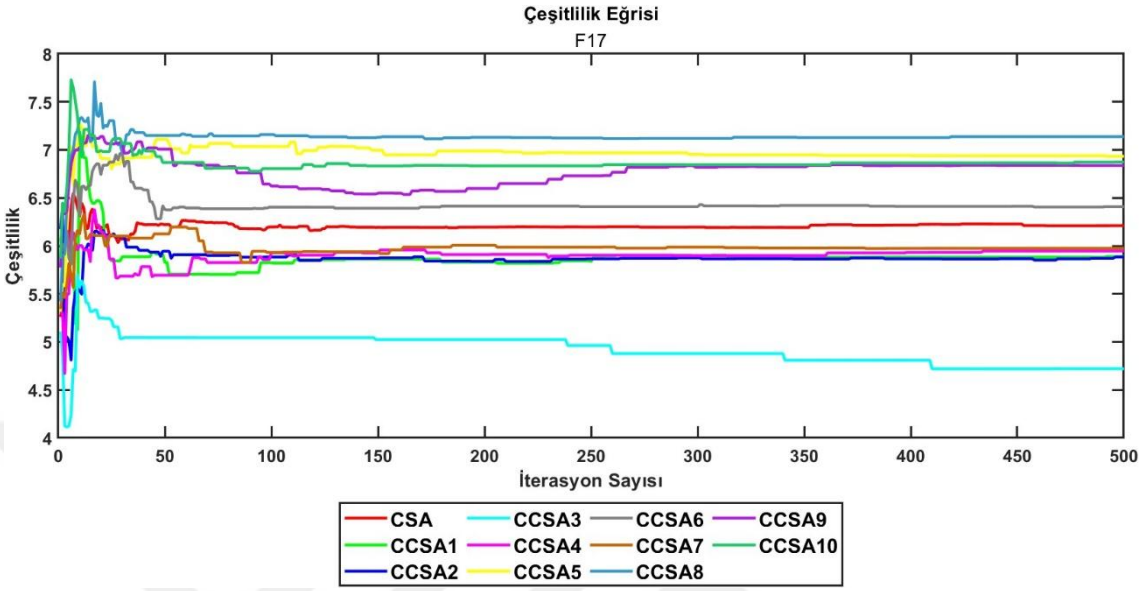
Algoritmaların F17 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.103'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır.



Şekil 4.104. F17 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F18 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.104'te verilmiştir. Kaotik hibrit

algoritmalar erken iterasyonlarda yörüngede sabitleme yaşamıştır. Ancak farklı değerlerde yörüngeye oturmuşlardır.

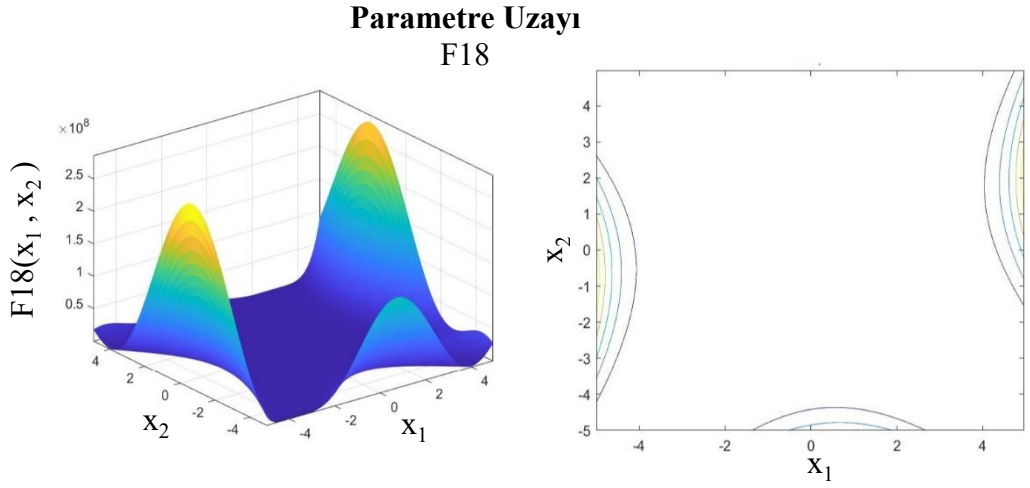


Şekil 4.105. F17 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

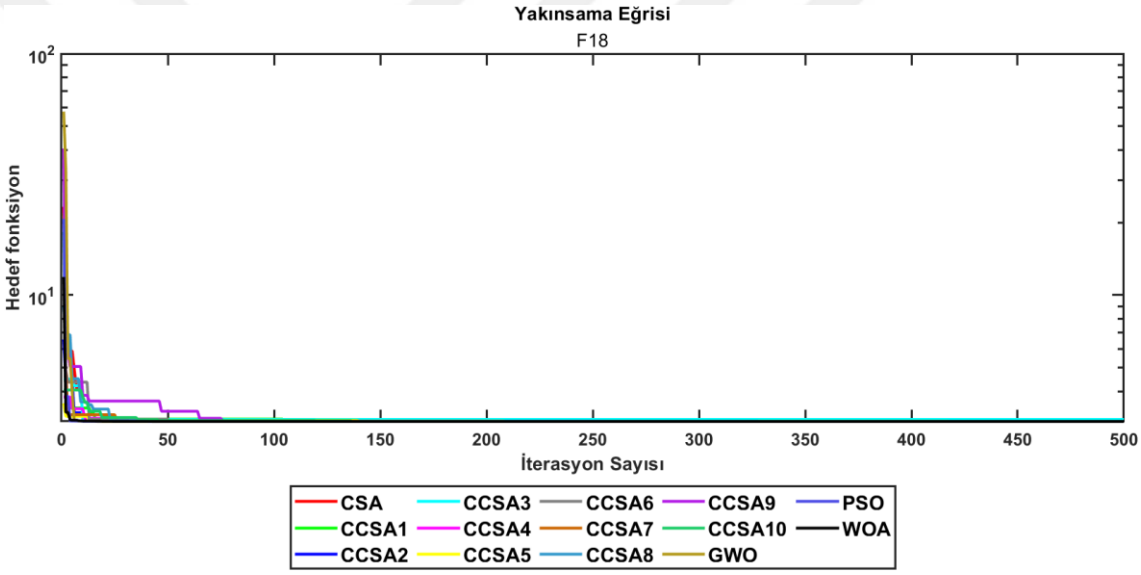
F1 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.7'de verilmiştir. CCSA3 algoritmasında iterasyon sayısı arttıkça çeşitlik azalmıştır ve beklentileri karşılamıştır. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.18. F18 Test Fonksiyonu

F18 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.106'da F18 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.106. F18 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı

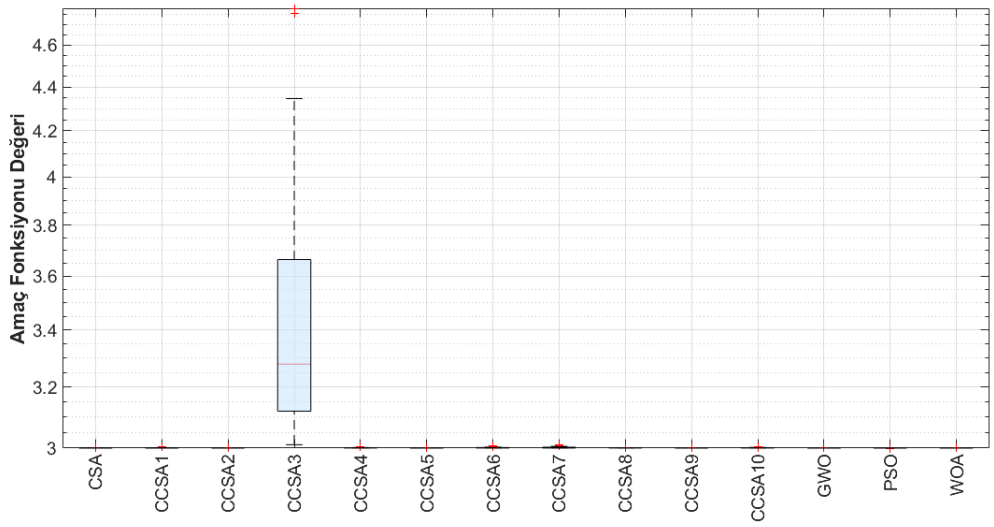


Şekil 4.107. F18 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F18 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.107'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Tüm algoritmalar erken iterasyonlarda yakınsama gerçekleştirmiştir. Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F20 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.20'de 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Çözümlerdeki benzerlikte yakınsama grafiğini desteklemektedir.

Çizelge 4.20. F18 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

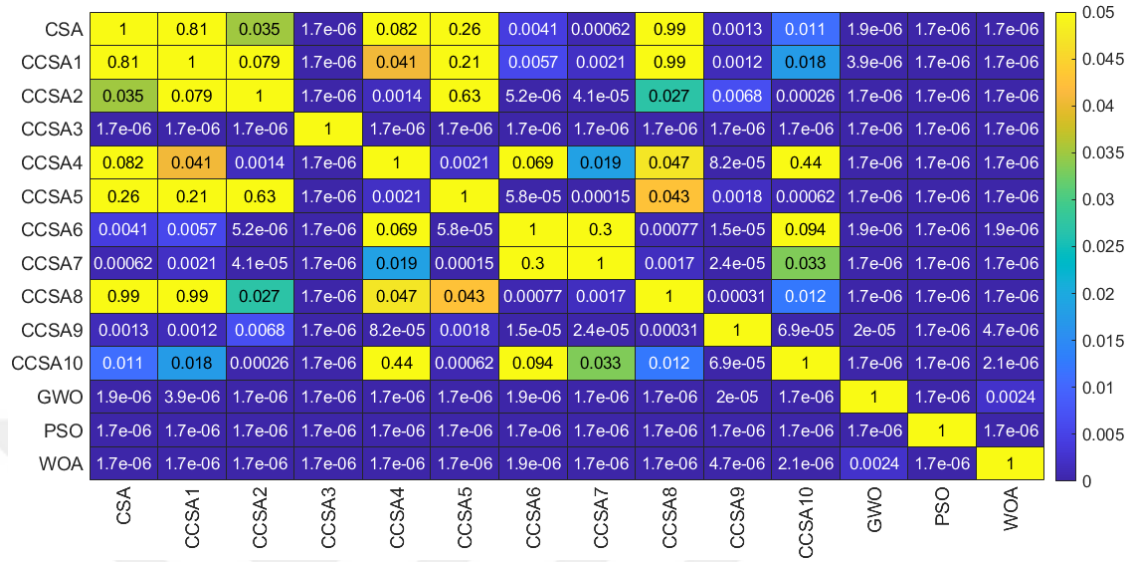
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	3,000006965	3,001841197	3,00050317	3,000310064	0,000499922
CCSA1	3,000026546	3,003810699	3,000536311	3,000308389	0,000730184
CCSA2	3,000009287	3,000879827	3,00029814	3,000228807	0,000214476
CCSA3	3,010713476	4,782903633	3,457057972	3,279537499	0,482498164
CCSA4	3,00005428	3,003812003	3,000812689	3,000579522	0,000802739
CCSA5	3,00003424	3,000895324	3,000311849	3,000281384	0,000190189
CCSA6	3,000002397	3,006365881	3,001539977	3,001026204	0,001620714
CCSA7	3,000076387	3,011830566	3,002352959	3,001073846	0,003098233
CCSA8	3,000034839	3,001743448	3,000484849	3,000432482	0,000387867
CCSA9	3,000000503	3,002100307	3,000184965	3,000068769	0,000407244
CCSA10	3,000013903	3,005061828	3,001032928	3,000850786	0,001051771
GWO	3,000000014	3,000143544	3,000013742	3,00000823	2,54246E-05
PSO	3	3	3	3	9,86142E-16
WOA	3,000000006	3,000082099	3,000006867	3,000000765	1,62401E-05



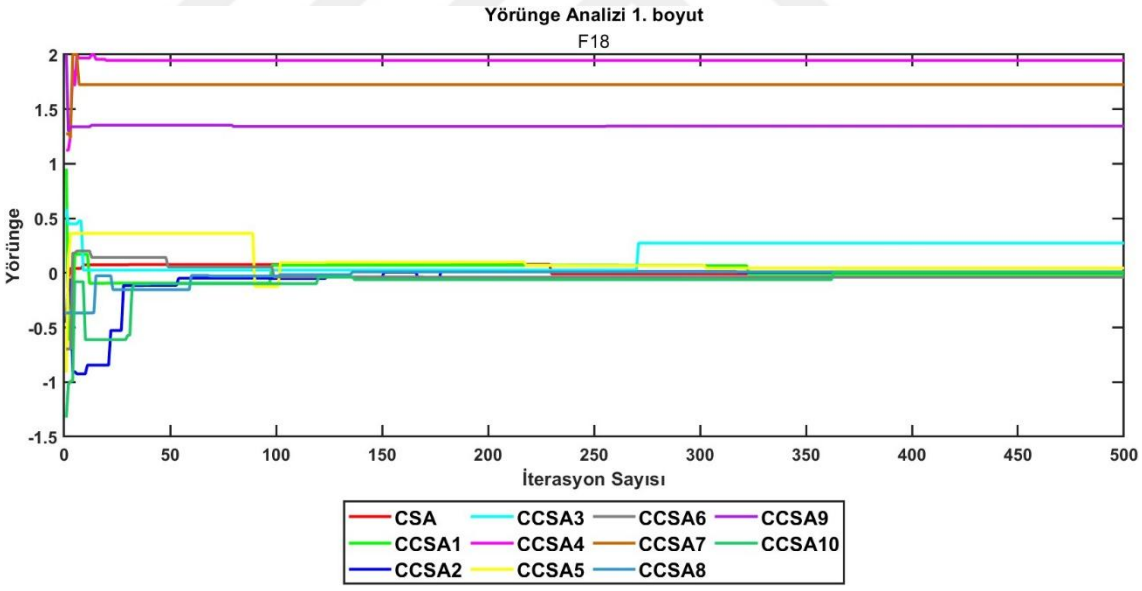
Şekil 4.108. F18 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F18 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.108'de verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler vermiş ve aykırı değerler oluşturmuştur. Algoritmaların F18 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.109'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 diğerlerinden anlamlı bir fark oluşturmaktadır. Aykırı değerler

oluşturduğu için bu durum gerçekleşmektedir bu durumda kutu grafiğini desteklemektedir.

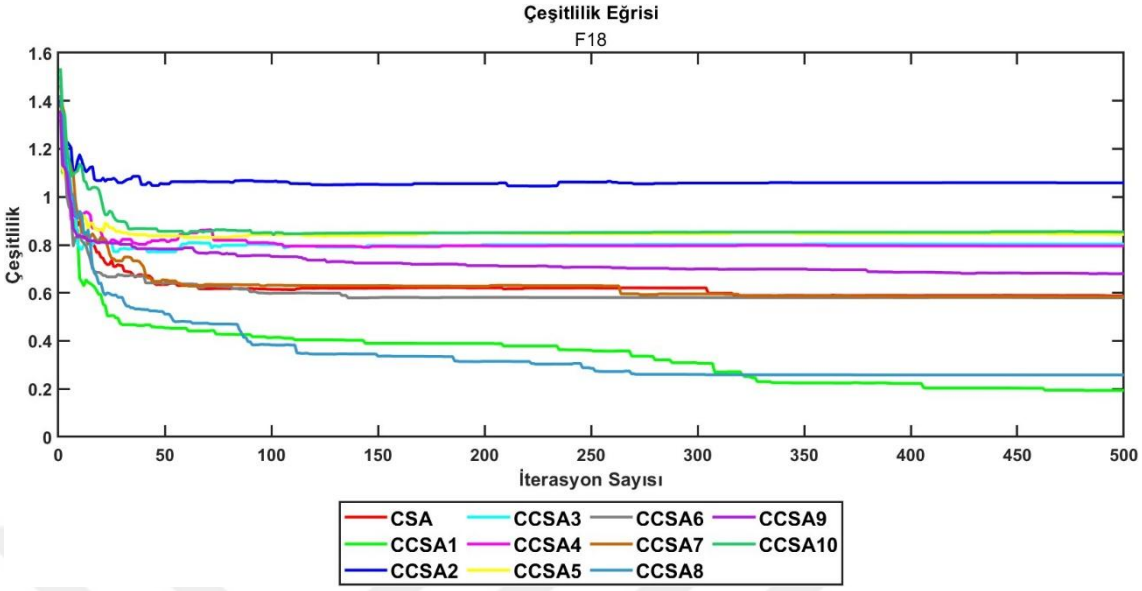


Şekil 4.109. F18 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri



Şekil 4.110. F18 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F18 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.110'da verilmiştir. CCSA4, CCSA7, CCSA9 farklı yörüngelerde genliklerini sabitlemişlerdir. CCSA3 yaklaşık 275. İterasyondan sonra farklı bir yörüngeye geçerek diğer algoritmalardan ayrılmıştır.

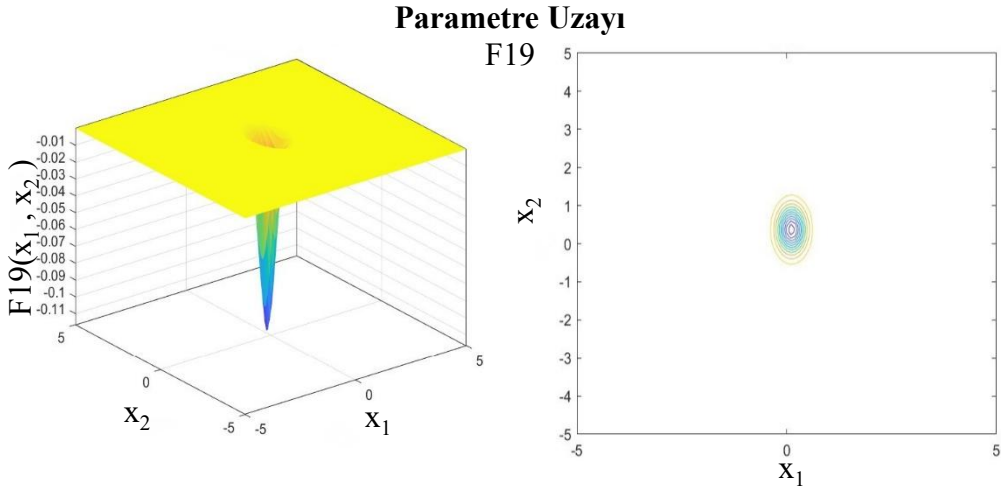


Şekil 4.111. F18 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

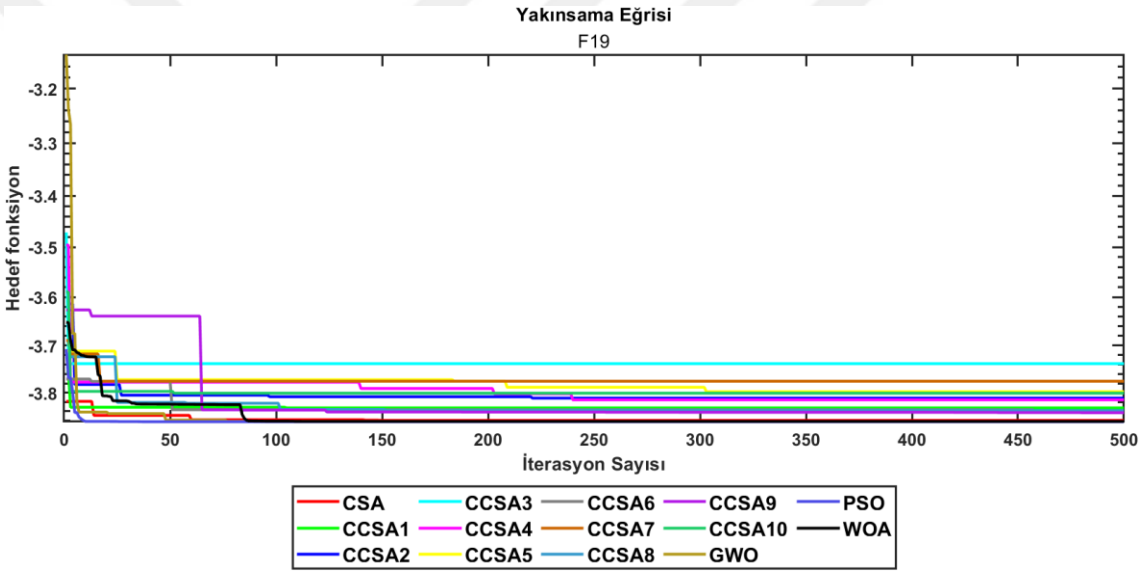
F18 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.111'de verilmiştir. Algoritmaların çeşitlilik eğrilerinde belirgin bir fark vardır. Yakınsama performansları benzerlik gösterdiği için farklı çeşitliliklerde optimuma ulaşmışlardır.

4.2.19. F19 Test Fonksiyonu

F19 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.112'de F19 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.112. F19 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



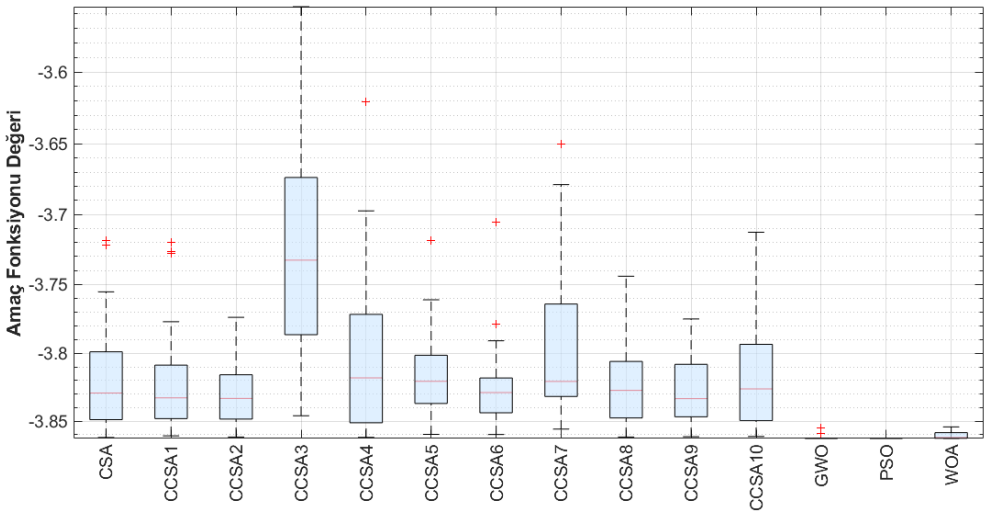
Şekil 4.113. F19 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F19 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.113'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Problemin optimum değeri -3,32 olduğu için CCSA3 algoritması erken iterasyonda bu değere yakınsamıştır. Tüm algoritmalar içinde en iyi yakınsamayı sağlayan algoritma olmuştur.

Çizelge 4.21. F19 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	-3,718824625	-3,862041238	-3,819231958	-3,829195382	0,039150308
CCSA1	-3,719850184	-3,860801023	-3,82113809	-3,832738565	0,039195602
CCSA2	-3,773859773	-3,861704825	-3,828469746	-3,833101277	0,025441577
CCSA3	-3,555075227	-3,845896334	-3,725901362	-3,732625199	0,073826798
CCSA4	-3,620897337	-3,861925636	-3,805117397	-3,818039137	0,056448372
CCSA5	-3,718259714	-3,859750011	-3,819549653	-3,820513585	0,030575205
CCSA6	-3,705231584	-3,85976305	-3,824290565	-3,828854823	0,029427436
CCSA7	-3,650042669	-3,855834502	-3,798740549	-3,8206073	0,051971526
CCSA8	-3,744141299	-3,861678419	-3,824393748	-3,827225877	0,02824725
CCSA9	-3,775013467	-3,861417703	-3,827437657	-3,833313983	0,026409559
CCSA10	-3,71261839	-3,861254557	-3,815622963	-3,826105937	0,039218936
GWO	-3,854900497	-3,862781507	-3,861863454	-3,862766863	0,002369082
PSO	-3,862782148	-3,862782148	-3,862782148	-3,862782148	2,71009E-15
WOA	-3,854152792	-3,86277934	-3,860578759	-3,862071844	0,002797551

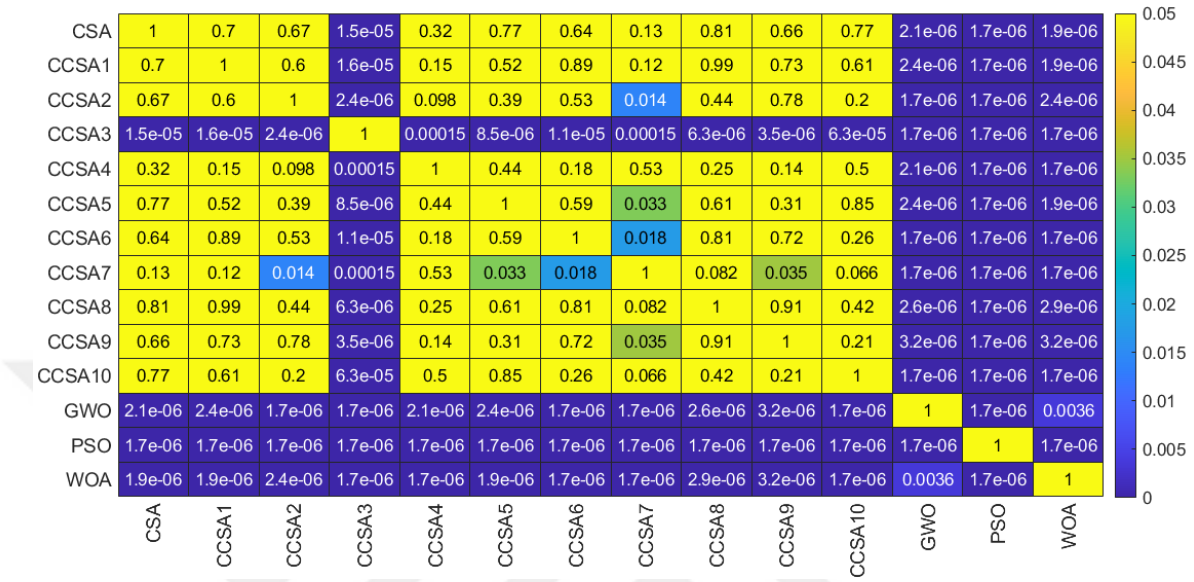
Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F19 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.21'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA3 -3,555075227ile en düşük sonucu elde etmiştir.



Şekil 4.114. F19 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

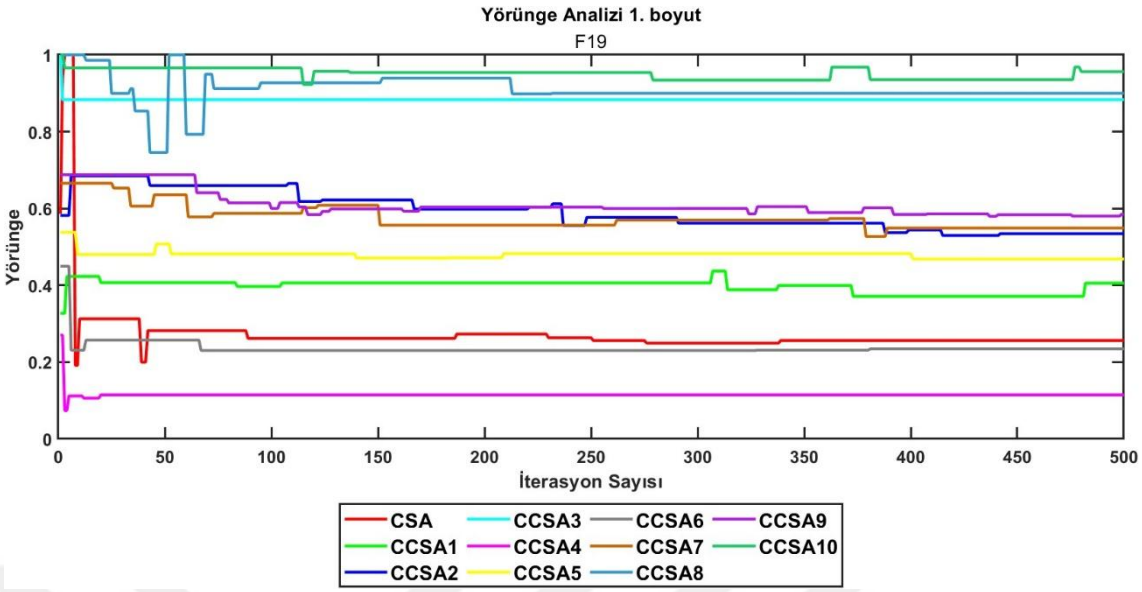
Algoritmaların F19 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.114'te verilmiştir. CCSA3 geniş bir aralıkta değerler vermiştir bu durum 30 çözümdeki yüksek

standart sapma değerini desteklemektedir. Kaotik yapılar geniş değer aralıklarında farklı çözümler vermektedir, PSO, GWO ve WOA algoritmaları dar aralıktadır ve daha kararlı çalışmışlardır.



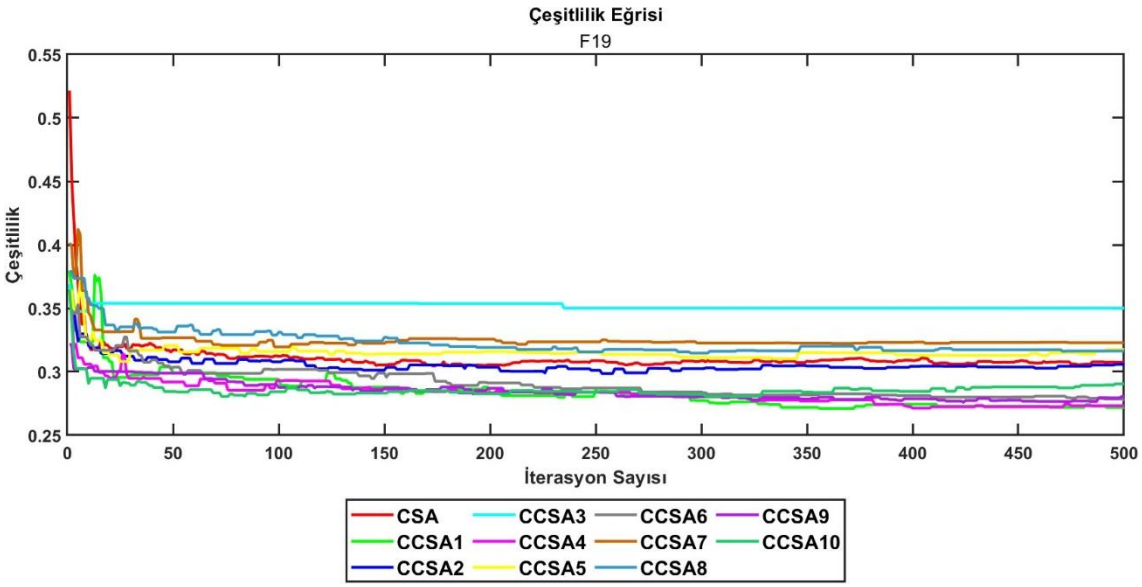
Şekil 4.115. F19 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri

Algoritmaların F19 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.115'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir. Diğer kaotik hibrit algoritmalar birbirlerine karşı anlamlı bir fark üretememişlerdir. Ancak literatürdeki algoritmalara karşı anlamlı bir fark üretmişlerdir.



Şekil 4.116. F19 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F19 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.116'da verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar 1. boyutta farklı noktalarda yörüngeye oturmuşlardır. CCSA3 yörüngeyi erken sabit genlikle yakalamıştır.

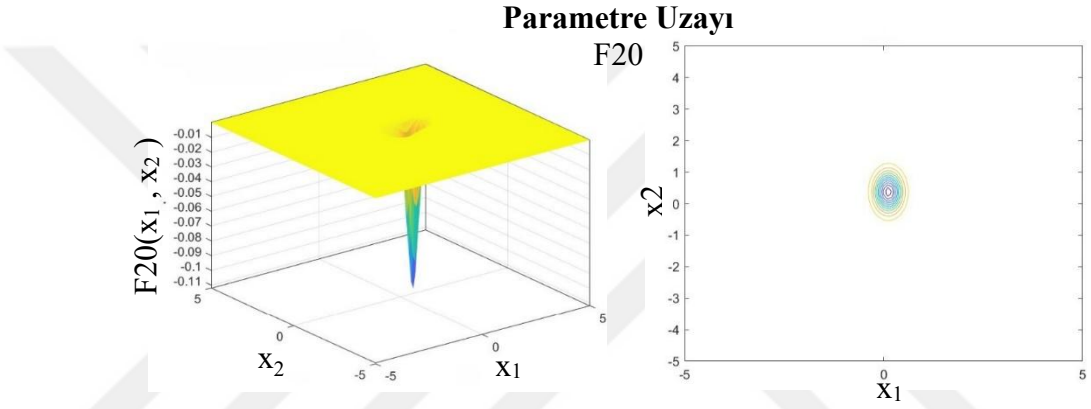


Şekil 4.117. F19 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

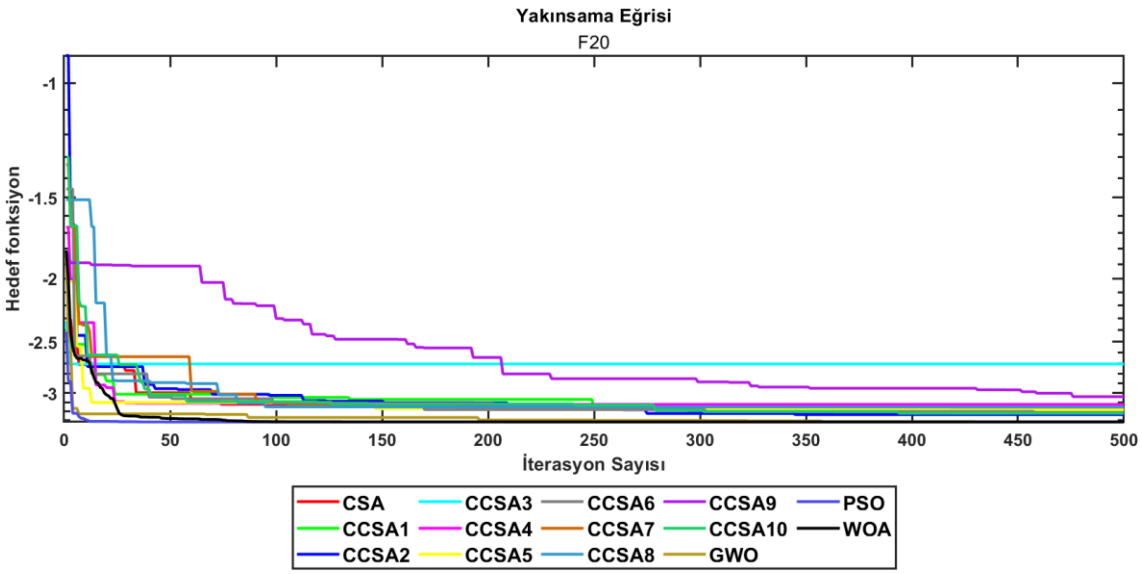
F19 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.117'de verilmiştir. CCSA3 algoritması yüksek çeşitlilikle arama gerçekleştirmiştir.

4.2.20. F20 Test Fonksiyonu

F20 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.4'te F20 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.118. F20 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı

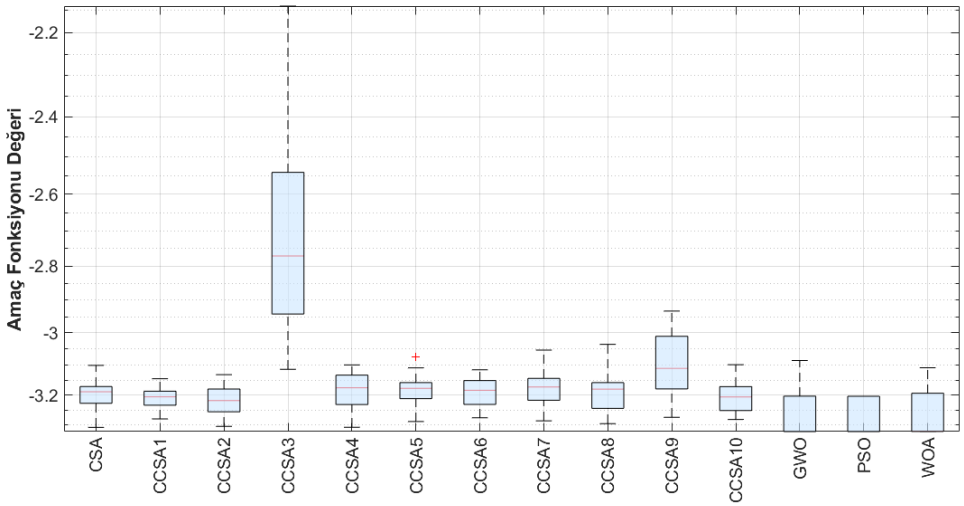


Şekil 4.119. F20 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F20 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.119'da algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F20 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.22'de 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Kaotik hibrit algoritmalar literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergileyerek optimumu yakınsamıştır.

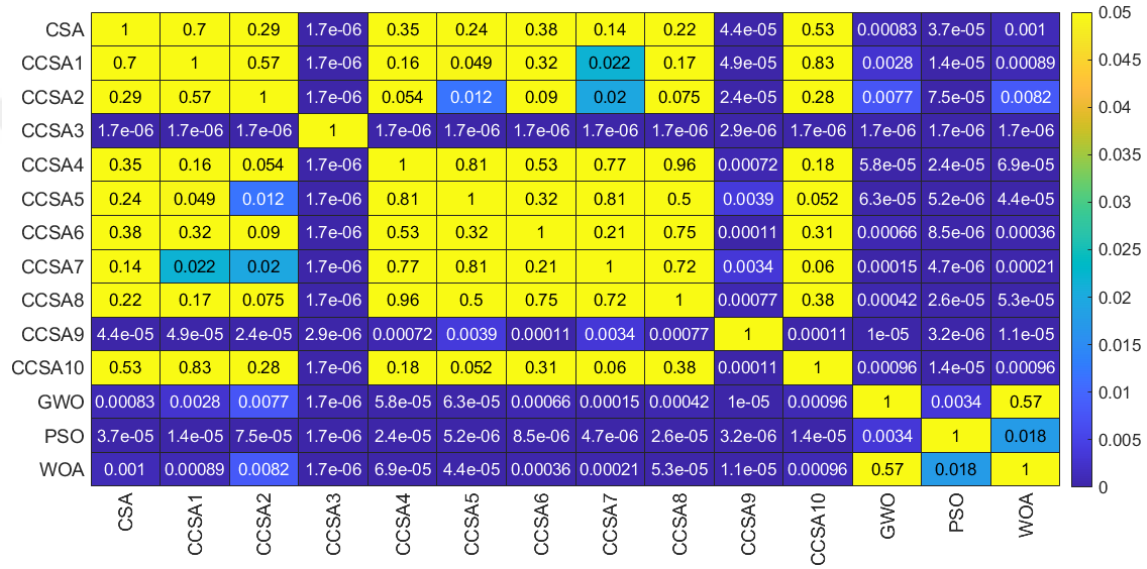
Çizelge 4.22. F20 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	-3,307477287	-3,102347419	-3,200623015	-3,187977975	0,048874456
CCSA1	-3,278851831	-3,145508189	-3,206900555	-3,204750082	0,034759622
CCSA2	-3,304174239	-3,132305597	-3,217204147	-3,217110262	0,045281535
CCSA3	-3,115202438	-2,14038269	-2,736398112	-2,770791538	0,226537076
CCSA4	-3,307139555	-3,100825001	-3,186250109	-3,174992412	0,060357756
CCSA5	-3,287428601	-3,075715982	-3,181918899	-3,177067433	0,053009037
CCSA6	-3,275035637	-3,116630114	-3,192286729	-3,183190104	0,044409505
CCSA7	-3,28531667	-3,053887519	-3,174891241	-3,172424635	0,059337766
CCSA8	-3,295099942	-3,035528847	-3,187397987	-3,179667054	0,062889167
CCSA9	-3,27339593	-2,933026608	-3,100587104	-3,112019047	0,097706032
CCSA10	-3,280639957	-3,100123873	-3,203836028	-3,205402333	0,05078598
GWO	-3,32199322	-3,086822761	-3,263795882	-3,321984021	0,071337977
PSO	-3,321995172	-3,20310205	-3,290290339	-3,321995172	0,053475325
WOA	-3,321917877	-3,110086127	-3,270225101	-3,320716678	0,074727189

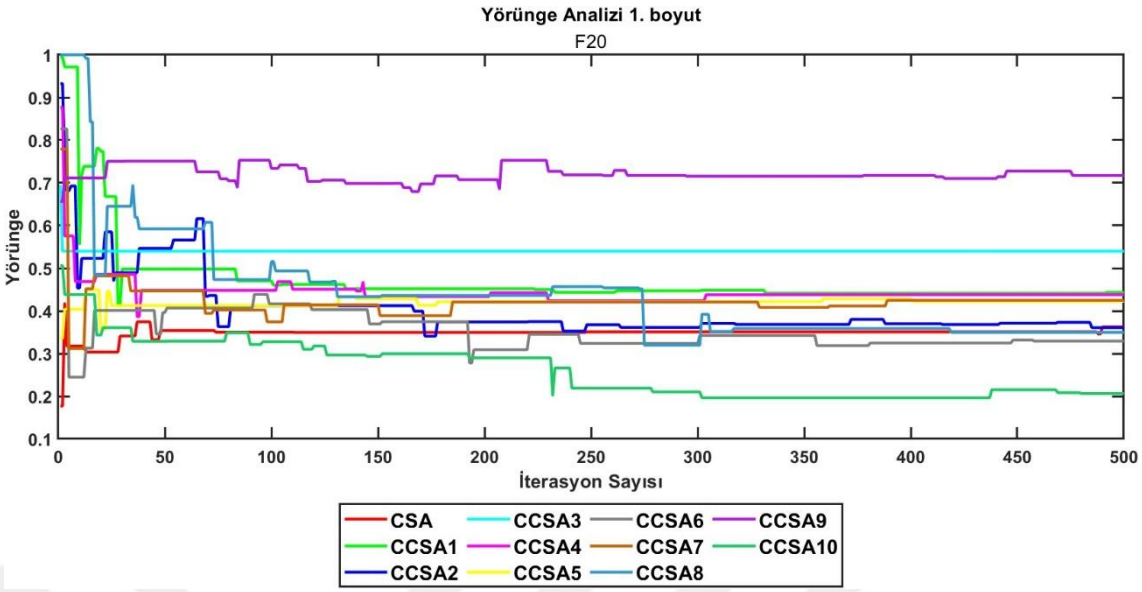


Şekil 4.120. F20 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F20 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.120'de verilmiştir. Algoritmaların F20 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.121'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 geniş bir aralıkta kutu grafiği vermiştir ve CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur ve literatürdeki algoritmalarla benzer bir performans sergilemiştir. Literatürdeki algoritmalar birbirlerine karşı anlamlı bir fark verememiştir.

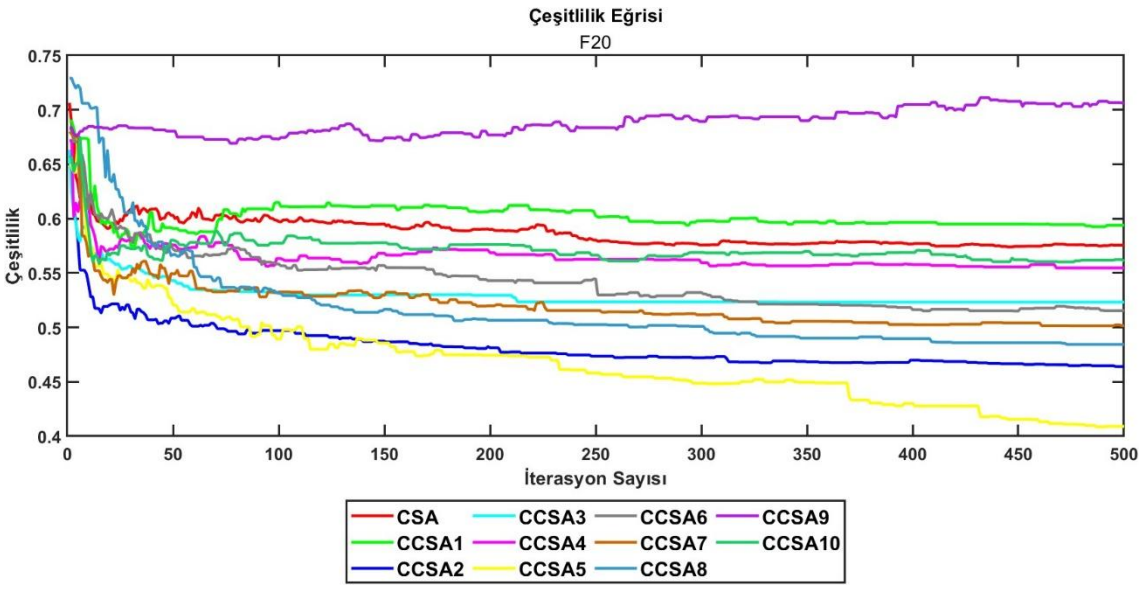


Şekil 4.121. F20 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri



Şekil 4.122. F20 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

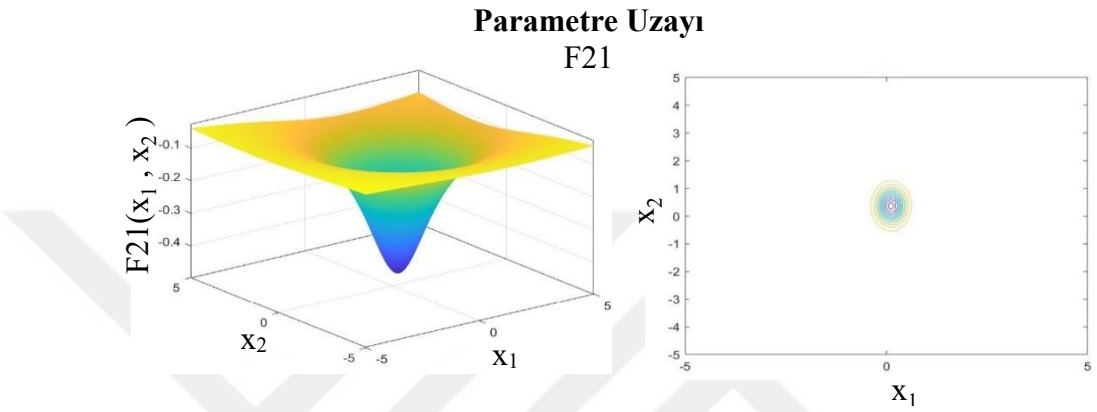
F20 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.122'de verilmiştir. CCSA3 1. Boyutta erken iterasyonlarda yörüngeyi yakalamıştır. F20 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.123'te verilmiştir. Algoritmalar birbirlerinden bağımsız çeşitliliklerde performans göstermişlerdir.



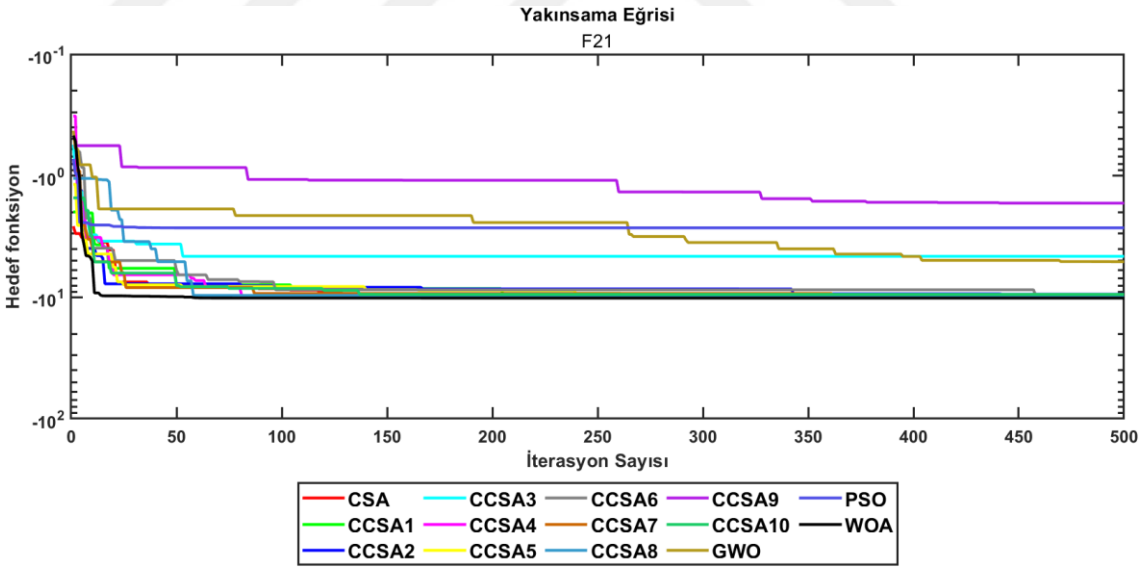
Şekil 4.123. F20 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

4.2.21. F21 Test Fonksiyonu

F21 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.124'te F21 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.124. F21 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



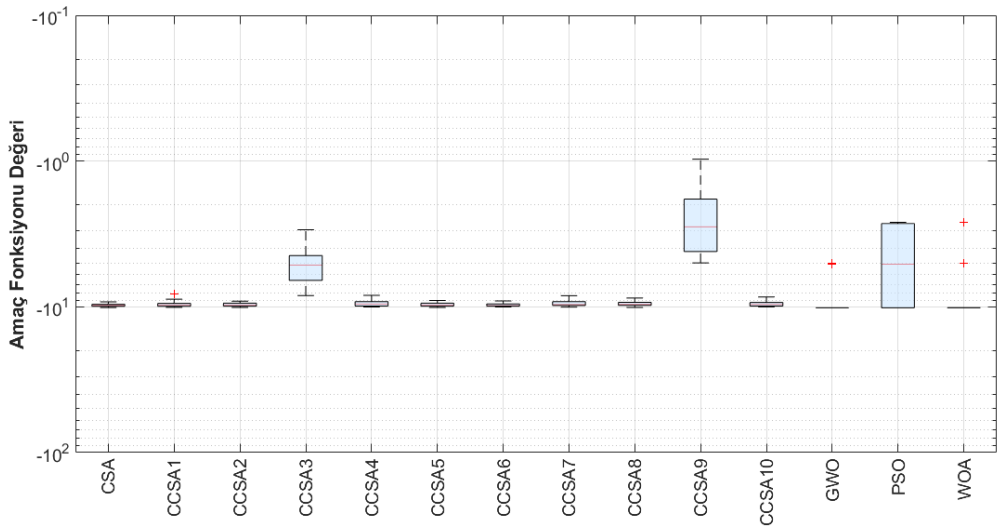
Şekil 4.125. F21 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F21 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.125'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar CCSA9 hariç problemi yakınsamışlardır.

Çizelge 4.23. F21 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

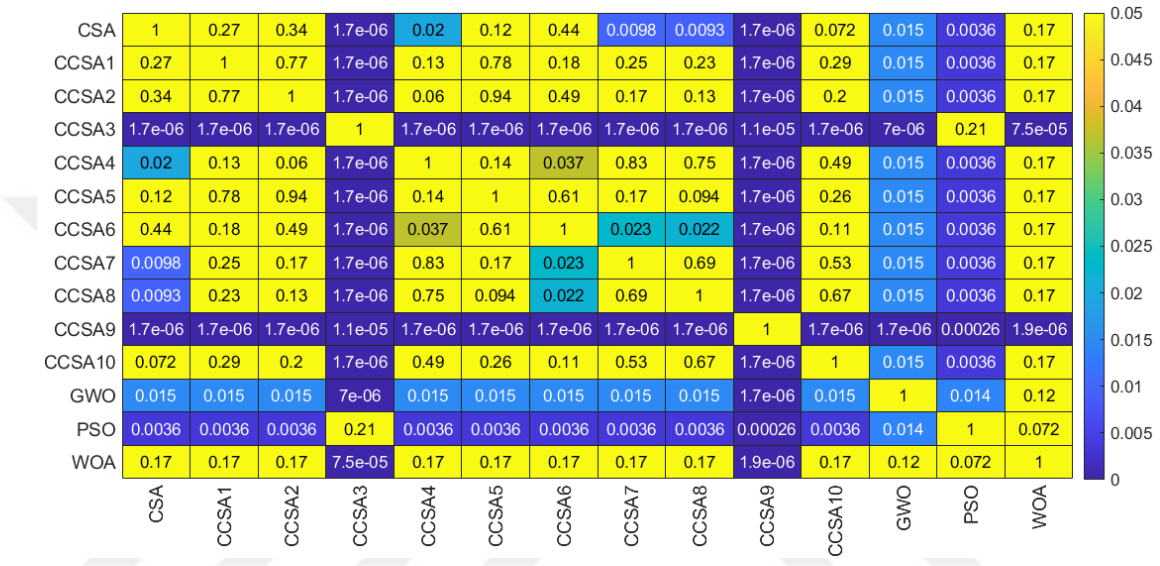
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	-10,10990926	-9,241760556	-9,751656263	-9,764922569	0,220399509
CCSA1	-10,07526981	-8,190686483	-9,635141104	-9,724192282	0,386813548
CCSA2	-10,10545454	-9,139316188	-9,671076366	-9,709610795	0,267649429
CCSA3	-8,374205296	-2,957523975	-5,508821289	-5,175960658	1,439439631
CCSA4	-10,03309261	-8,335469625	-9,484883266	-9,581019662	0,424006114
CCSA5	-10,09101968	-9,050489868	-9,66193752	-9,722402586	0,281957265
CCSA6	-10,0257142	-9,104050219	-9,720584166	-9,798610076	0,225230528
CCSA7	-10,03461574	-8,39382067	-9,516614361	-9,645052864	0,379347479
CCSA8	-10,09610374	-8,704748023	-9,513127028	-9,618020092	0,36736225
CCSA9	-4,99633841	-0,969896461	-3,01681032	-2,826734065	1,317258186
CCSA10	-10,00748766	-8,563006488	-9,553155017	-9,634896682	0,378751906
GWO	-10,15274361	-5,055179488	-9,476625641	-10,15171174	1,750544334
PSO	-10,15319968	-2,630471668	-6,398805182	-5,10077214	3,453504615
WOA	-10,15297872	-2,630217961	-8,887917871	-10,1509961	2,624323633

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F21 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.23'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA5 -10,09101968 ile en düşük sonucu elde etmiştir. PSO, GWO ve WOA algoritmaları ile rekabet ederek yüksek bir başarı göstermiştir.

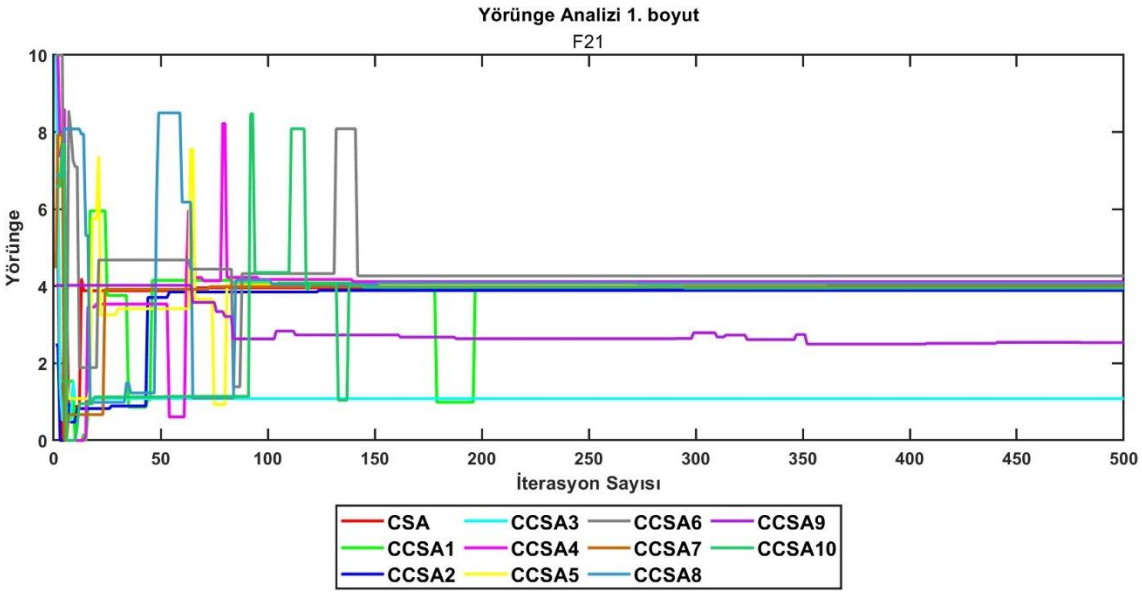


Şekil 4.126. F21 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F21 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.126'da verilmiştir. Algoritmaların F21 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.127'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA3 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur bu durum kutu grafiğindeki geniş aralıkla desteklenmiştir. Ancak optimumu bulmada aykırı değerler üreterek, kararsızlık göstermiştir.

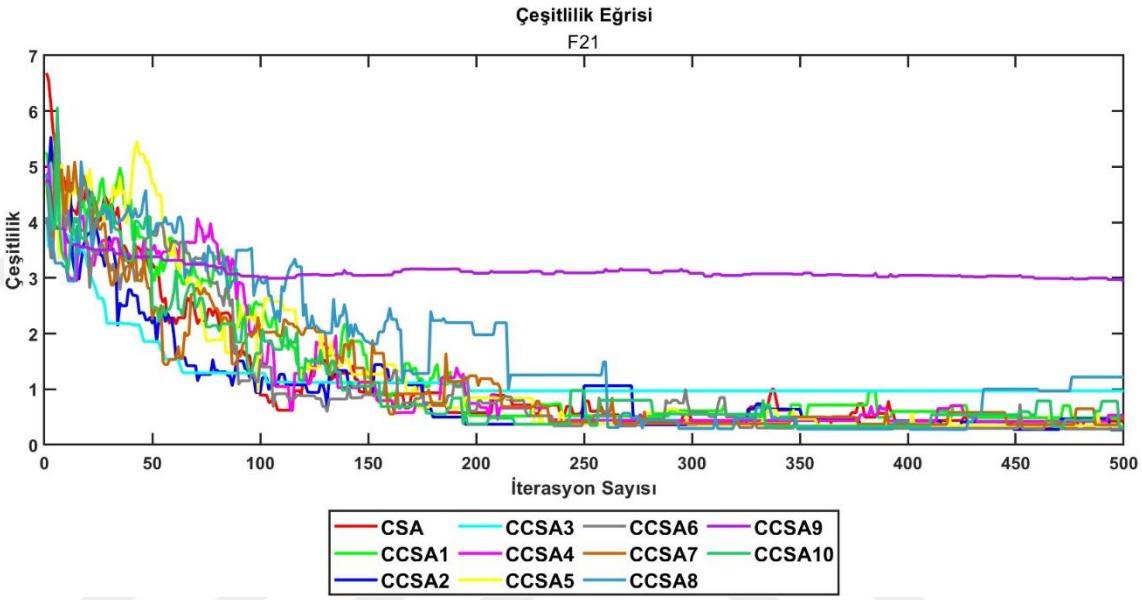


Şekil 4.127. F21 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri



Şekil 4.128. F21 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

F21 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.128'da verilmiştir. Algoritmalar yüksek genlikli davranış yaptıktan sonra sabit genliğe geçmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar, CCSA3 ve CCSA9 haricinde yörüngeyi benzer bir noktada sabit genlikle yakalamışlardır.

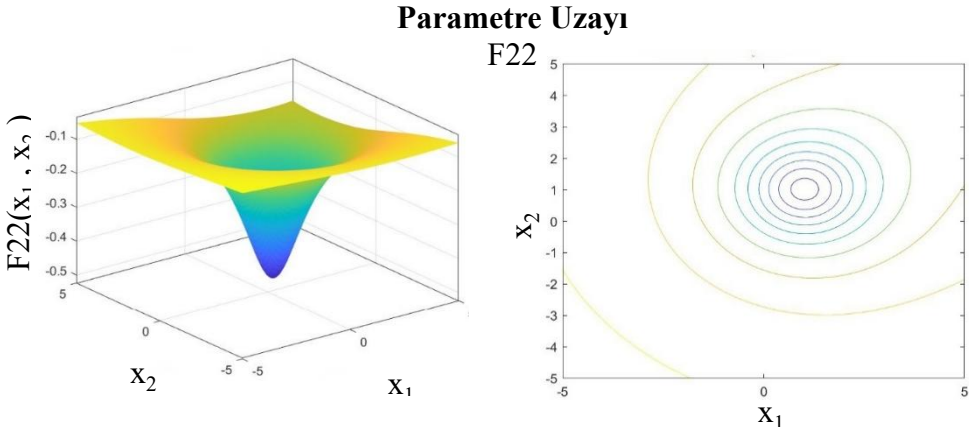


Şekil 4.129. F21 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

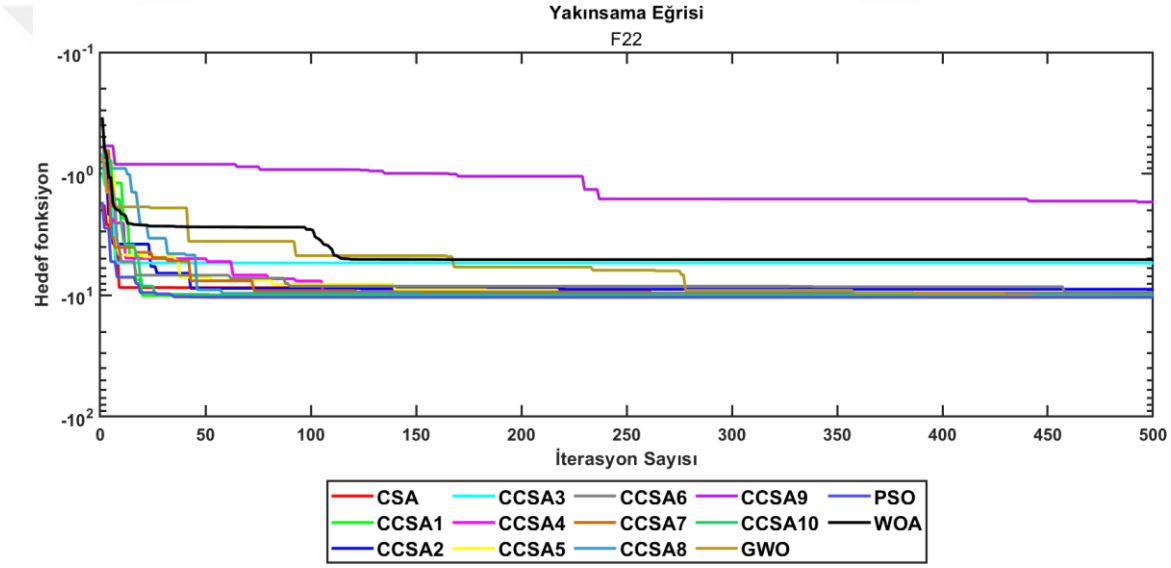
F21 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.127'de verilmiştir. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.22. F22 Test Fonksiyonu

F22 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.130'da F22 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.130. F22 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



Şekil 4.131. F22 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

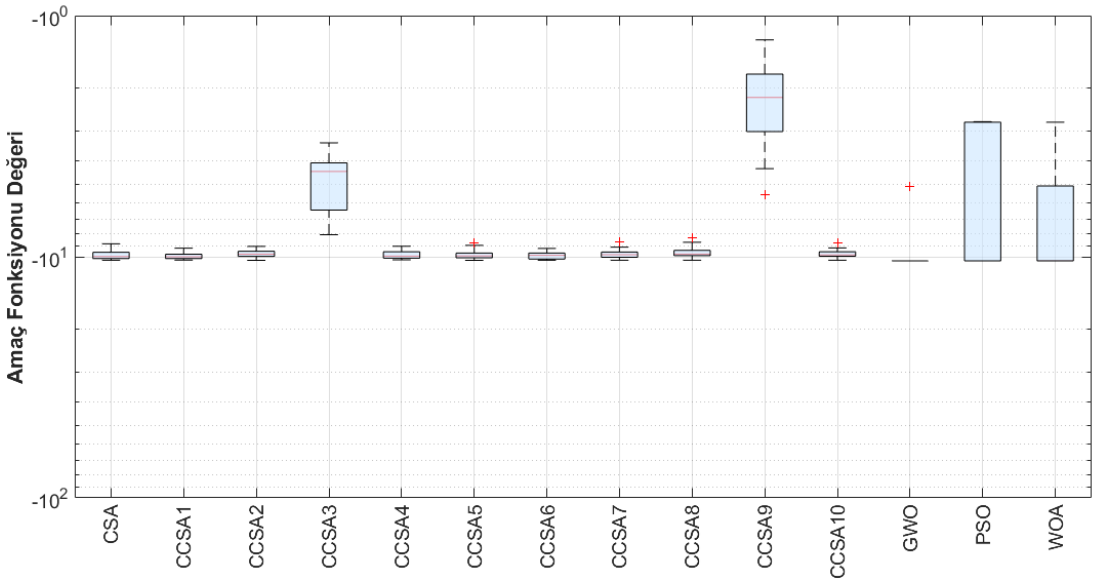
F22 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.131'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar CCSA9 hariç problemi yakınsamışlardır.

Çizelge 4. 24. F22 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	-10,33840374	-8,832673545	-9,834616469	-9,97654158	0,422435566
CCSA1	-10,32265002	-9,21605811	-9,947518387	-10,00562662	0,300020651
CCSA2	-10,34523897	-9,053910504	-9,739546217	-9,754770737	0,339475186
CCSA3	-8,098173241	-3,369823097	-5,167163073	-4,426358541	1,417768018

CCSA4	-10,30349742	-9,046339782	-9,837844367	-9,944039085	0,398093492
CCSA5	-10,35391632	-8,739915037	-9,842377589	-9,919461664	0,355625472
CCSA6	-10,33545098	-9,23683134	-9,883434512	-9,861437648	0,336696892
CCSA7	-10,33207391	-8,6965753	-9,749786359	-9,80235718	0,377419301
CCSA8	-10,33659192	-8,304477868	-9,62323591	-9,746324761	0,471553663
CCSA9	-5,525189314	-1,260948128	-2,456874582	-2,185412731	1,054787175
CCSA10	-10,34027416	-8,801642427	-9,75165103	-9,819560403	0,349990868
GWO	-10,40290585	-5,087659417	-10,22471441	-10,40184037	0,970234977
PSO	-10,40294057	-2,751933564	-7,026134893	-10,40294057	3,717565445
WOA	-10,40287565	-2,765889835	-8,610612032	-10,39033405	2,761477811
AVOA	-10,40294057	-10,40294053	-10,40294056	-10,40294057	6,65259E-09

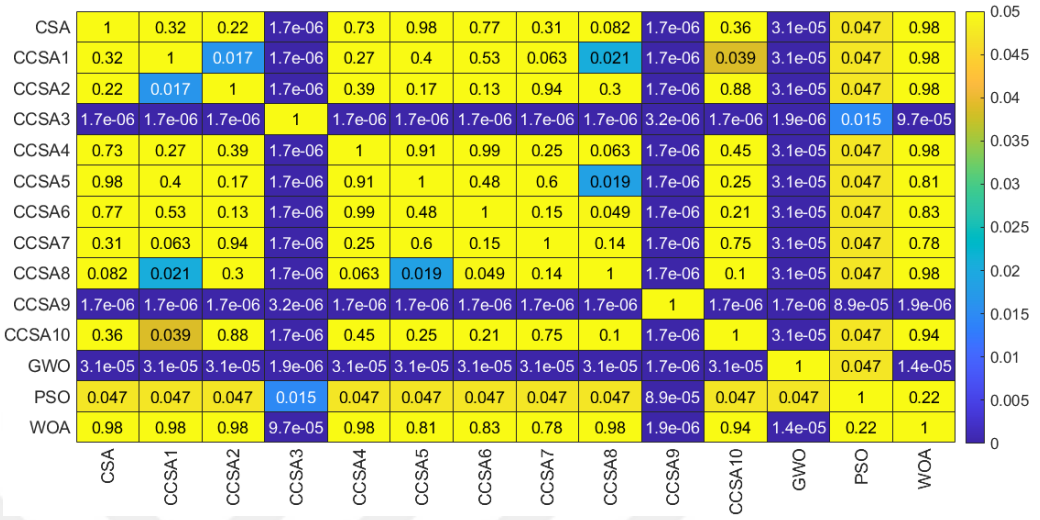
Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F22 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.24'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA5 -10,35391632ile en düşük sonucu elde etmiştir. PSO, GWO ve WOA algoritmaları ile rekabet ederek yüksek bir başarı göstermiştir.



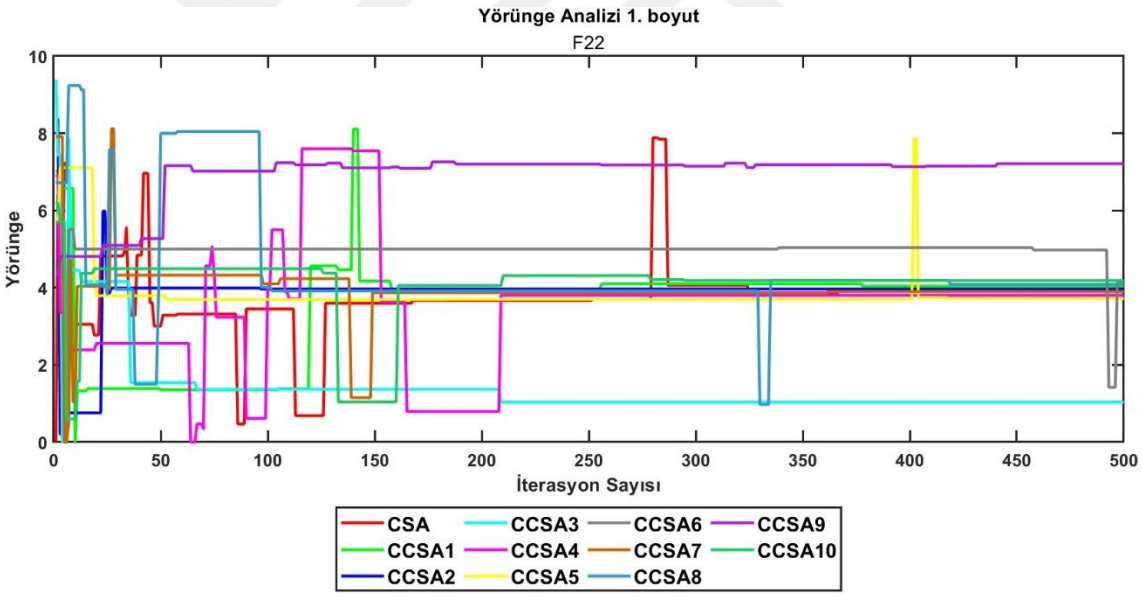
Şekil 4.132. F22 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F22 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.132'de verilmiştir. Algoritmaların F22 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.133'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var

olmaktadır. CCSA3 ve CCSA9 tüm algoritmalarda anlamlı bir fark ortaya koymuştur. Ancak kutu grafiğinde geniş bir aralıkta çalışarak aykırı değerler üretmişlerdir.

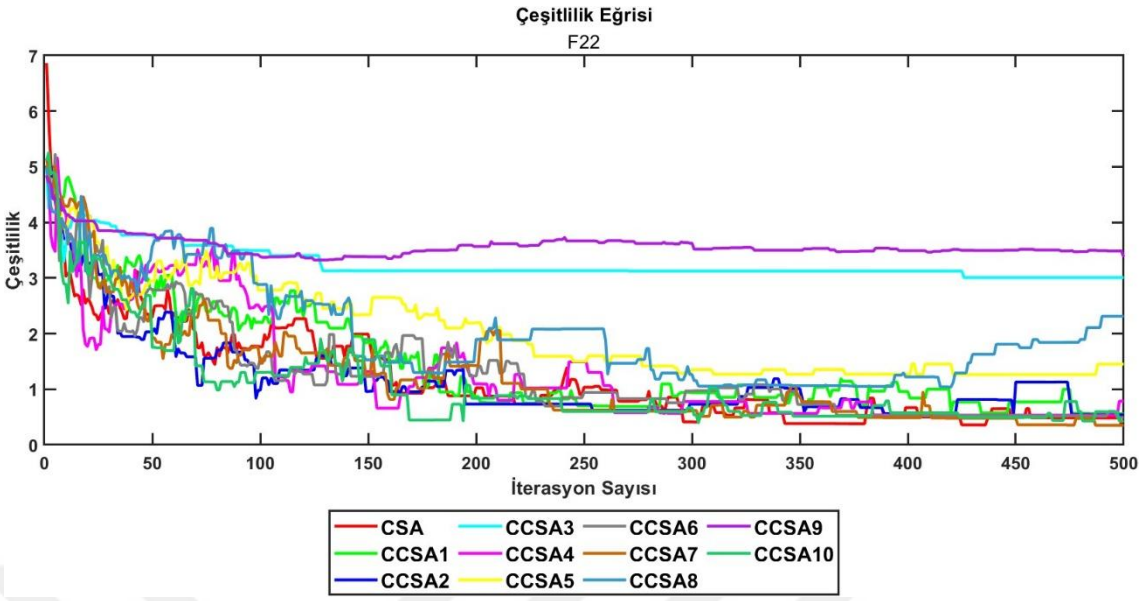


Şekil 4.133. F22 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri



Şekil 4.134. F22 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

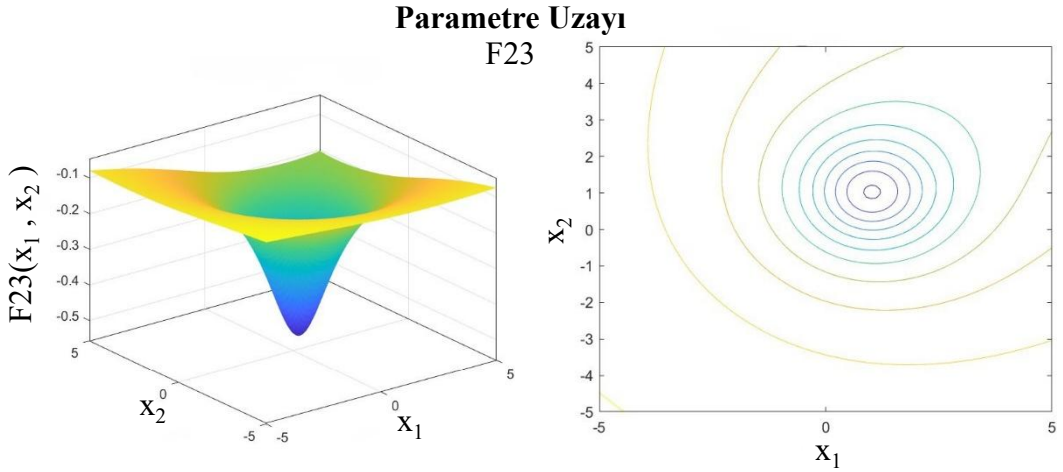
F22 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.134'te verilmiştir. F22 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.22'de verilmiştir. Kaotik algoritmalar CCSA3 ve CCSA9 dışında kalanlar benzer yörünge ve çeşitlilik davranışı sergilemişlerdir.



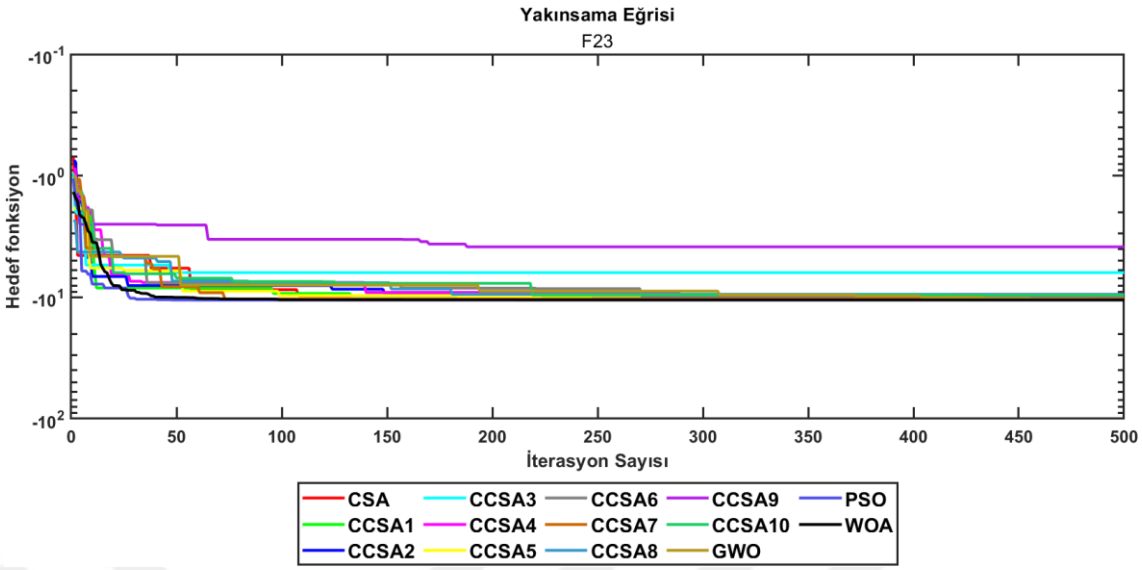
Şekil 4.135. F22 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

4.2.23. F23 Test Fonksiyonu

F23 test fonksiyonu çok modlu bir test fonksiyonudur. Çizelge 3.5'te test fonksiyonuna ait denklem ve sınır değerleri verilmiştir. Şekil 4.136'da F23 test fonksiyonuna ait üç boyutlu ve iki boyutlu parametre uzayı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.136. F23 Test Fonksiyonu Parametre Uzayı



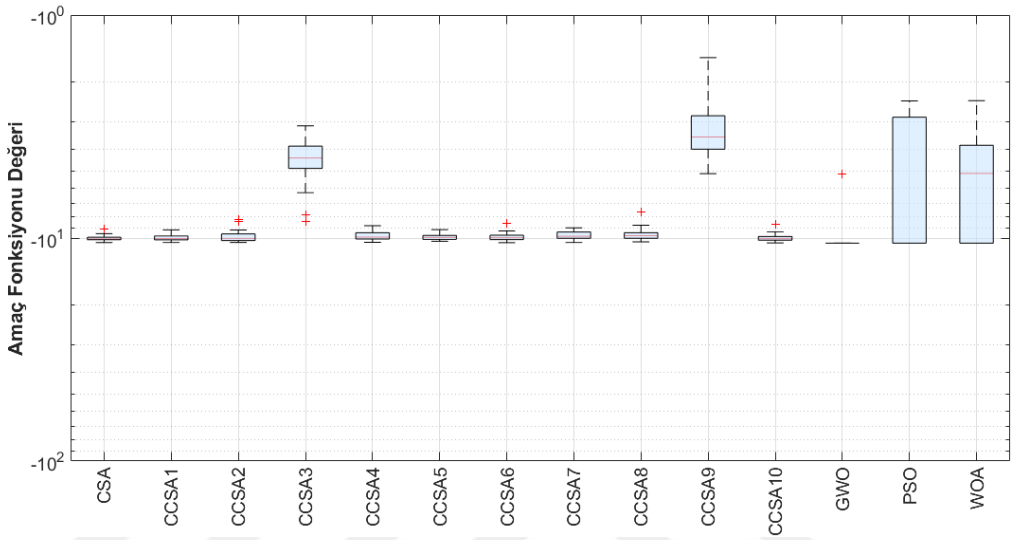
Şekil 4.137. F23 Test Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

F23 test fonksiyonu kullanılarak optimizasyon algoritmalarının performansı kıyaslanmıştır. Şekil 4.137'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar CCSA9 hariç problemi yakınsamışlardır.

Çizelge 4.25. F23 Test Fonksiyonu 30 farklı çözüme ait sonuçlar

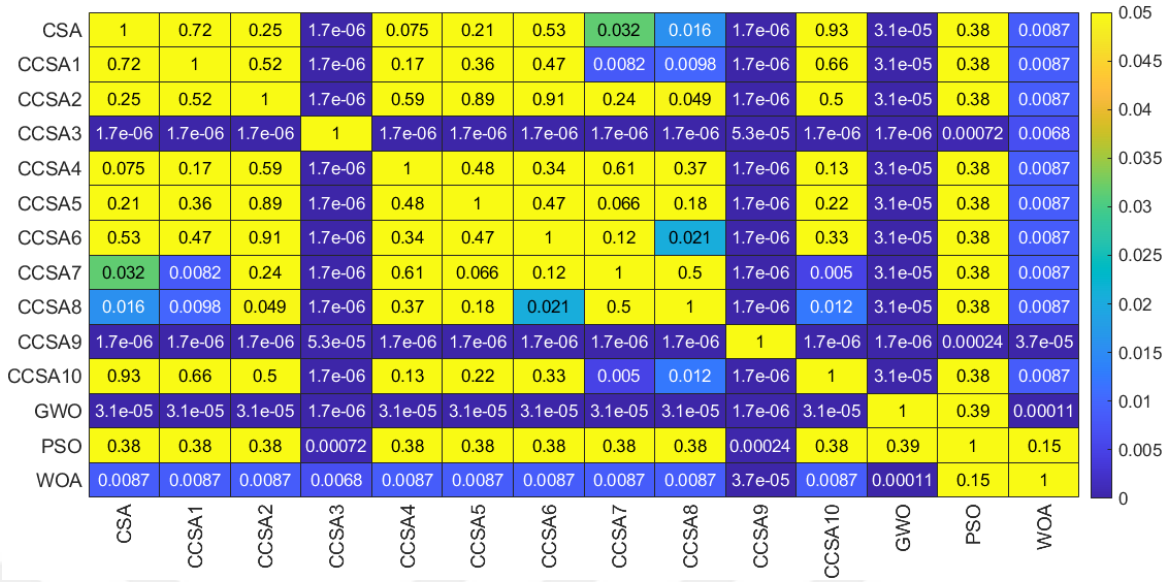
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	-10,4771982	-9,070514187	-9,98842245	-10,09203505	0,337379556
CCSA1	-10,46980482	-9,193411728	-9,985923613	-10,04360163	0,280303288
CCSA2	-10,45748273	-8,278482336	-9,855233374	-10,0334804	0,544450563
CCSA3	-8,41919287	-3,13786609	-4,694055958	-4,375644039	1,225220389
CCSA4	-10,44588424	-8,808432454	-9,799601662	-9,90452218	0,425940258
CCSA5	-10,3340461	-9,169587675	-9,881163449	-9,933714273	0,321867265
CCSA6	-10,49084734	-8,616278077	-9,914134856	-9,958331333	0,393566089
CCSA7	-10,47015683	-9,003894078	-9,765583115	-9,823344443	0,379108221
CCSA8	-10,39458575	-7,602443306	-9,652175016	-9,753384034	0,589962774
CCSA9	-5,141354047	-1,551398557	-3,467390858	-3,521254362	0,85780288
CCSA10	-10,51748056	-8,635249303	-9,983919568	-10,0594544	0,392012653
GWO	-10,53602951	-5,175068909	-10,35639613	-10,53516297	0,978596816
PSO	-10,53640982	-2,4273352	-7,737003145	-10,53640982	3,770041745
WOA	-10,53629103	-2,421531887	-7,006378941	-5,128466814	3,465796644

Algoritmaların performansını ölçmek amacıyla F23 fonksiyonu kullanılarak 30 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.25'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CCSA10 -10,51748056ile en düşük sonucu elde etmiştir. PSO, GWO ve WOA algoritmaları ile rekabet ederek yüksek bir başarı göstermiştir.

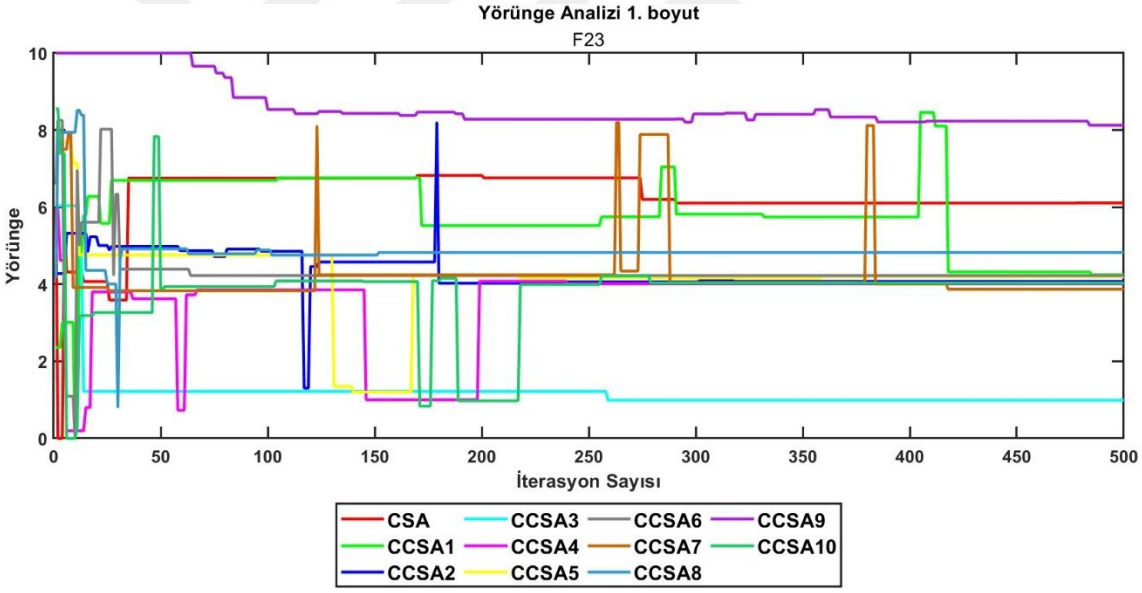


Şekil 4.138. F23 Test Fonksiyonu Algoritmaların Performans Dağılımı

Algoritmaların F23 fonksiyonunda performans dağılım grafikleri Şekil 4.138'de verilmiştir. Algoritmaların F23 test fonksiyonundaki Wilcoxon p değerleri Şekil 4.139'tda karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı bir fark var olmaktadır. CCSA10 kararlı bir kutu grafiği sergilemiştir.

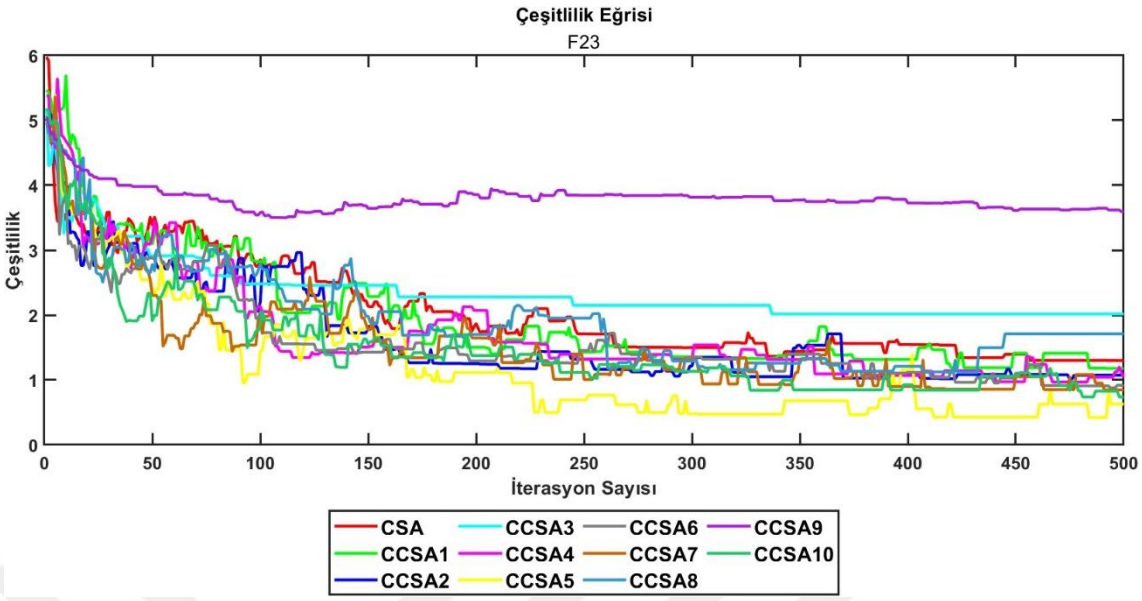


Şekil 4.139. F23 Test Fonksiyonu Algoritmalar Arası Wilcoxon P-Değerleri



Şekil 4.140. F23 Test Fonksiyonu Yörünge Analizi

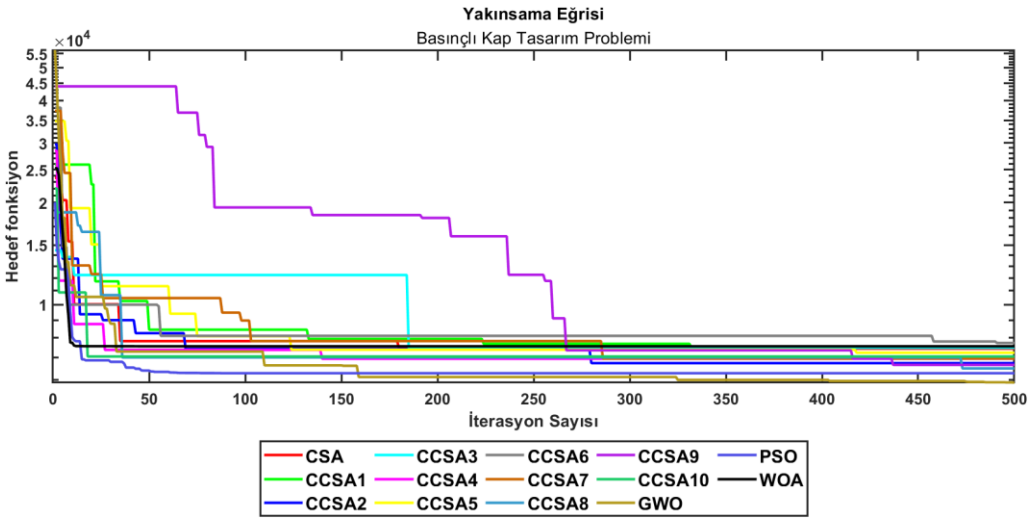
F23 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için 1. Boyuttaki yörünge analizi yapılmıştır. Yörünge analizine ait sonuçlar Şekil 4.140'ta verilmiştir. Kaotik hibrit algoritmalar yörüngeyi birbirinden farklı değerlerde yakalamışlardır.



Şekil 4.141. F23 Test Fonksiyonu Çeşitlilik Eğrisi

F23 test fonksiyonu hibrit modelleri kıyaslamak için çeşitlik analizi yapılmıştır. Çeşitlilik analizine ait sonuçlar Şekil 4.141'de verilmiştir. CCSA9 en yüksek çeşitlikle davranış göstermiştir.

4.2.24. Basınçlı Kap Tasarım Problemi

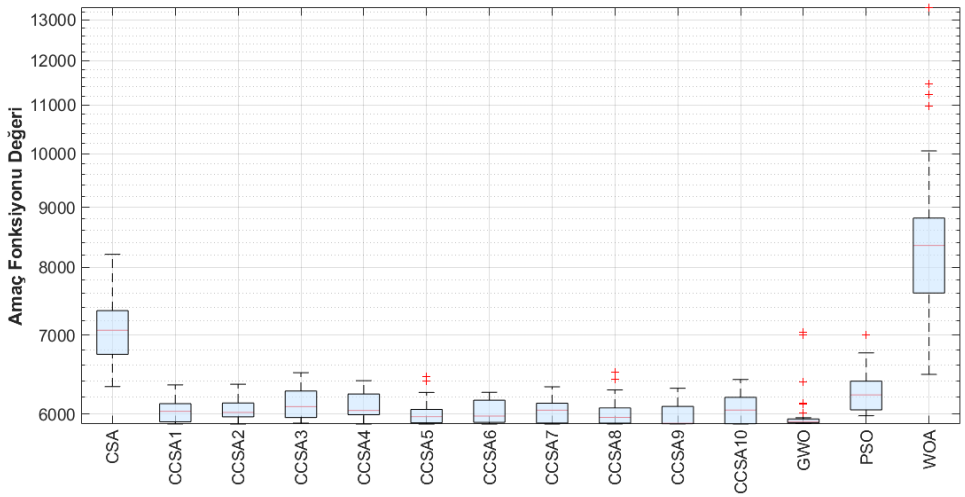


Şekil 4.142. Basınçlı Kap Tasarım Problemi Yakınsama Eğrisi

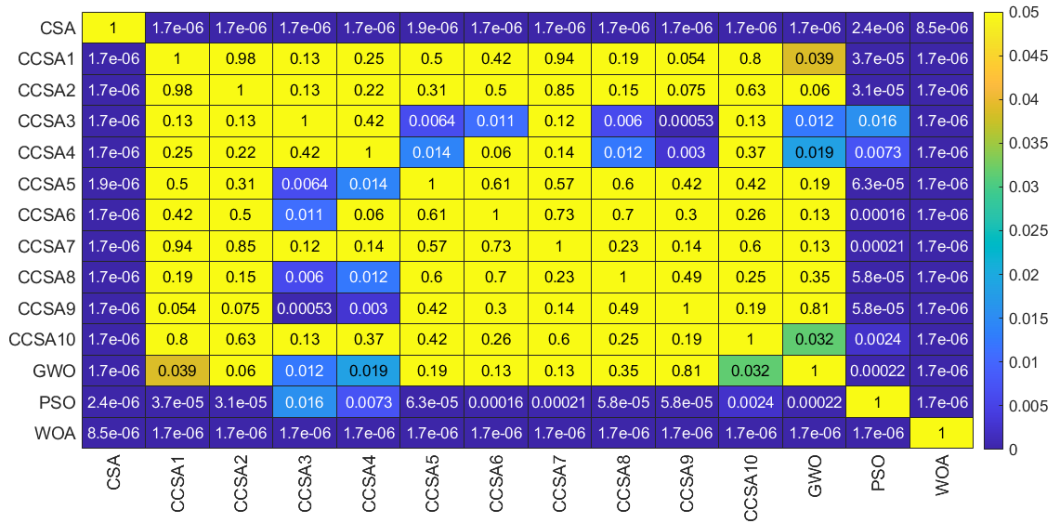
Çizelge 4.26. Basınçlı Kap Tasarım Problemi 30 çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	6330,58177	8206,96906	7071,17695	7069,69137	443,237824
CCSA1	5881,94818	6351,29705	6041,94983	6030,08955	143,543614
CCSA2	5881,41279	6358,70677	6043,32384	6016,7623	115,36515
CCSA3	5890,90889	6504,13091	6117,6348	6085,49386	185,435358
CCSA4	5881,78573	6403,38224	6091,45909	6040,81876	141,545876
CCSA5	5881,22641	6459,51245	6016,99205	5966,94725	153,389331
CCSA6	5881,71815	6258,63265	6017,92972	5973,60979	129,129829
CCSA7	5881,46404	6327,67306	6032,73656	6042,92379	127,96827
CCSA8	5882,50892	6512,99544	6009,28056	5958,61397	157,762423
CCSA9	5881,96334	6309,68246	5977,11795	5890,32193	131,708136
CCSA10	5881,2054	6418,6198	6055,3128	6044,54962	168,544913
GWO	5886,46233	7043,27755	6015,38239	5909,23291	292,387556
PSO	5977,66436	7000,82259	6274,29436	6227,22664	258,751483
WOA	6483,07619	13330,7965	8678,59986	8351,46801	1508,43671

Şekil 4.142'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Çizelge 4.26'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Çizelgedeki "En İyi" ve "Ortalama" değerlerin birbirine yakın olması ve CCSA varyasyonlarının diğerlerine göre daha hızlı düşük maliyetlere ulaşması, yakınsama eğrisinin hızlı bir düşüş gösterip kararlı bir noktada yatay seyrettiğini işaret eder. CCSA varyasyonlarının özellikle CCSA5 6016 ve CCSA9 5977 ortalama değerlerinin, klasik CSA 7071 ve WOA 8678 algoritmalarından çok daha düşük olduğu görülmektedir.



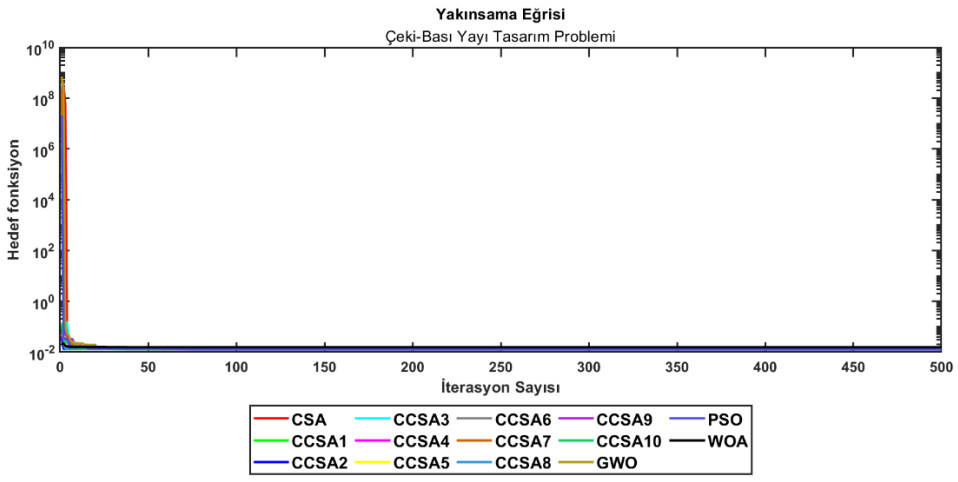
Şekil 4.143. Basınçlı Kap Tasarım Problemi Algoritmaların Performans Dağılımı



Şekil 4.144. Basınçlı Kap Tasarım Problemi Wilcoxon P değerleri

Algoritmaların performans dağılım grafikleri Şekil 4.143'te ve Wilcoxon p değerleri Şekil 4.144'tda verilmiştir. Standart sapma değerleri kutu grafiğinin genişliğini belirler. CCSA varyasyonlarının standart sapmaları yaklaşık 115-185 aralığında düşükken, CSA 443 ve özellikle WOA 1508 oldukça yüksektir. Bu, CCSA algoritmalarına ait kutu grafiklerinin daha dar ve sıkışık (daha tutarlı), diğerlerinin ise çok geniş ve dağınık olacağı anlamına gelir. Sonuçlar arasındaki bu belirgin farklar (CCSA'nın ortalamasının CSA'dan yaklaşık %15 daha iyi olması), Wilcoxon P değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir farka işaret ettiğini (muhtemelen $p < 0.05$) ve bu başarının tesadüfi olmadığını göstermektedir.

4.2.25. Çeki-Bası yayı tasarım problemi

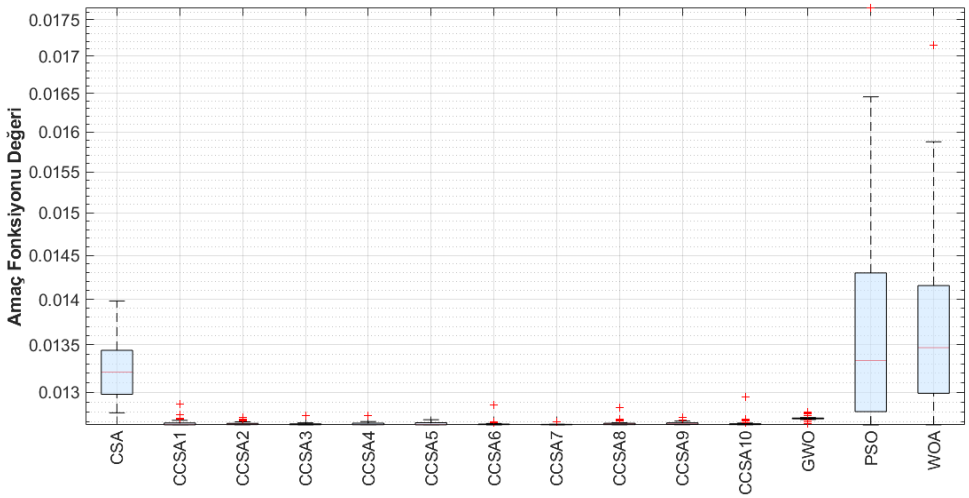


Şekil 4.145. Çeki-Bası yayı tasarım problemi yakınsama eğrisi

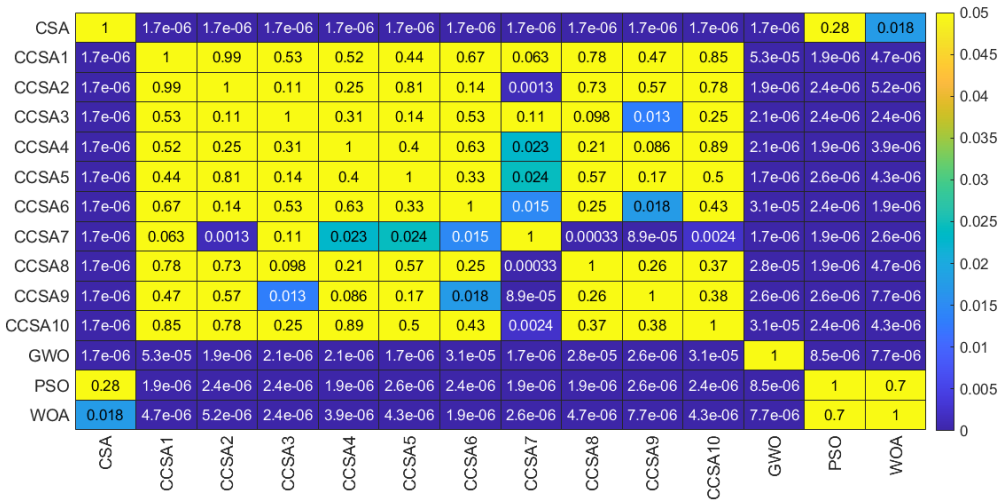
Çizelge 4.27. Çeki-Bası yayı tasarım problemi 30 çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	0,012788583	0,013981908	0,013259091	0,013211326	0,000316872
CCSA1	0,012665379	0,012877692	0,012687696	0,012670675	4,33261E-05
CCSA2	0,012666921	0,012738678	0,012680464	0,012672013	1,92976E-05
CCSA3	0,012665626	0,012759339	0,012674952	0,012669713	1,72514E-05
CCSA4	0,012665943	0,012763922	0,012677409	0,012668998	1,89606E-05
CCSA5	0,012665694	0,012718499	0,012678745	0,012670446	1,61169E-05
CCSA6	0,012665847	0,01286643	0,012679454	0,01267119	3,61285E-05
CCSA7	0,012665805	0,012696329	0,012669514	0,012667949	5,56149E-06
CCSA8	0,01266674	0,012841572	0,01268369	0,012672729	3,33128E-05
CCSA9	0,012667125	0,012741306	0,012682621	0,012677016	1,68664E-05
CCSA10	0,012666301	0,01295578	0,012686287	0,012671672	5,28075E-05
GWO	0,012681922	0,012798878	0,012734313	0,01273151	2,27368E-05
PSO	0,012665338	0,017671363	0,013731557	0,01333253	0,001217651
WOA	0,01266591	0,01714773	0,013795244	0,013471079	0,001112494

Şekil 4.145'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Çizelge 4.27'te 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Bu problemde hassasiyet çok önemlidir. CCSA varyasyonlarının tamamı 0,0126 seviyesinde ortalama değerler üretirken, standart sapmaları 10^{-5} mertebesindedir. Buna karşılık PSO ve WOA'nın standart sapmaları 0,001 seviyesinde daha yüksektir.



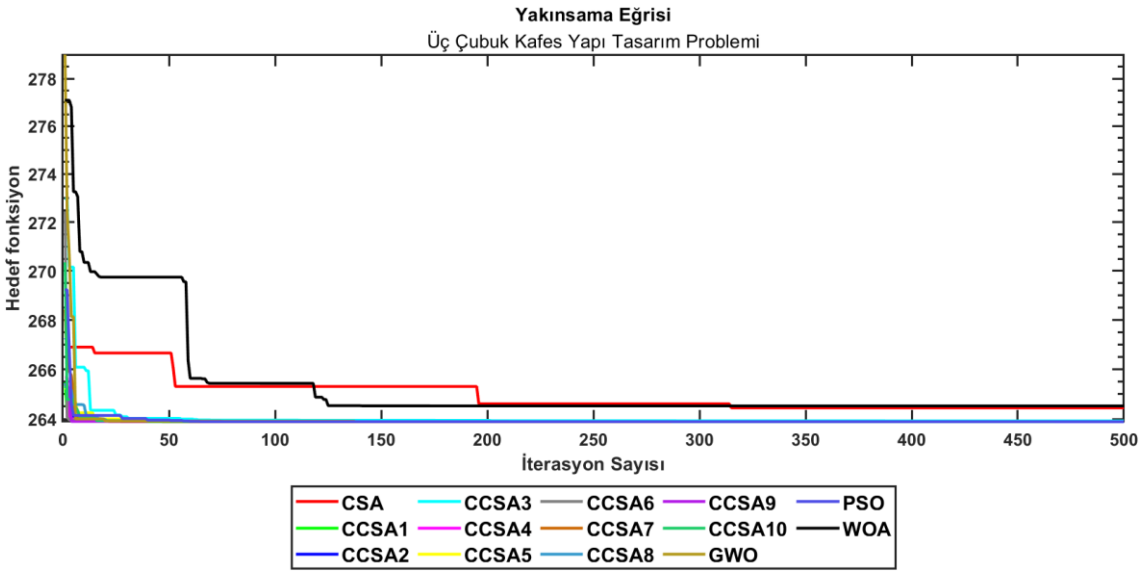
Şekil 4.146. Çeki-Bası yayı tasarım problemi Algoritmaların Performans Dağılımı



Şekil 4.147. Çeki-Bası yayı tasarım problemi Wilcoxon P değerleri

Algoritmaların performans dağılım grafikleri Şekil 4.146'da ve Wilcoxon p değerleri Şekil 4.147'de verilmiştir. CCSA varyasyonlarının kutu grafikleri neredeyse tek bir çizgi gibi görünecek kadar dar olacaktır. Buna karşın PSO ve WOA'nın grafikleri, daha geniş bir aralığa yayılan, üst ve alt çeyrekleri belirgin kutular şeklinde olacaktır. Standart sapmalar arasındaki bu farklılık, istatistiksel testlerde P değeri önerilen yöntemin kararlılığının diğer yöntemlere kıyasla kesin olarak üstün olduğunu kanıtlar niteliktedir.

4.2.25. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi

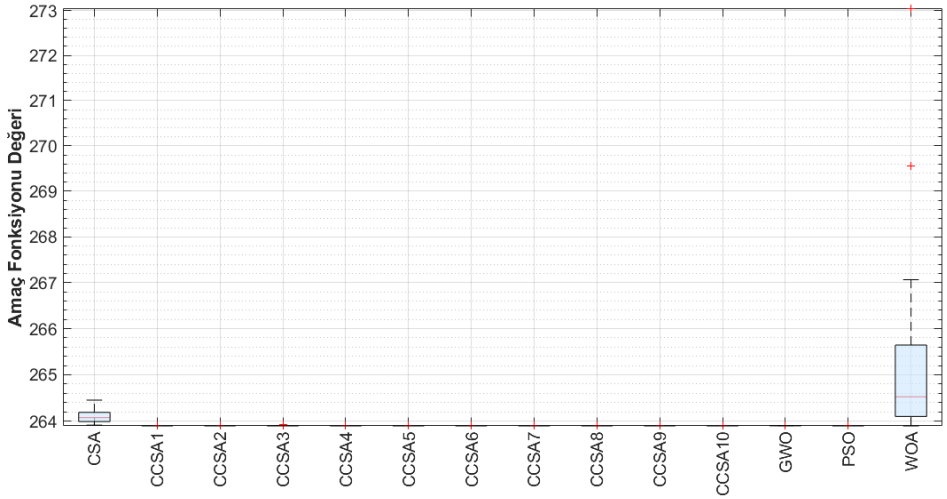


Şekil 4.148. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi yakınsama eğrisi

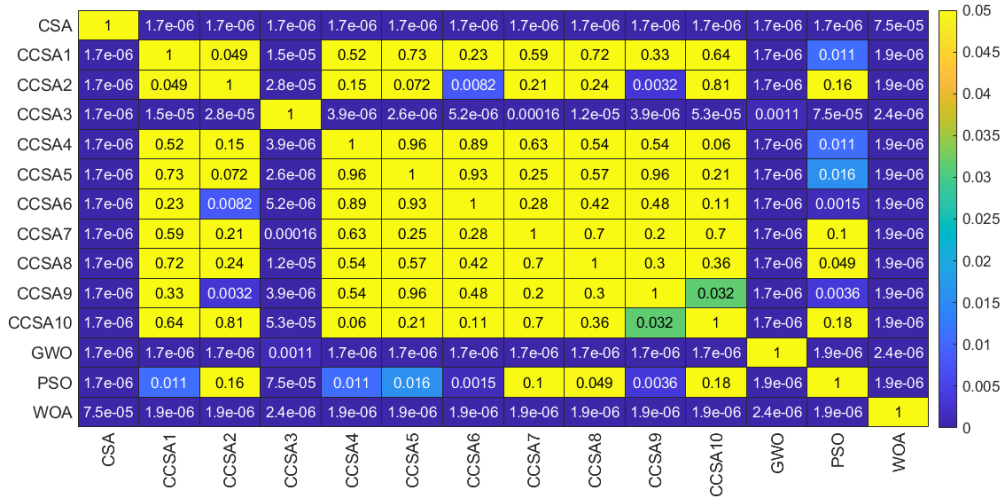
Çizelge 4.28. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi 30 çözüme ait sonuçlar

	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	263,912329	264,45112	264,103936	264,075658	0,146204957
CCSA1	263,895844	263,89679	263,89599	263,895885	0,000214128
CCSA2	263,895856	263,896753	263,896023	263,895949	0,00019844
CCSA3	263,895848	263,927017	263,898617	263,896842	0,005769034
CCSA4	263,895847	263,896511	263,895958	263,895879	0,000166914
CCSA5	263,895846	263,896527	263,895949	263,89588	0,000170251
CCSA6	263,895848	263,896481	263,89593	263,895885	0,000128405
CCSA7	263,895846	263,899553	263,896123	263,895913	0,000719567
CCSA8	263,89585	263,89637	263,89596	263,895905	0,000137248
CCSA9	263,895848	263,896115	263,895915	263,895895	6,28415E-05
CCSA10	263,895845	263,896608	263,896014	263,895928	0,000209342
GWO	263,89666	263,911619	263,90069	263,900226	0,003251271
PSO	263,895843	263,897398	263,896221	263,895965	0,000455927
WOA	263,895848	273,050109	265,157777	264,524802	1,907355199

Şekil 4.148'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Çizelge 4.28'de 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. CSA ve WOA'nın ortalama değerlerinin optimumdan sapması, yakınsama eğrilerinde yerel tuzaklara takılma veya geç yakınsama sorunları olabileceğini gösterir. Tüm algoritmalar birbirine yakın en iyi değerleri yaklaşık 263.89 bulmuş olsa da fark kararlılıkta ortaya çıkmaktadır. CSA'nın ortalama değeri 264.10 iken, CCSA varyasyonları 263.89 ortalamayı korumuştur. CSA ve WOA'nın ortalama değerlerinin optimumdan sapması, yakınsama eğrilerinde yerel tuzaklara takılma veya geç yakınsama sorunları olabileceğini gösterir.



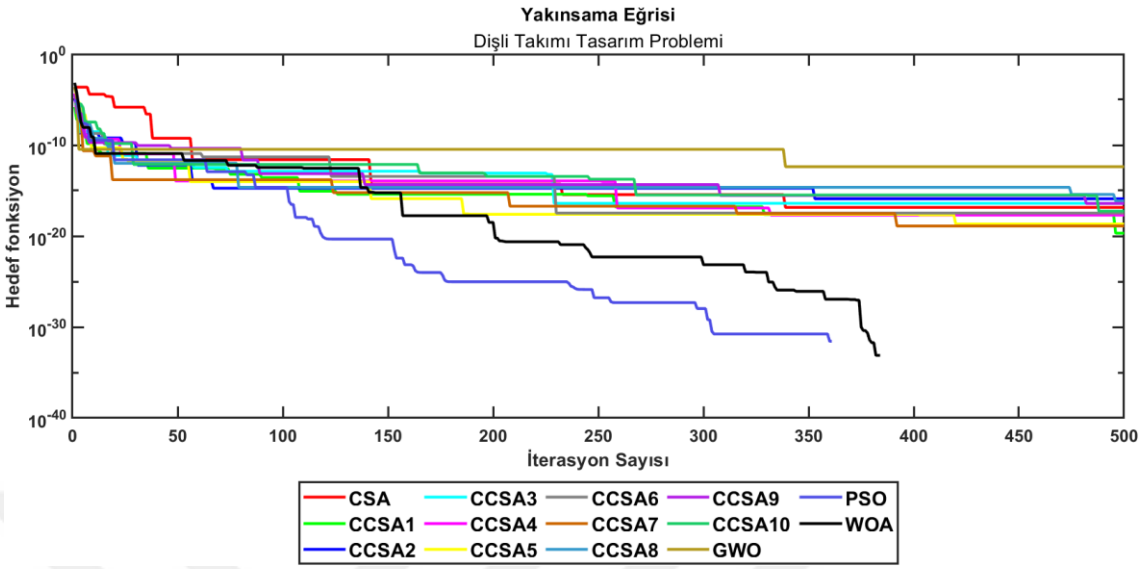
Şekil 4.149. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi Algoritmaların Performans Dağılımı



Şekil 4.150. Üç çubuk kafes yapı tasarım problemi Wilcoxon P değerleri

Algoritmaların performans dağılım grafikleri Şekil 4.149'da ve Wilcoxon p değerleri Şekil 4.150'de verilmiştir. CSA'nın standart sapması 0.146 iken, CCSA varyasyonlarınınki 0.0002 civarındadır. Kutu grafiğinde CSA geniş bir dağılım gösterirken, CCSA sonuçları çok sıkı bir kümeleme çok dar bir kutu sergileyecektir. Ortalama değerler çok yakın görünse de varyansın düşüklüğü (standart sapma farkı), P değeri analizinde CCSA lehine pozitif bir anlamlılık yaratacaktır.

4.2.26. Dişli Takımı Tasarım Problemi



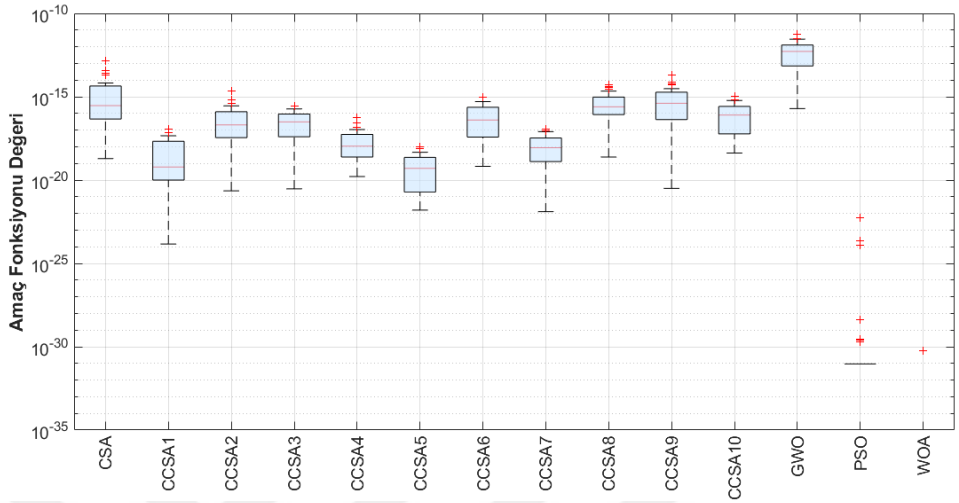
Şekil 4.151. Dişli Takımı Tasarım Problemi Yakınsama Eğrisi

Çizelge 4.29. Dişli Takımı Tasarım Problemi 30 çözüme ait sonuçlar

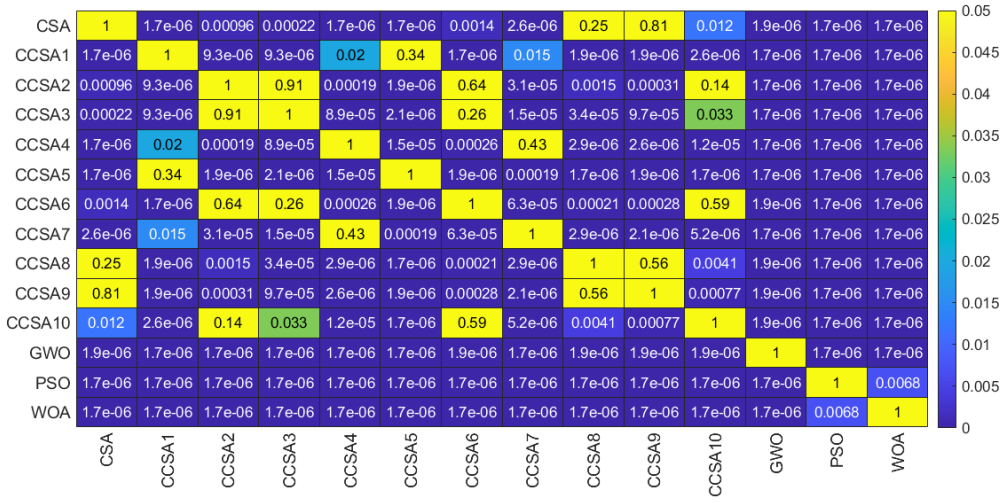
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	1,95049E-19	1,3517E-13	8,20619E-15	2,93272E-16	2,54375E-14
CCSA1	1,46102E-24	1,12135E-17	1,25619E-18	6,1274E-20	2,52101E-18
CCSA2	2,27432E-21	2,23882E-15	1,5593E-16	2,03961E-17	4,19616E-16
CCSA3	2,98644E-21	2,92862E-16	5,82209E-17	3,08303E-17	7,16457E-17
CCSA4	1,62173E-20	5,34046E-17	5,2766E-18	1,07925E-18	1,07551E-17
CCSA5	1,5729E-22	1,02261E-18	1,61769E-19	5,08523E-20	2,35855E-19
CCSA6	6,66638E-20	9,26917E-16	1,43587E-16	4,00709E-17	2,1097E-16
CCSA7	1,27139E-22	1,17426E-17	2,51796E-18	8,77335E-19	3,41169E-18
CCSA8	2,42761E-19	5,2661E-15	1,01736E-15	2,48738E-16	1,55507E-15
CCSA9	3,19233E-21	2,02577E-14	2,44661E-15	4,07769E-16	5,20031E-15
CCSA10	4,16956E-19	1,01819E-15	1,80093E-16	7,97159E-17	2,44013E-16
GWO	1,94317E-16	5,67402E-12	9,30721E-13	5,22366E-13	1,265E-12
PSO	0	5,70325E-23	2,01425E-24	0	1,0401E-23
WOA	0	5,61601E-31	1,872E-32	0	1,02534E-31

Şekil 4.151'de algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Çizelge 4.29'da 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri vermiştir. Tüm algoritmalar çok hızlı bir Şekilde 0 hatasına doğru inmektedir. PSO ve WOA'nın eğrileri muhtemelen en hızlı Şekilde taban değerine ulaşmaktadır. Bu problemde hata minimizasyonu hedeflenmiştir. PSO ve WOA algoritmaları 0 veya 10^{-31}

gibi değerlerle tam veya tama yakın sonuçlar bulmuştur. CCSA varyasyonları ise 10^{-18} mertebesinde sonuçlar üretmiştir. CSA ise 10^{-15} seviyesinde kalmıştır.



Şekil 4.152. Dişli Takımı Tasarım Problemi Algoritmaların Performans Dağılımı

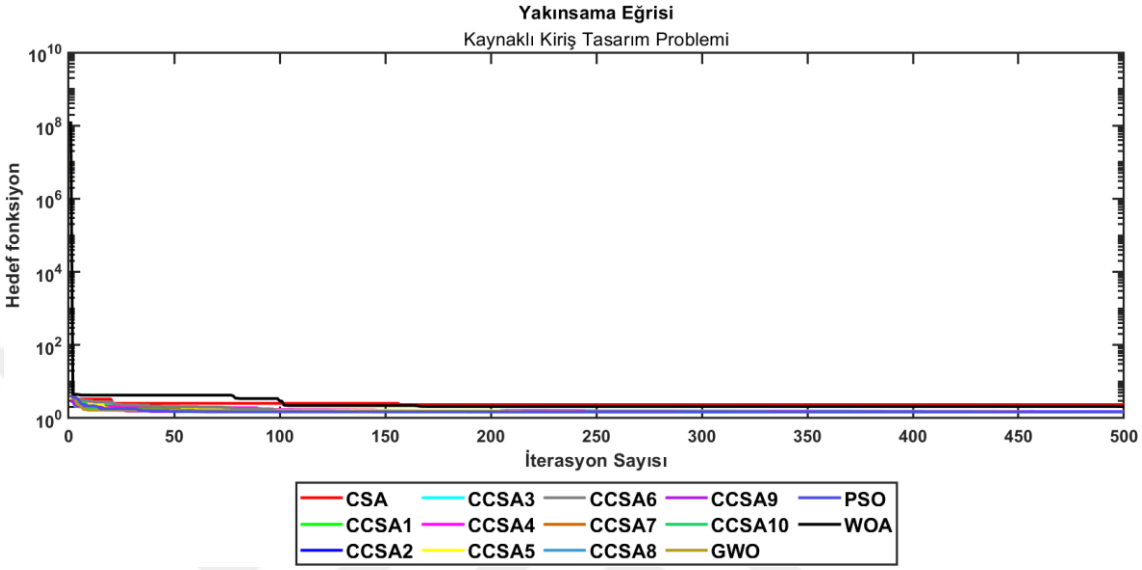


Şekil 4.153. Dişli Takımı Tasarım Problemi Wilcoxon P değerleri

Algoritmaların performans dağılım grafikleri Şekil 4.152'de ve Wilcoxon p değerleri Şekil 4.153'te verilmiştir. Değerler çok küçük sıfıra yakın olduğu için kutu grafikleri neredeyse eksen üzerinde görünecektir. Ancak CSA'nın kutusu, diğerlerine göre daha yukarıda (daha büyük hata bölgesinde) kalacaktır. Burada PSO ve WOA'nın sayısal başarısı yüksek görünse de CCSA'nın CSA'ya (temel algoritma) göre 1000 kat (10^{-15} ile

10^{-18}) daha iyi sonuç vermesi, P değerlerinde CCSA'nın CSA'ya karşı istatistiksel üstünlüğünü gösterecektir.

4.2.27. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi



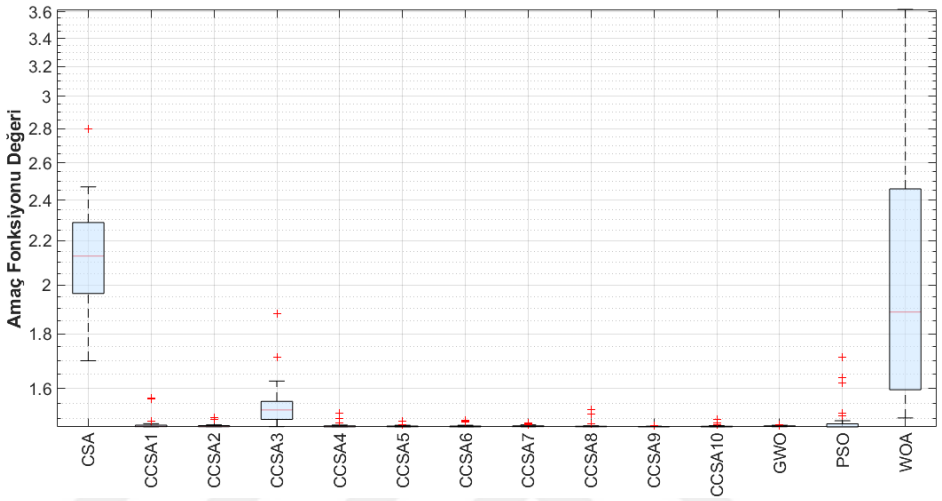
Şekil 4.154. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi yakınsama eğrisi

Çizelge 4.30. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi 30 çözüme ait sonuçlar

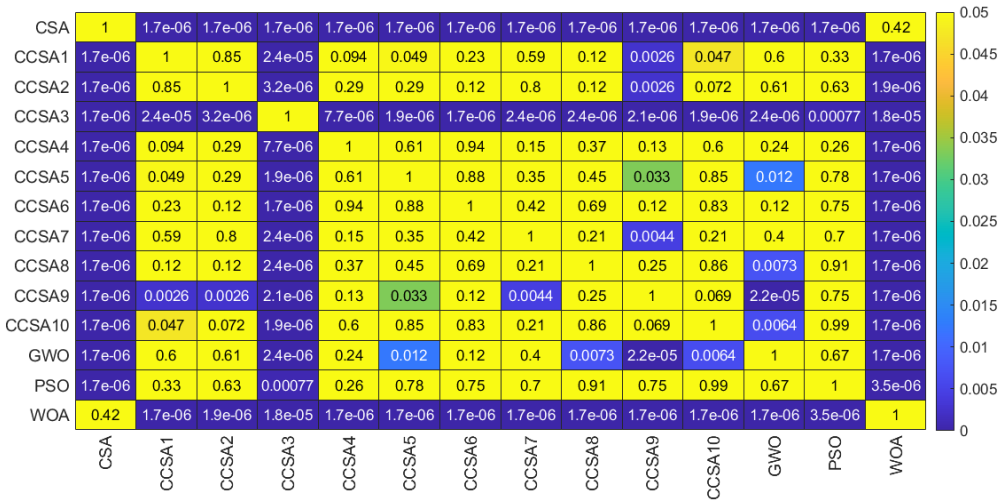
	En İyi Değer	En Kötü Değer	Ortalama Değer	Medyan	Standart Sapma
CSA	1,69865971	2,79745283	2,13553618	2,12809701	0,222506708
CCSA1	1,4733607	1,56747177	1,48242382	1,47486079	0,023044976
CCSA2	1,47327096	1,50197926	1,47693071	1,47531667	0,006263378
CCSA3	1,47400206	1,87931196	1,54561865	1,528064	0,081300873
CCSA4	1,47306197	1,51682015	1,47733121	1,47445925	0,009191888
CCSA5	1,47308135	1,49074456	1,47533603	1,47438348	0,003281632
CCSA6	1,47312428	1,4937195	1,47619647	1,4740144	0,005384856
CCSA7	1,47329581	1,48539132	1,47594811	1,47521713	0,002983042
CCSA8	1,47334882	1,52942422	1,47771744	1,47404454	0,012241464
CCSA9	1,47327742	1,47772445	1,47414808	1,47373383	0,001071785
CCSA10	1,47317074	1,49787838	1,47567582	1,47397695	0,004977831
GWO	1,47357858	1,48003235	1,4759628	1,47566452	0,001494073
PSO	1,47303617	1,71146051	1,49580004	1,47306209	0,056963773
WOA	1,50184876	3,61821699	2,11544117	1,88652781	0,618359476

Şekil 4.154'te algoritmalarının yakınsama eğrileri verilmiştir. Çizelge 4.30'da 30 çözüme ait en iyi değer, en kötü değer, ortalama değer, medyan ve standart sapma değerleri

vermiştir. CSA ve WOA eğrileri daha yüksek bir maliyet değerinde takılı kalırken erken yakınsama/yerel optimum, CCSA varyasyonlarının eğrileri daha aşağılara inerek global optimuma yaklaşmaktadır. En belirgin farkın görüldüğü problemlerden biridir. CSA 2.13 ve WOA 2.11 ortalama maliyetle çalışırken, CCSA varyasyonları maliyeti 1.47-1.48 seviyelerine çekmiştir.



Şekil 4.155. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi Algoritmaların Performans Dağılımı



Şekil 4.156. Kaynaklı Kiriş Tasarım Problemi Wilcoxon P değerleri

Algoritmaların performans dağılım grafikleri Şekil 4.155'te ve Wilcoxon p değerleri Şekil 4.156'da verilmiştir. CSA ve WOA'nın standart sapmaları 0,22 ve 0,61 oldukça yüksektir, bu da kutu grafiklerinin dikey eksende çok uzun olacağını gösterir. CCSA varyasyonlarının kutuları ise standart sapma yaklaşık 0,005 çok daha kısa ve kompakt

olacaktır. Ortalamalar arasındaki bu büyük fark 1,47 ve 2,13, P değerlerinin kesinlikle 0,05'ten çok küçük anlamlı çıkmasına neden olacaktır. Bu, geliştirilen yöntemin bu problemde tartışmasız üstün olduğunu kanıtlar.

4.3. Çarpışma kutuları test ve analizleri

Çarpışma kutusuna ait üç model PLA ve ABS malzeme kullanarak üç tekrar olacak şekilde basma testi uygulanmıştır. Basma testleri 100 kN kapasiteli UTEST marka cihazla 5mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir.

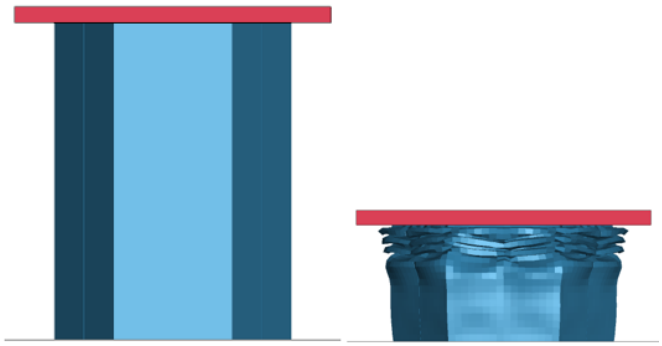


Şekil 4.157. PLA Basma Testi



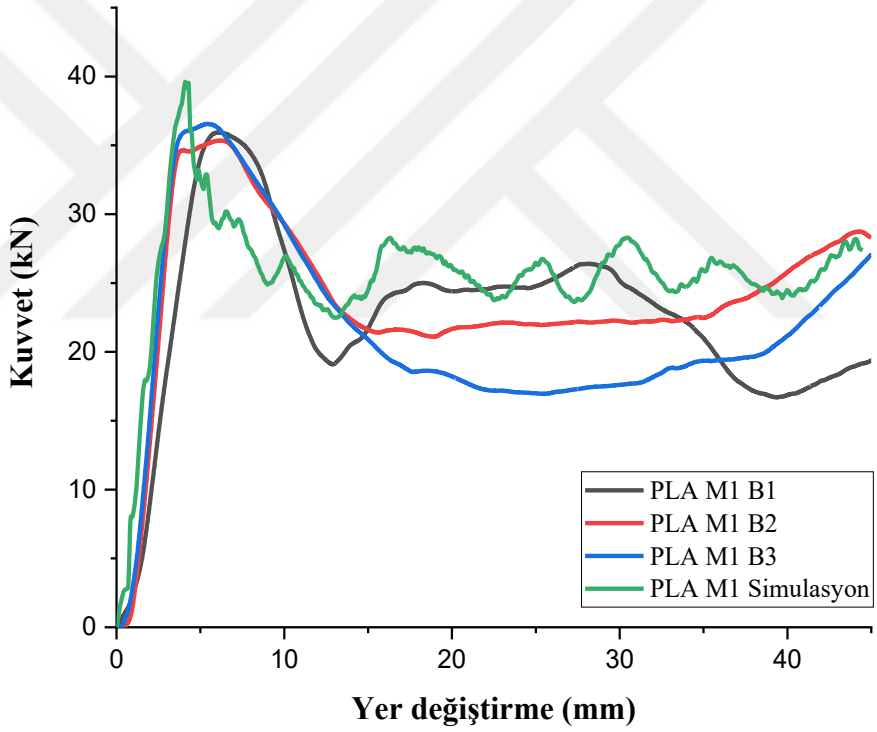
Şekil 4.158. ABS Basma Testi

Şekil 4.156'de PLA modeline ait basma testi verilmiştir. Şekil 4.158'de ABS malzemeye ait basma testi verilmiştir.



Şekil 4.159. Basma testi simülasyonu

Şekil 4.159'da basma testi simülasyonu LS-Dyna modeli verilmiştir.



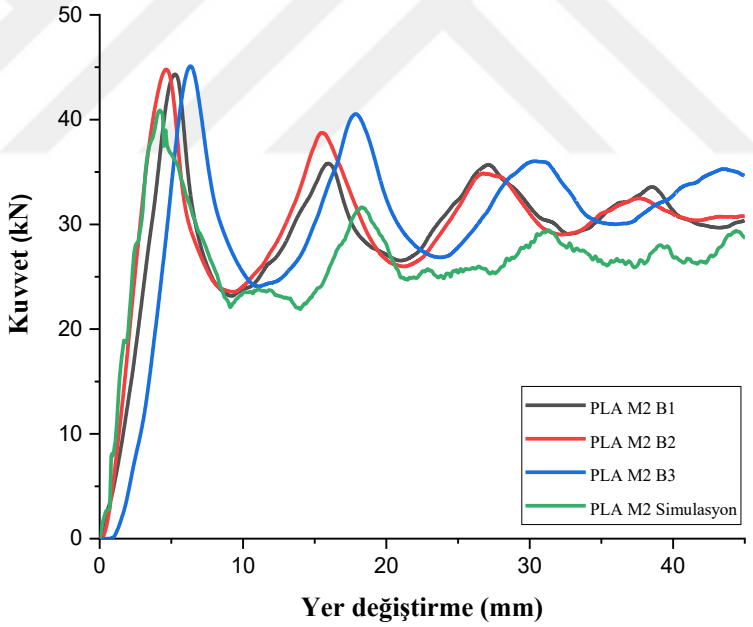
Şekil 4.160. PLA Model 1 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

Şekil 4.160'ta PLA model 1'e ait basma testi ve simülasyona ait sonuçların kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çizelge 4.31'te basma testine ait sonuçlar verilmiştir. Çizelge 4.31'deki sonuçlar incelendiğinde, deneysel veriler ile simülasyon modeli arasında genel bir tutarlılık olduğu, ancak simülasyonun sistematik bir sapma gösterdiği görülmektedir. Üretilen üç numunenin kütlelerinin birebir aynı olması testlerin yakın

olduğunu kanıtlarken; simülasyon sonuçları, deneysel ortalamaya kıyasla kuvvet (Maksimum ve Ortalama) değerlerinde yaklaşık %10,2, enerji sönümleme (SEA) kapasitesinde ise yaklaşık %9 oranında daha yüksek çıkmıştır. Özetle, simülasyon modeli malzemenin geometrik davranışını çok yüksek doğrulukla tahmin ederken, dayanım verilerini istatistiksel olarak gerçeğinden yaklaşık %10 daha iyimser hesaplamıştır.

Çizelge 4.31. PLA M1 Basma testi sonuçları

	PLA M1 B1	PLA M1 B2	PLA M1 B3	PLA M1 Ortalama	PLA M1 Sim	% değişim
Kütle (kg)	0,0773827	0,0773827	0,0773827	0,0773827	0,0773827	
Maksimum Kuvvet (kN)	35,929	35,35	36,558	35,9456666	39,6126171	10,20137
Ortalama Kuvvet (kN)	22,6277929	24,0297139	21,6019272	22,7531447	25,0836392	10,24252
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,009	45,009	45,009	45,009	44,48551	-1,16308
Enerji Sönümleme (kJ)	1,01845433	1,08155339	0,97228114	1,02409629	1,11585843	8,960304
SEA (kj/kg)	13,1612664	13,9766820	12,5645802	13,2341762	14,41999872	8,960304



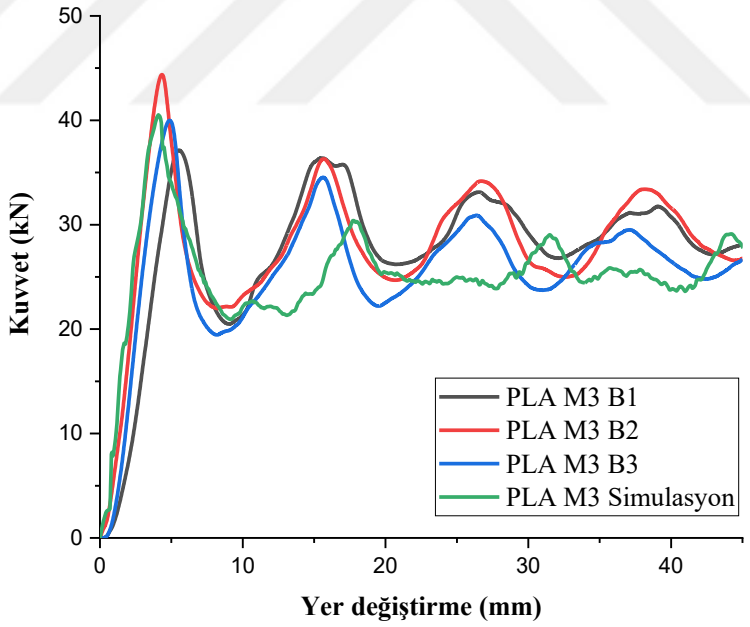
Şekil 4.161. PLA Model 2 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

Şekil 4.161'de PLA model 2'ye ait basma testi ve simülasyona ait sonuçların kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çizelge 4.32'de basma testine ait sonuçlar verilmiştir. Çizelge 4.32'deki sonuçlar incelendiğinde, deneysel veriler ile simülasyon modeli arasında genel bir tutarlılık olduğu, ancak simülasyonun sistematik bir sapma gösterdiği

görülmektedir. Üretilen üç numunenin kütlelerinin birebir aynı olması testlerin yakın olduğunu kanıtlarken; simülasyon sonuçları, deneysel ortalamaya kıyasla kuvvet (Maksimum ve Ortalama) değerlerinde yaklaşık %8,6, enerji sönümleme (SEA) kapasitesinde ise yaklaşık %12 oranında daha yüksek çıkmıştır. Özetle, simülasyon modeli malzemenin geometrik davranışını çok yüksek doğrulukla tahmin ederken, dayanım verilerini istatistiksel olarak gerçeğinden yaklaşık %10 daha iyimser hesaplamıştır.

Çizelge 4.32. PLA Model 2 Basma testi sonuçları

	PLA M2 B1	PLA M2 B2	PLA M2 B3	PLA M2 Ortalama	PLA M2 Sim	% Değişim
Kütle (kg)	0,077547	0,0775472	0,0775472	0,0775472	0,0775472	
Maksimum Kuvvet (kN)	44,325	44,797	45,11	44,744	40,88148828	-8,632469
Ortalama Kuvvet (kN)	29,20184	29,743327	29,618588	29,521345	25,9165166	-12,21092
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,01	45,001	45,001	45,004	45,0868	0,1840591
Enerji Sönümleme (kJ)	1,314375	1,33834471	1,33301326	1,328577652	1,168493681	-12,04927
SEA (kj/kg)	16,94935	17,2584530	17,1897021	17,13250319	15,06816082	-12,04927



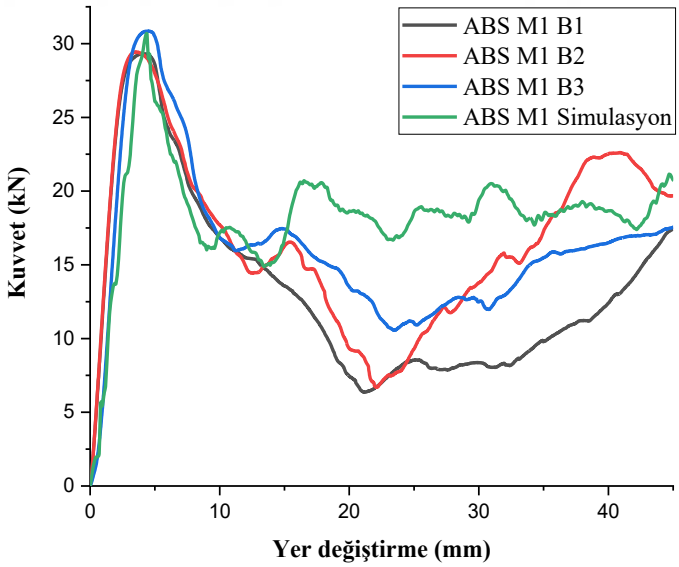
Şekil 4.162. PLA Model 3 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

Şekil 4.162'de PLA model 3'e ait basma testi ve simülasyona ait sonuçların kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çizelge 4.33'te basma testine ait sonuçlar verilmiştir. Çizelge 4.33'teki sonuçlar incelendiğinde, deneysel veriler ile simülasyon modeli

arasında genel bir tutarlılık olduğu, ancak simülasyonun sistematik bir sapma gösterdiği görülmektedir. Üretilen üç numunenin kütlelerinin birebir aynı olması testlerin yakın olduğunu kanıtlarken; simülasyon sonuçları, deneysel ortalamaya kıyasla kuvvet (Maksimum ve Ortalama) değerlerinde yaklaşık %8,5, enerji sönümleme (SEA) kapasitesinde ise yaklaşık %8,3 oranında daha yüksek çıkmıştır. Özetle, simülasyon modeli malzemenin geometrik davranışını çok yüksek doğrulukla tahmin ederken, dayanım verilerini istatistiksel olarak gerçeğinden yaklaşık %10 daha iyimser hesaplamıştır.

Çizelge 4.33. PLA Model 3 basma testi sonuçları

	PLA M3 B1	PLA M3 B2	PLA M3 B3	PLA M3 Ortalama	PLA M3 Simülasyon	% Değişim
Kütle (kg)	0,0783707	0,0783707	0,0783707	0,0783707	0,0783707	
Maksimum Kuvvet (kN)	37,14	44,375	39,979	40,498	40,5205078	0,071734
Ortalama Kuvvet (kN)	27,430898	27,920472	25,564336	26,97190244	24,6716462	-8,52834
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,01	45,004	45,004	45,006	45,0859260	0,17759
Enerji Sönümleme (kJ)	1,2346647	1,2565329	1,1504973	1,213898359	1,11234401	-8,36597
SEA (kj/kg)	15,754162	16,033197	14,680198	15,48918613	14,1933658	-8,36597



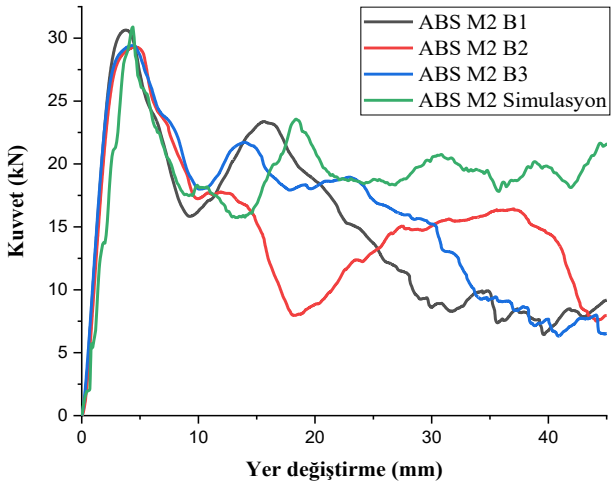
Şekil 4.163. ABS Model 1 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

Şekil 4.163'te ABS model 1'e ait basma testi ve simülasyona ait sonuçların kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çizelge 4.34'te basma testine ait sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.34'teki ABS Model sonuçlarına bakıldığında, ilk kırılmanın yaşandığı 10 mm deformasyona kadar benzer eğrilerle gitmiştir. Kırılmadan sonra modeller farklı davranışlar sergilemişlerdir. Simülasyonun maksimum maksimum kuvvet %2,77 fark tahminleri deneysel verilerle oldukça yüksek bir tutarlılık göstermektedir. Ancak deformasyon süreci boyunca etki eden ortalama kuvvet incelendiğinde simülasyonun %17,99 oranında, enerji sönümleme (SEA) değerlerinde ise %18,07 oranında daha yüksek sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. Bu istatistiksel sapma, ABS malzemesinin plastik deformasyon davranışının simülasyonda tepe kuvveti kadar hassas yakalanamadığını ve enerji kapasitesinin sanal ortamda olduğundan daha yüksek öngörüldüğünü göstermektedir.

Çizelge 4.34. ABS Model 1 Basma testi sonuçları

	ABS M1 B1	ABS M1 B2	ABS M1 B3	ABS M1 Ortalama	ABS M1 Simülasyon	% Değişim
Kütle (kg)	0,0643824	0,0643824	0,0643824	0,0643824	0,0643824	
Maksimum Kuvvet (kN)	29,317	29,434	30,844	29,865	30,69269727	2,771462
Ortalama Kuvvet (kN)	13,2280827	16,6672567	16,1508733	15,3487376	18,11073392	17,99494
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,007	45,007	45,007	45,007	45,036106111	0,06467
Enerji Sönümleme (kJ)	0,59535632	0,75014322	0,72690235	0,69080063	0,815636934	18,07125
SEA (kj/kg)	9,24719053	11,6513709	11,2903892	10,7296502	12,66863202	18,07125

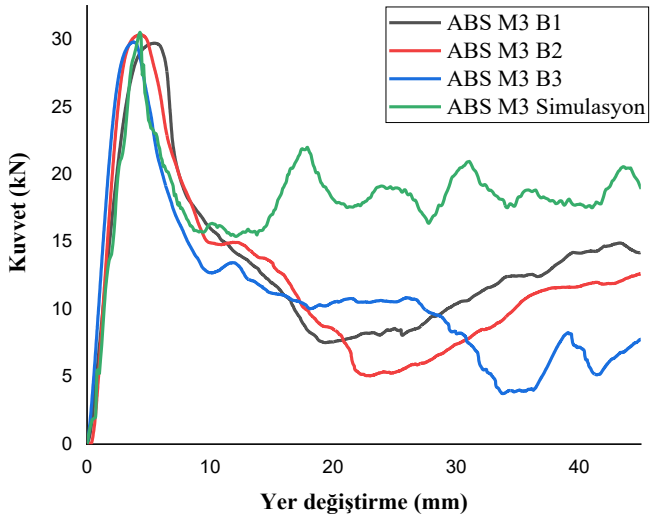


Şekil 4.164. ABS Model 2 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

Şekil 4.164'te ABS model 2'ye ait basma testi ve simülasyona ait sonuçların kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çizelge 4.35'te basma testine ait sonuçlar verilmiştir. Çizelge 4.35'teki ABS Model sonuçlarına bakıldığında, ilk kırılmanın yaşandığı 10 mm deformasyona kadar benzer eğrilerle gitmiştir. Kırılmadan sonra modeller farklı davranışlar sergilemişlerdir. Simülasyonun maksimum maksimum kuvvet %3,72 fark tahminleri deneysel verilerle oldukça yüksek bir tutarlılık göstermektedir. Ancak deformasyon süreci boyunca etki eden ortalama kuvvet incelendiğinde simülasyonun %22 oranında, enerji sönümleme (SEA) değerlerinde ise %22 oranında daha yüksek sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. Bu istatistiksel sapma, ABS malzemesinin plastik deformasyon davranışının simülasyonda tepe kuvveti kadar hassas yakalanamadığını ve enerji kapasitesinin sanal ortamda olduğundan daha yüksek öngörüldüğünü göstermektedir.

Çizelge 4.35. ABS Model 2 Basma Testi sonuçları

	ABS M2 B1	ABS M2 B2	ABS M2 B3	ABS M2 Ort	ABS M2 Sim	% Değişim
Kütle (kg)	0,0645193	0,0645193	0,0645193	0,0645193	0,0645193	0
Maksimum Kuvvet (kN)	30,646	29,293	29,411	29,7833333	30,89195117	3,722276
Ortalama Kuvvet (kN)	14,9652911	15,2754798	16,1032316	15,4480008	18,8310534	21,89961
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,011	45,029	45,002	45,014	45,036491399	0,049965
Enerji Sönümleme (kJ)	0,67360271	0,68783958	0,72467763	0,69537331	0,848084574	21,96105
SEA (kj/kg)	10,440329	10,6609895	11,2319512	10,7777565	13,14466484	21,96105



Şekil 4.165. ABS Model 3 Basma Testi Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

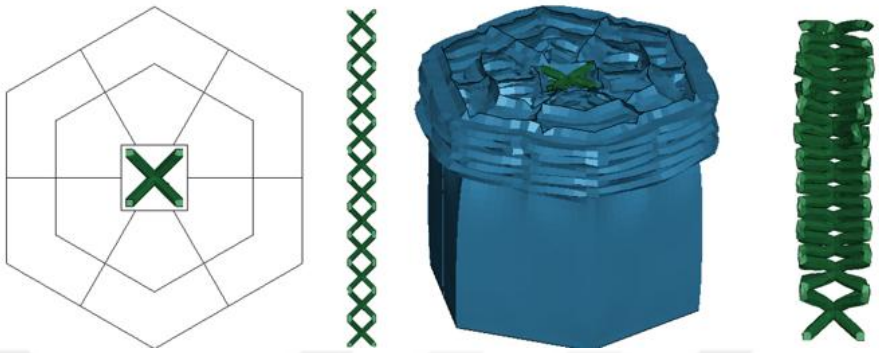
Şekil 4.165'te ABS model 3'ye ait basma testi ve simülasyona ait sonuçların kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çizelge 4.36'da basma testine ait sonuçlar verilmiştir. Çizelge 4.35'teki ABS Model sonuçlarına bakıldığında, ilk kırılmanın yaşandığı 10 mm deformasyona kadar benzer eğrilerle gitmiştir. Kırılmadan sonra modeller farklı davranışlar sergilemişlerdir. Simülasyonun maksimum maksimum kuvvet %1,22 fark tahminleri deneysel verilerle oldukça yüksek bir tutarlılık göstermektedir. Ancak deformasyon süreci boyunca etki eden ortalama kuvvet incelendiğinde simülasyonun %47 oranında, enerji sönümleme (SEA) değerlerinde ise %47 oranında daha yüksek sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. Bu istatistiksel sapma, ABS malzemesinin plastik deformasyon davranışının simülasyonda tepe kuvveti kadar hassas yakalanamadığını ve enerji kapasitesinin sanal ortamda olduğundan daha yüksek öngörüldüğünü göstermektedir.

Çizelge 4.36. ABS M3 basma testi sonuçları

	ABS M3 B1	ABS M3 B2	ABS M3 B3	ABS M3 Ort	ABS M3 Sim	% Değişim
Kütle (kg)	0,0652044	0,065204	0,0652044	0,0652044	0,065204	0
Maksimum Kuvvet (kN)	29,731	30,351	29,804	29,962	30,53739	1,920414
Ortalama Kuvvet (kN)	13,319212	12,19645	11,0888343	12,2015001	17,91445	46,82174
Maksimum Yer değiştirme (mm)	44,985	44,996	44,989	44,99	45,03602	0,102294
Enerji Sönümleme (kJ)	0,5991648	0,548792	0,49887556	0,54894399	0,806796	46,97233
SEA (kj/kg)	9,1890236	8,416482	7,65094942	8,41881821	12,37333	46,97233

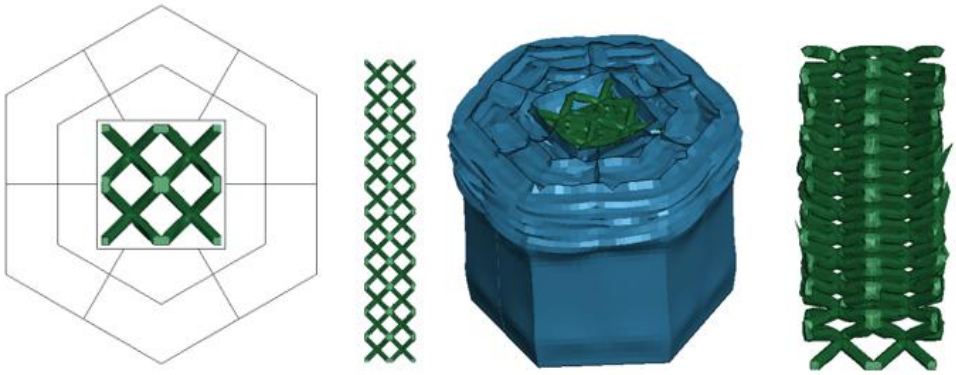
4.4. Kafes Yapılı Tasarım

Şekil 4.166'da kafes yapılı tasarım 1'e ait modelleme ve simülasyon sonucu verilmiştir.



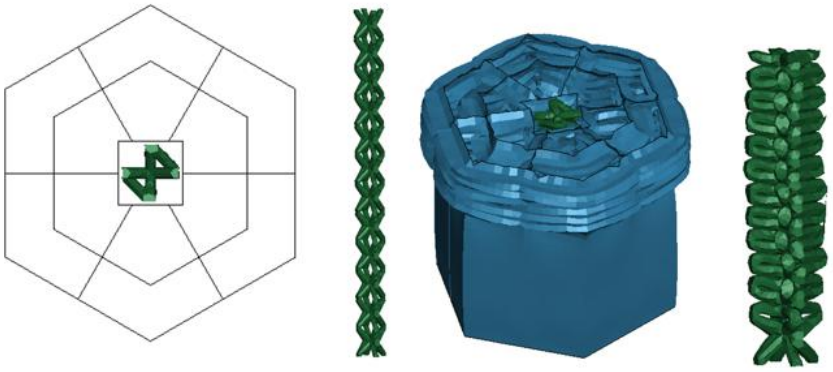
Şekil 4.166. Kafes yapılı tasarım 1

Şekil 4.167'de kafes yapılı tasarım 2'ye ait modelleme ve simülasyon sonucu verilmiştir.



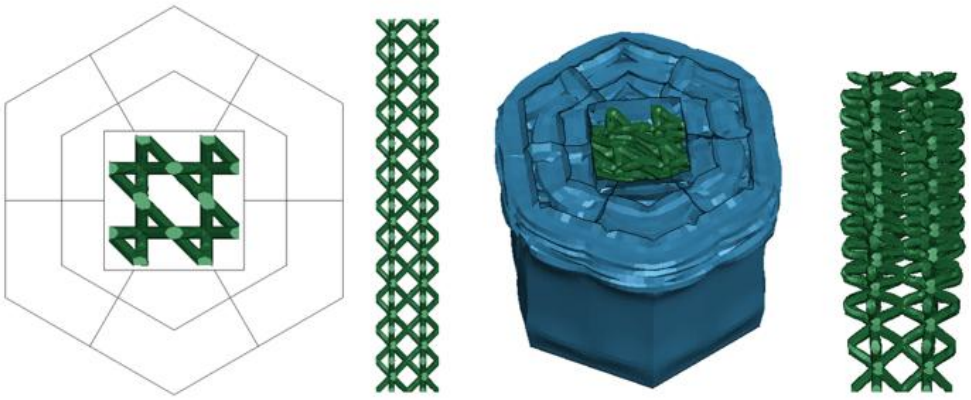
Şekil 4.167. Kafes yapılı tasarım 2

Şekil 4.168'de kafes yapılı tasarım 3'e ait modelleme ve simülasyon sonucu verilmiştir.



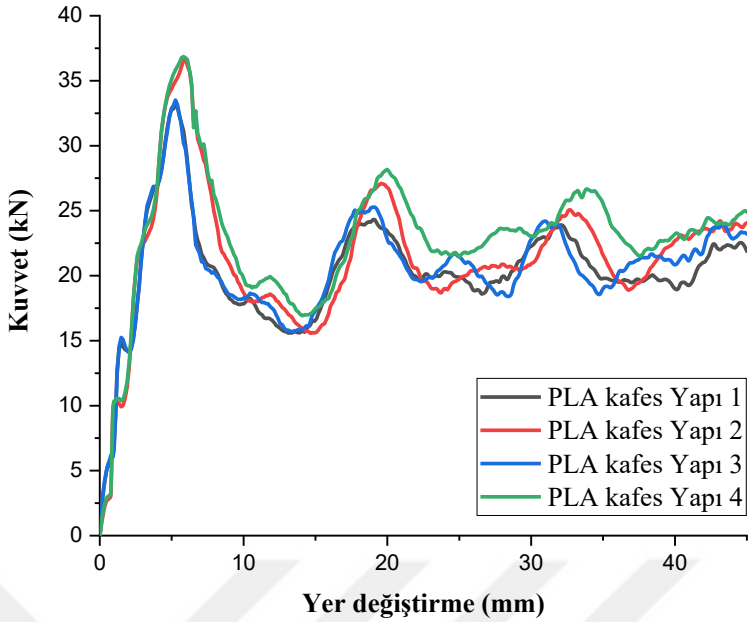
Şekil 4.168. Kafes yapılı tasarım 3

Şekil 4.169'da kafes yapılı tasarım 4'e ait modelleme ve simülasyon sonucu verilmiştir.



Şekil 4.169. Kafes yapılı tasarım 4

Şekil 4.170'te PLA kafes yapılı tasarımlara ait simülasyonda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.170. PLA kafes yapılı tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.37'de kafes yapılar modellere dahil edilmeden analizler gerçekleştirilmiş ve kafes yapılı tasarımlarla kıyaslanmıştır. Çizelge 4.38'de simülasyon sonuçları verilmiştir. En yüksek enerji sönümle M4'te görülmüştür. M4 modeli boş yapılı modellere göre daha yüksek enerji sönümlemesi göstermiştir.

Çizelge 4.37. PLA kafes yapısız tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği

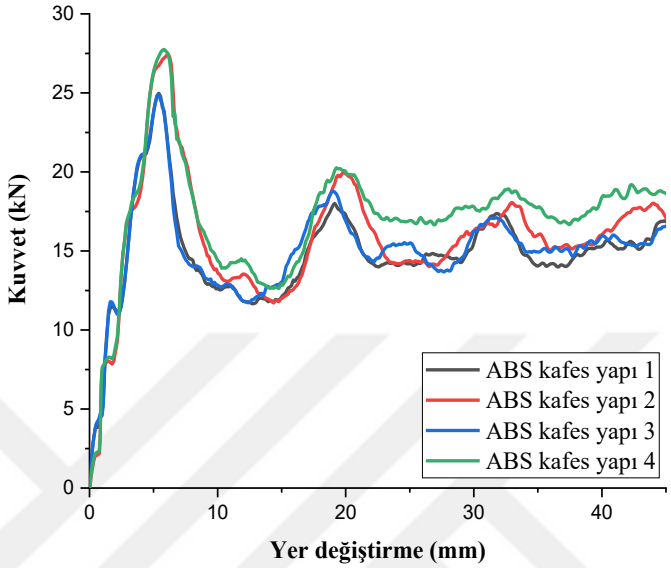
	PLA E1	PLA E2
Kütle (kg)	0,069574	0,07061
Maksimum Kuvvet (kN)	33,32579	36,36317
Ortalama Kuvvet (kN)	20,02301	20,13338
Maksimum Yer değiştirme (mm)	44,99807	44,99842
Enerji Sönümleme (kJ)	0,900997	0,90597
SEA (kj/kg)	12,95019	12,83062

Çizelge 4.38. PLA kafes yapılı tasarım simülasyon sonuçları

	PLA M1	PLA M2	PLA M3	PLA M4
Kütle (kg)	0,071105	0,07672	0,071549	0,078613
Maksimum Kuvvet (kN)	33,24379	36,69163	33,51659	36,85847
Ortalama Kuvvet (kN)	19,97262	21,05133	20,35491	22,4769
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,06775	45,06775	45,06777	45,06776
Enerji Sönümleme (kJ)	0,900121	0,948736	0,917351	1,012983

SEA (kj/kg)	12,6591	12,36621	12,82123	12,88564

Şekil 4.171'de ABS kafes yapılı tasarımlara ait simülasyonda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.171. ABS kafes yapılı tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.39'da simülasyon sonuçları verilmiştir. En yüksek enerji sönümle M4'te görülmüştür.

Çizelge 4.39. ABS kafes yapısız tasarım kuvvet-yer değiştirme grafiği

	ABS E1	ABS E2
Kütle (kg)	0,057886	0,058747
Maksimum Kuvvet (kN)	25,5469	27,2253
Ortalama Kuvvet (kN)	14,30455	14,47962
Maksimum Yer değiştirme (mm)	44,99902	44,99965
Enerji Sönümleme (kJ)	0,643691	0,651578
SEA (kj/kg)	11,12007	11,09118

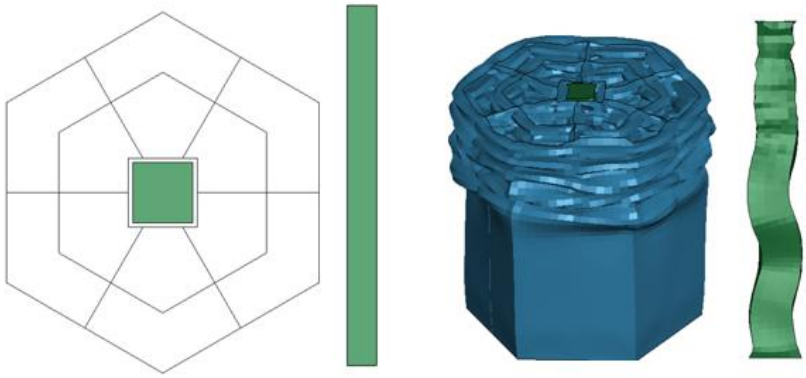
Çizelge 4.40. ABS kafes yapı sonuçları

	ABS M1	ABS M2	ABS M3	ABS M4
Kütle (kg)	0,059159	0,063831	0,059529	0,065407
Maksimum Kuvvet (kN)	24,97404	27,49187	24,89655	27,74762
Ortalama Kuvvet (kN)	14,51946	15,54156	14,81183	16,72093
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,06778	45,06774	45,06775	45,06776

Enerji Sönümleme (kJ)	0,65436	0,700423	0,667536	0,753575
SEA (kj/kg)	11,06103	10,97311	11,21358	11,5214

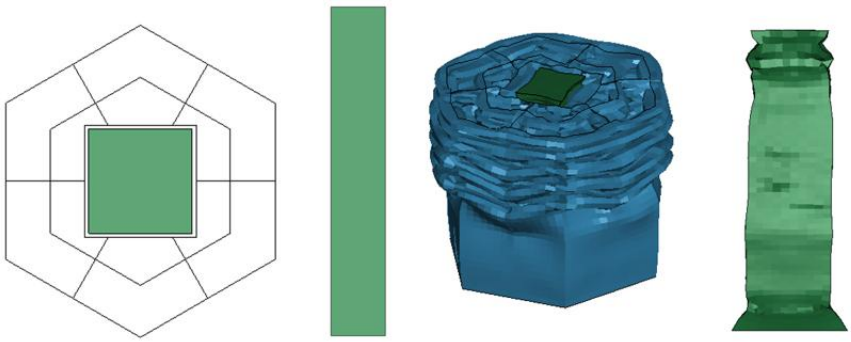
4.5. Köpük Modelleri

Şekil 4.172'de köpük model 1'e ait modelleme ve simülasyon sonucu verilmiştir.



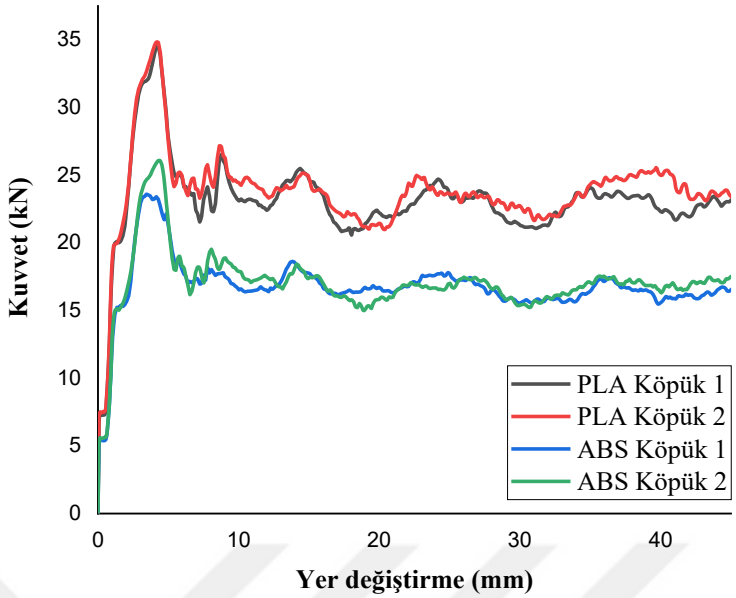
Şekil 4.172. Köpük model 1

Şekil 4.173'te köpük model 2'ye ait modelleme ve simülasyon sonucu verilmiştir.



Şekil 4.173. Köpük model 2

Şekil 4.174'te PLA ve ABS malzemeli köpük modellere ait simülasyonda elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.174. Köpük model PLA ve ABS kuvvet-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.41'de PLA ve ABS malzemeli köpük dolgulu modellere ait simülasyon sonuçları verilmiştir en yüksek enerji sönümleme pla m1'de elde edilmiştir.

Çizelge 4.41. Köpük model PLA ve ABS simülasyon sonuçları

	PLA Köpük 1	PLA Köpük 2	ABS Köpük 1	ABS Köpük 2
Kütle (kg)	0,070446	0,074098	0,058758	0,062235
Maksimum Kuvvet (kN)	34,58314	34,84618	23,60118	26,08905
Ortalama Kuvvet (kN)	22,81033	23,45217	16,54137	16,79472
Maksimum Yer değiştirme (mm)	45,06927	45,06847	45,06787	45,04647
Enerji Sönümleme (kJ)	1,028045	1,056954	0,745484	0,756543
SEA (kj/kg)	14,59337	14,26427	12,68747	12,15615

4.6. Çarpışma Kutularının Optimizasyonu

Çarpışma kutularının optimizasyonu gerçekleştirmek için testler sonucunda iyi performans veren ve sonlu elemanlar analizinde en yüksek yakınsamaların alındığı PLA malzemesi kullanılan modeller seçilmiştir. Optimizasyon işlemleri için çarpışma kutusuna ait bölüm 3.2'de verilen tasarım değişkenlerinin alt ve üst limit limitleri kullanılarak 80 adet vekil model içeren veri kümesi oluşturulmuştur. Vekil modeller kullanılarak MATLAB-Regression Learner uygulamasında amaç ve kısıt fonksiyonları

oluşturulmuştur. Oluşturulan amaç kısıt fonksiyonları optimizasyon algoritmalarında kullanılmıştır.

4.6.1. İncir Model 1 Optimizasyon

Çizelge 4.42 İncir Model 1 için veri kümesi verilmiştir. Veri kümesinde 80 adet farklı değişken takımına ait maksimum kuvvet (kN), ortalama kuvvet (kN), enerji sönümleme (kJ) ve kütle (kg) değerleri Ls-Dyna ile sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuştur.

Çizelge 4.42. İncir Model 1 Veri Kümesi

S.No	T1	T2	T3	T4	Mak. Kuv	Ort. Kuv	Yer.Değ	Enerji Sön.	Kütle
1	1,152839	1,923561	1,529748	1,287179	34,0566	23,80103128	49,9999	1,190049184	0,073084
2	1,239815	1,63041	1,790057	1,56533	35,6935	25,90548447	49,9999	1,295271633	0,077016
3	0,861404	1,420548	1,114542	1,82317	29,6359	22,01521675	50	1,100760837	0,067665
4	2,175849	0,971476	1,962304	1,32025	36,961	26,47092868	49,9999	1,323543787	0,083175
5	0,939108	1,401825	1,057216	1,328279	25,9837	18,12977505	49,9996	0,906481501	0,060771
6	1,891476	2,040844	2,154967	1,949849	52,3546	36,53334265	50	1,826667133	0,101857
7	1,583513	1,55311	2,074505	0,825214	31,2895	21,44684425	50	1,072342213	0,072462
8	1,318111	1,213727	0,835082	1,484441	30,4716	19,89986912	49,9999	0,994991466	0,066436
9	0,95274	1,551589	0,865714	1,140267	20,5261	17,06369439	49,9995	0,853176188	0,058738
10	1,929182	2,105661	1,067498	0,962729	34,6687	24,41136523	49,9997	1,220560938	0,081403
11	1,054148	1,654475	2,145128	0,810369	23,1163	18,77748385	49,9999	0,938872315	0,064323
12	1,482181	1,813708	0,871439	1,690817	36,8921	25,75876502	49,9999	1,287935675	0,080032
13	1,991913	1,010377	1,273342	1,763962	38,4791	26,95476684	50	1,347738342	0,083112
14	1,529524	1,902722	1,72027	1,418497	36,9578	27,08593496	49,9999	1,35429404	0,0828
15	0,80167	0,983849	1,984482	1,342838	24,4295	18,72461289	49,9999	0,936228772	0,059075
16	1,097744	1,579352	1,885175	1,060312	25,6641	20,6642288	49,9997	1,033205241	0,066546
17	1,031274	0,870418	1,150405	0,855877	21,25	13,13481453	49,9997	0,656736786	0,049245
18	1,457142	1,836322	1,440305	1,602323	38,6026	26,9121743	49,9999	1,345606024	0,081871
19	1,55131	1,50691	1,828125	1,57128	38,6405	26,98378924	49,9998	1,349184065	0,081459
20	1,222507	0,825089	1,706258	1,502817	26,7929	20,59552068	50	1,029776034	0,065581
21	1,44275	1,258083	1,465278	1,439966	36,4828	22,68816793	49,9998	1,134403859	0,072307
22	1,392194	1,037886	1,692041	1,640775	31,3533	23,65057529	50	1,182528764	0,073245
23	1,732108	1,499126	0,91159	1,153643	30,4529	21,19824226	49,9999	1,059909993	0,072623
24	1,270887	1,001304	2,169624	0,918525	22,7074	18,65911305	50	0,932955653	0,062228
25	1,723043	1,754561	1,32822	1,228174	37,3122	24,67360238	49,9996	1,233670249	0,079185
26	1,700467	2,164175	0,90252	1,364341	36,521	26,09354108	49,9998	1,304671835	0,083246
27	1,826191	1,883185	1,803147	2,058318	50,5419	34,89412335	50	1,744706167	0,098363

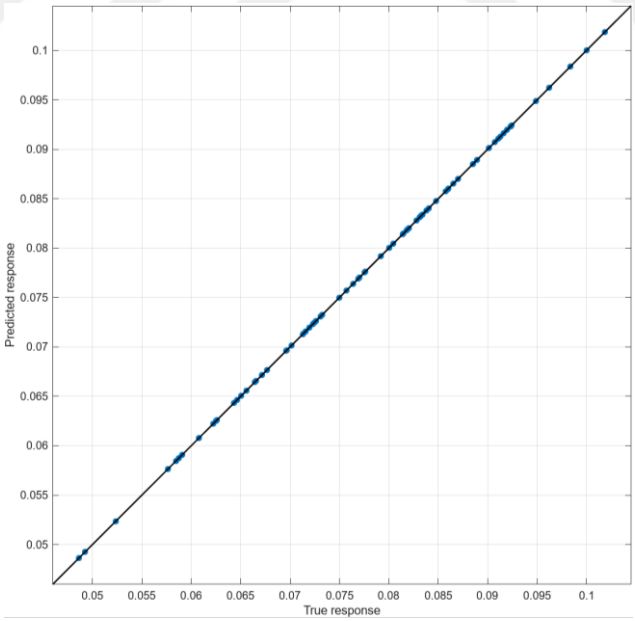
Çizelge 4.42. İncir Model 1 Veri Kümesi (devam)

28	0,873576	0,837364	1,615113	0,844463	17,59	13,49392643	49,9999	0,674694972	0,048628
29	1,198374	1,859741	2,189869	1,241669	33,9562	25,18471986	49,9999	1,259233475	0,076385
30	2,043194	0,921211	0,813814	2,168938	41,2499	28,22610347	49,9999	1,411302351	0,086523
31	1,485885	1,438505	1,398475	1,106735	32,8071	21,2234313	49,9999	1,061169443	0,06966
32	1,203725	1,47106	1,127206	1,977229	34,1814	25,70524804	50	1,285262402	0,076904
33	1,976601	1,370575	1,086687	1,634098	36,6647	26,75129814	50	1,337564907	0,084032
34	0,898895	1,457599	1,315029	1,031327	21,7196	17,19282407	49,9999	0,859639484	0,057638
35	2,021583	1,593311	1,417293	1,735905	46,5357	31,30295597	49,9999	1,565144668	0,091076
36	1,135056	1,166078	1,650711	2,131173	36,9954	26,91356669	50	1,345678334	0,077547
37	0,84602	1,996033	2,11337	0,981041	29,3801	21,91807635	49,9999	1,095901626	0,06715
38	1,867301	0,805488	1,921308	2,162639	42,6078	30,47154262	49,9999	1,523574084	0,088516
39	0,818654	2,169926	1,756739	1,518277	36,6763	25,98143723	50	1,299071861	0,074982
40	0,915794	1,291374	1,516076	1,53824	28,3266	20,89126832	49,9999	1,044561327	0,065047
41	1,281141	1,729711	1,909689	1,955288	41,9807	30,61037563	50	1,530518781	0,085753
42	1,793289	2,083705	0,828384	1,86178	44,9449	30,45682302	50	1,522841151	0,091278
43	1,768738	1,778	2,104518	1,216538	38,5158	27,5985882	49,9998	1,37992389	0,084779
44	1,591697	1,082922	1,016297	0,952047	23,7968	16,91506443	49,9998	0,845749839	0,062588
45	1,169168	2,024357	1,391764	1,171916	29,8214	22,61518864	49,9997	1,130752648	0,071952
46	2,118054	1,609226	1,453017	1,929455	50,3085	33,44384477	49,9999	1,672188894	0,09622
47	1,606164	1,138705	2,049853	1,727199	34,4039	27,58588466	49,9999	1,379291474	0,081797
48	1,40509	1,187292	1,874526	1,011194	24,5115	19,7028388	49,9998	0,985138	0,066544
49	1,644556	1,228579	0,946009	0,936708	24,9334	17,45083204	49,9998	0,872538112	0,064636
50	1,806807	1,321629	2,005626	1,473846	38,6542	27,27238298	49,9999	1,363616422	0,083403
51	1,362895	1,239344	1,941704	1,190465	30,3274	21,98112192	49,9999	1,099053898	0,069604
52	1,335146	2,136447	1,146459	1,890832	39,6686	29,69659935	50	1,484829968	0,086016
53	2,133723	1,379714	1,56039	1,794961	45,6802	30,98939648	49,9999	1,549466725	0,092313
54	1,937825	1,682524	1,660847	1,088743	37,6791	25,56177898	49,9999	1,278086393	0,082022
55	2,198684	1,982685	1,763138	1,672404	52,3165	34,21039148	49,9999	1,710516153	0,10002
56	1,679636	1,706666	0,993443	1,879056	39,7358	28,66904985	49,9998	1,433446759	0,085975
57	1,355364	2,065	1,844384	1,8129	41,5701	30,77506647	49,9998	1,538747169	0,088496
58	1,000588	0,956023	1,194826	1,006706	22,5004	14,67323208	49,9999	0,733660136	0,052358
59	2,154458	1,107984	1,169778	2,10849	44,4871	31,04183493	49,9999	1,552088642	0,091948
60	1,843408	1,060117	1,027507	2,008893	36,9463	27,09592321	49,9999	1,354793451	0,083379
61	0,991293	1,131823	2,034304	1,70065	31,149	23,60342285	49,9999	1,180168782	0,070147
62	1,874969	1,533952	1,354362	1,837	44,4116	30,12032936	50	1,506016468	0,088918
63	1,417727	1,72538	2,018083	2,078471	42,8097	32,5566049	50	1,627830245	0,090725
64	1,905244	1,657763	1,270182	1,912455	47,3575	31,56038126	49,9998	1,578012751	0,091611
65	1,026038	1,172654	1,364117	1,397437	24,8113	19,11581096	49,9998	0,955786725	0,062505
66	1,561011	2,048348	1,237093	1,305048	38,4376	25,66185033	49,9999	1,28308995	0,080439
67	1,670673	1,780272	1,590261	1,067421	34,7039	23,85201486	50	1,192600743	0,077611
68	2,034955	1,945542	0,930679	1,13136	37,2427	25,66957281	49,9998	1,283473507	0,083197

Çizelge 4.432. İncir Model 1 Veri Kümesi (devam)

69	1,751652	1,888044	0,96449	2,073687	44,7882	31,64355726	49,9999	1,582174699	0,092309
70	2,106712	1,280761	1,238059	2,033315	44,6685	31,2958781	50	1,564793905	0,092417
71	1,626178	2,126646	1,486166	2,000019	45,1266	33,00075322	49,9997	1,650027761	0,094885
72	0,9588	0,869128	1,730437	2,198419	34,0726	24,90584589	49,9999	1,245289804	0,072331
73	1,303345	1,969783	2,088491	1,756135	41,7319	30,78754658	50	1,539377329	0,086995
74	2,083179	0,891852	0,981085	1,386558	32,0577	22,47822232	50	1,123911116	0,075705
75	1,127894	1,342922	1,626348	1,614083	31,5619	23,27086156	50	1,163543078	0,071336
76	1,501161	2,1994	1,295554	1,450678	36,5844	27,0138909	49,9999	1,350691844	0,083801
77	1,969507	1,078691	1,583789	0,876614	26,339	19,79058188	49,9997	0,989523157	0,071577
78	2,074243	1,81514	1,865759	1,271035	42,9253	29,86973427	49,9999	1,493483726	0,090121
79	1,095628	0,934631	1,212596	2,12164	32,6506	23,18760557	50	1,159380278	0,0713
80	1,075736	1,334617	1,539457	0,887656	20,356	16,67774986	49,9999	0,833885825	0,05846

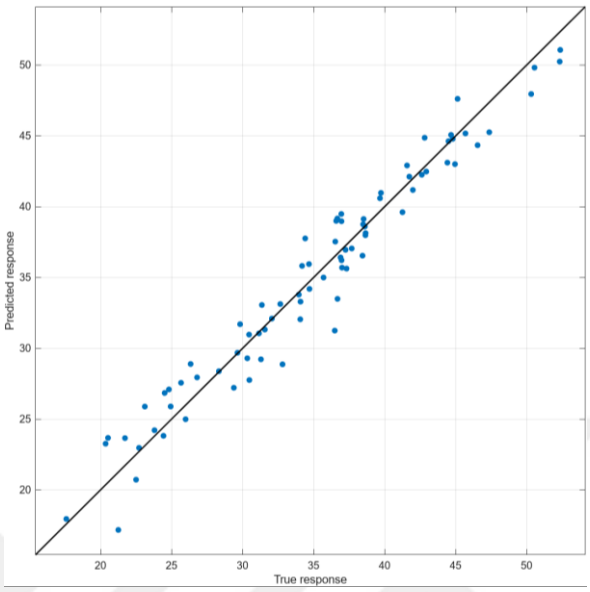
İncir model 1 kütle için Lineer regresyon modeli kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 7,2091E-06, R-Kare 1,00, MSE 5,1971E-11, MAE 5,8006E-06'dır. Şekil 4.175'te gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 4.175. İncir 1 Kütle Gerçek Değerler ile Tahmin Edilen Değerler

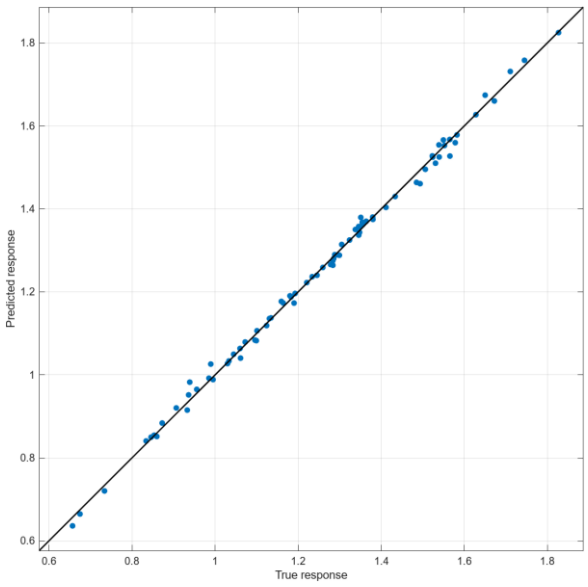
İncir model 1 maksimum kuvvet için Gaussian Process regresyon kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 1,7767 R-Kare 0,95 MSE 3,1566

MAE 1,4069'dır. Şekil 4.176'da gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.



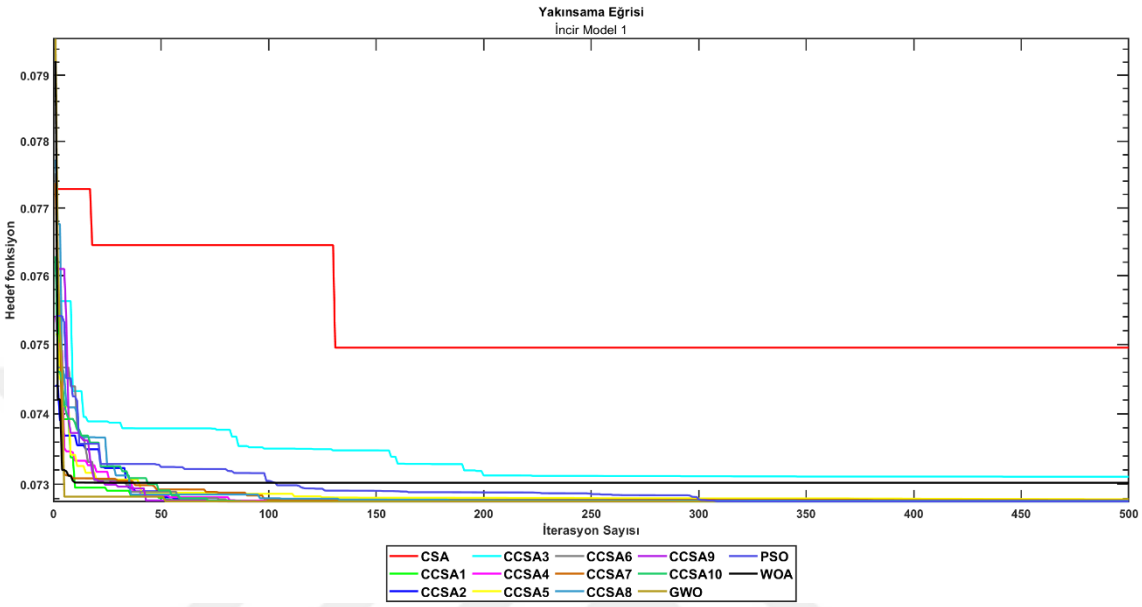
Şekil 4.176. İncir 1 Maksimum Kuvvet Gerçek Değerler ile Tahmin Edilen Değerler

İncir model 1 enerji sönümleme için Gaussian Process regresyonu en iyi tahmini gerçekleştirmiştir. RMSE 0,013907, R-Kare 1,0, MSE 0,00019340, MAE 0,010643'tür. Şekil 4.177'da gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 4.177. İncir Model 1 Enerji Sönümleme

İncir Model 1'e ait veriler kullanılarak optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu minimum kütle kısıt fonksiyonu olarak enerji sönümlemesi 1.3 kJ'nin altına düşmesin ve maksimum kuvvet 40 kN'nin üzerine çıkmasın olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.178. İncir Model 1 Optimizasyon Yakınsama Eğrisi

Optimizasyon sonuçları incelendiğinde CCSA algoritmaları iyi yakınsama yaparak kütleyi %6,36 seviyesinde düşürmüş ve enerjiyi %12 seviyesinde artırmıştır. Maksimum kuvvet değerinde %18 seviyelerinde azalma gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar karşılaştırılmalı olarak Çizelge 4.43'te verilmiştir.

Çizelge 4.43. İncir Model 1 Optimizasyon Sonuçları

	T1	T2	T3	T4	Kütle	Enerji	Maksimum Kuvvet
CSA	0,8	2,090823511	1,775885067	1,591671245	0,074951914	1,301194058	34,21687259
CCSA1	0,8	0,905485636	2,199999914	2,199999782	0,07275638	1,30000002	33,0594644
CCSA2	0,8	0,905689248	2,199942832	2,199876101	0,072756552	1,30000012	33,05956854
CCSA3	0,8	1,313348362	2,199964059	1,908621513	0,073108217	1,30007151	33,02840875
CCSA4	0,8	0,905495344	2,199984641	2,2	0,072756408	1,30000008	33,05951674
CCSA5	0,800436925	0,96999909	2,2	2,151975003	0,072789758	1,30001197	33,02887966
CCSA6	0,8	0,905485976	2,19999959	2,2	0,072756385	1,30000014	33,05946857
CCSA7	0,800038102	0,952244404	2,2	2,165334775	0,072777784	1,30005734	33,03620857
CCSA8	0,801600915	0,903989093	2,2	2,2	0,072767251	1,30001073	33,06176359

Çizelge 4.443. İncir Model 1 Optimizasyon Sonuçları(devam)

CCSA9	0,8	0,90548535	2,19999982	2,2	0,07275637	1,30000006	33,05946453
CCSA10	0,8	0,90548677	2,19999859	2,19999978	0,07275638	1,30000099	33,05947085
GWO	0,8	0,90553248	2,2	2,2	0,07275694	1,30013525	33,05979048
PSO	0,8	0,90566633	2,19973748	2,19999486	0,07275689	1,30000464	33,06037279
WOA	0,83941877	0,86842223	2,19997205	2,19997205	0,07302172	1,30000007	33,11445425

4.6.2. İncir Model 2 Optimizasyon

Çizelge 4.44 İncir Model 2 için veri kümesi verilmiştir. Veri kümesinde 80 adet farklı değişken takımına ait maksimum kuvvet (kN), ortalama kuvvet (kN), enerji sönümleme (kJ) ve kütle (kg) değerleri Ls-Dyna ile sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuştur.

Çizelge 4.44. İncir Model 2 Veri Kümesi

S.No	T1	T2	T3	T4	T5	Mak. Kuv	Ort. Kuv	Yer.Değ	Enerji Abs.	Kütle
1	1,1655	1,934264	1,518277	1,284826	1,119827	28,5913	22,86421	49,9995	1,143199	0,071377
2	1,254323	1,62337	1,786614	1,563947	1,386844	37,0433	25,59636	49,9997	1,27981	0,07509
3	0,853874	1,419526	1,100877	1,826398	1,835307	30,0169	23,29524	49,9999	1,16476	0,067794
4	2,181023	0,968384	1,967349	1,32144	1,783944	43,6817	30,87045	49,9998	1,543516	0,089257
5	0,936629	1,408789	1,054966	1,330625	1,040623	20,1471	17,48023	49,9996	0,874005	0,057334
6	1,885263	2,032189	2,151143	1,944376	1,493641	51,2987	33,55762	49,9999	1,677877	0,096062
7	1,575	1,566258	2,061194	0,821463	2,033899	46,4753	31,65573	50	1,582787	0,087694
8	1,323708	1,20572	0,84414	1,486999	1,286476	27,5489	19,7366	49,9998	0,986826	0,064177
9	0,94606	1,545991	0,864547	1,149791	0,831659	18,9434	15,55065	50	0,777533	0,054808
10	1,934783	2,110182	1,079699	0,971332	1,947602	47,9866	32,8313	49,9994	1,641546	0,094194
11	1,055099	1,644998	2,132817	0,813993	1,654725	34,3846	26,13173	50	1,306586	0,074912
12	1,46514	1,809384	0,884206	1,685792	1,433508	38,9064	24,99991	49,9997	1,249988	0,076672
13	1,99061	1,020057	1,281963	1,765234	2,085497	41,8329	30,24431	49,9999	1,512212	0,087513
14	1,522988	1,906166	1,713178	1,426243	1,766054	46,2838	30,79297	50	1,539649	0,087237
15	0,808804	0,989505	1,978332	1,345032	1,595901	26,2264	21,18155	50	1,059077	0,06258
16	1,097772	1,585759	1,893846	1,061622	2,1528	37,5531	29,53678	49,9998	1,476833	0,080589
17	1,039631	0,874204	1,152437	0,863565	1,728032	23,3753	18,90782	49,9998	0,945387	0,06058
18	1,449864	1,832675	1,435229	1,59461	1,21944	37,5652	25,07374	50	1,253687	0,077003
19	1,545484	1,500007	1,829208	1,573505	1,145628	36,0102	24,88992	49,9997	1,244488	0,076096
20	1,226205	0,823509	1,692838	1,501728	1,608301	28,4225	22,10744	49,9999	1,10537	0,067023
21	1,433822	1,268125	1,480048	1,444947	1,222503	34,3681	22,16498	50	1,108249	0,069792
22	1,377918	1,034967	1,68315	1,648931	0,870483	24,4471	18,90756	49,9998	0,945374	0,063391
23	1,735548	1,489869	0,914955	1,157808	1,970528	41,7364	27,88271	50	1,394136	0,083049

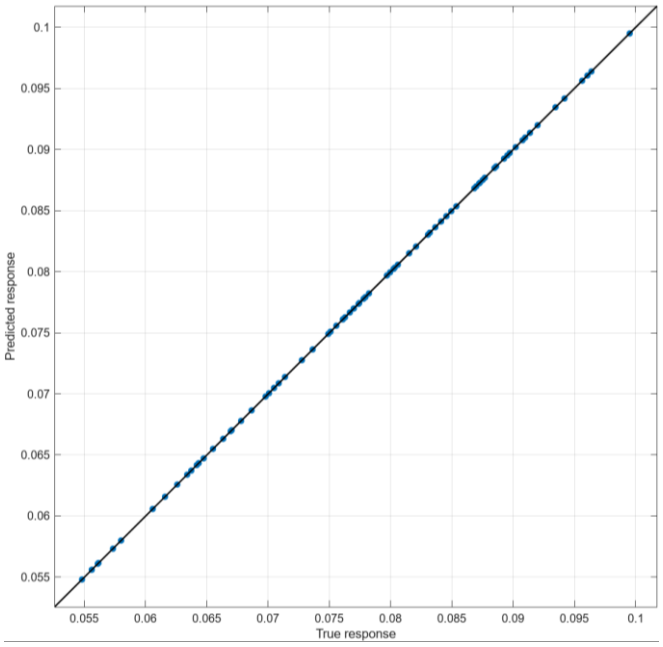
Çizelge 4.454. İncir Model 2 Veri Kümesi (devam)

24	1,263579	0,993138	2,180818	0,910431	2,126592	35,2353	27,47372	49,9999	1,373683	0,077389
25	1,718849	1,750554	1,329729	1,225318	1,455652	43,4595	27,03705	49,9998	1,351847	0,082077
26	1,698947	2,152293	0,902812	1,373698	1,876058	46,7366	31,19407	49,9998	1,559697	0,089722
27	1,83038	1,875679	1,80567	2,055159	1,824477	51,0532	34,09518	50	1,704759	0,095635
28	0,873561	0,845583	1,616598	0,838806	1,422056	22,0228	17,62781	49,9998	0,881387	0,056096
29	1,190848	1,865626	2,190905	1,238914	1,35862	35,0225	26,8029	50	1,340145	0,077939
30	2,042922	0,908347	0,811556	2,175679	1,663792	36,6854	25,9484	49,9998	1,297415	0,080246
31	1,492685	1,440711	1,40775	1,100172	1,114558	31,9203	21,90113	49,9996	1,095048	0,070071
32	1,213075	1,467278	1,119921	1,974284	1,892199	35,0142	26,52602	49,9999	1,326298	0,076112
33	1,982886	1,360943	1,090369	1,626589	1,627754	42,6842	27,82623	49,9999	1,391309	0,084119
34	0,890422	1,457326	1,309441	1,032991	2,056283	31,937	24,36184	50	1,218092	0,070482
35	2,023952	1,60252	1,412656	1,739266	1,192733	38,9873	27,20881	49,9999	1,360438	0,08456
36	1,138705	1,166076	1,654961	2,130845	1,088518	25,3693	20,51251	49,9997	1,025619	0,064737
37	0,838083	2,005128	2,11574	0,987312	0,841225	27,2359	20,6247	49,9998	1,031231	0,065498
38	1,866857	0,811982	1,935139	2,158431	1,254406	34,4059	25,13648	49,9998	1,256819	0,077437
39	0,827061	2,165082	1,751041	1,523662	2,186068	40,7381	32,04507	49,9998	1,602247	0,083646
40	0,912589	1,291439	1,51283	1,546908	1,679335	31,0746	22,98387	49,9999	1,149191	0,066946
41	1,282241	1,744541	1,907965	1,970584	1,167959	35,0674	25,93118	49,9997	1,296551	0,076279
42	1,785154	2,081957	0,822	1,850799	0,946415	37,6394	24,19604	49,9997	1,209795	0,079696
43	1,771852	1,776314	2,104058	1,213382	1,079821	40,4315	27,28645	50	1,364322	0,083197
44	1,604128	1,080842	1,024823	0,954462	1,580178	29,0763	21,92403	49,9995	1,096191	0,070866
45	1,172426	2,024593	1,391187	1,176527	1,914036	36,927	28,92869	50	1,446435	0,081513
46	2,11941	1,611297	1,4629	1,936967	1,299212	45,2103	29,11029	49,9999	1,455511	0,088614
47	1,619166	1,137124	2,056538	1,724782	1,311342	34,3522	25,14717	49,9999	1,257356	0,076987
48	1,399226	1,198214	1,883535	1,010391	1,71237	34,3271	25,64347	49,9998	1,282169	0,07557
49	1,646033	1,237042	0,944341	0,937666	2,134588	38,5819	26,28075	49,9998	1,314032	0,079956
50	1,808161	1,321459	2,005817	1,475767	2,060996	47,2418	33,21062	50	1,660531	0,09098
51	1,376626	1,238808	1,952179	1,185605	0,896445	29,13	20,13746	49,9997	1,006867	0,066332
52	1,328044	2,140096	1,147404	1,898631	1,762393	43,7131	30,14942	49,9998	1,507465	0,084549
53	2,138261	1,380437	1,556438	1,78835	1,473018	47,193	29,49047	49,9998	1,474517	0,088476
54	1,946005	1,684304	1,657788	1,086043	0,935207	37,8109	24,3906	49,9996	1,21952	0,080331
55	2,198344	1,984239	1,76378	1,674833	1,368802	50,7564	32,60696	50	1,630348	0,096392
56	1,691589	1,704716	1,001735	1,878439	1,162091	35,1784	24,5758	49,9999	1,228788	0,07738
57	1,356476	2,067529	1,842519	1,804777	1,699168	46,1922	31,23091	50	1,561546	0,08728
58	1,000542	0,950113	1,188827	1,008234	1,264467	22,6027	16,89382	49,9999	0,844689	0,055605
59	2,162617	1,109362	1,175674	2,108152	1,934767	42,4312	31,34588	50	1,567294	0,090208
60	1,8494	1,045559	1,036583	2,022776	0,966033	28,7215	20,5677	49,9998	1,028381	0,070484
61	0,990685	1,121085	2,034455	1,701589	1,974051	32,0511	26,22092	49,9999	1,311043	0,073637
62	1,884175	1,523147	1,351243	1,837045	2,180397	49,3293	33,79029	49,9998	1,689508	0,093457
63	1,428691	1,71789	2,013497	2,085307	1,061056	37,8076	26,19534	49,9998	1,309762	0,078234
64	1,909325	1,66777	1,262767	1,906386	1,865813	48,565	32,14467	49,9999	1,60723	0,091372

Çizelge 4.464. İncir Model 2 Veri Kümesi (devam)

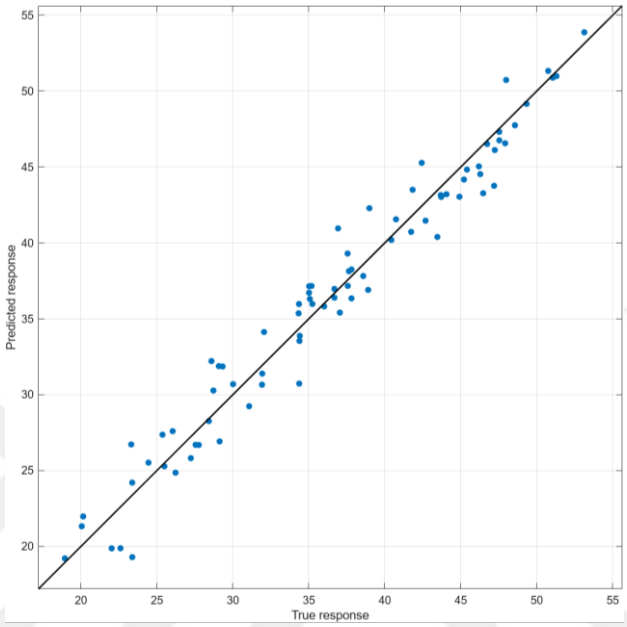
65	1,010222	1,177805	1,37636	1,405244	1,539723	26,0389	21,01207	50	1,050603	0,06433
66	1,562117	2,054748	1,23349	1,293504	1,810187	45,4085	30,61526	49,9999	1,53076	0,086994
67	1,659792	1,783475	1,598635	1,062518	2,110773	47,9245	32,78888	50	1,639444	0,090773
68	2,041078	1,944804	0,930815	1,117758	1,405385	44,0597	28,65343	50	1,432671	0,086833
69	1,747211	1,89159	0,958962	2,070589	1,512122	43,7283	28,84491	49,9999	1,442243	0,085366
70	2,095377	1,284706	1,238471	2,038287	1,993564	47,5334	32,60998	49,9999	1,630496	0,091996
71	1,628311	2,11949	1,496025	1,99952	1,557703	47,5371	30,87459	49,9999	1,543726	0,08953
72	0,959344	0,858017	1,735214	2,195305	1,334722	25,4963	20,20681	50	1,01034	0,061586
73	1,304146	1,961687	2,078893	1,757518	1,021318	36,6864	25,73348	49,9999	1,286672	0,077793
74	2,085024	0,891348	0,979169	1,383086	0,815091	27,7577	18,79858	49,9998	0,939925	0,06865
75	1,117214	1,342778	1,63428	1,60753	1,009874	23,3097	19,82244	49,9999	0,99112	0,063728
76	1,514475	2,182905	1,305919	1,456923	1,5204	44,9136	28,75479	49,9999	1,437737	0,084951
77	1,966227	1,066617	1,574416	0,875676	0,984696	29,3244	21,12324	50	1,056162	0,072757
78	2,06791	1,824518	1,853279	1,268479	2,011209	53,1315	35,84748	49,9999	1,79237	0,099517
79	1,096211	0,925261	1,203275	2,113328	0,918049	23,3809	16,65567	49,9999	0,832782	0,05615
80	1,066852	1,332353	1,536173	0,896472	0,857998	20,0571	16,95033	49,9996	0,84751	0,057994

İncir model 2 kütle için Lineer regresyon modeli kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 6,8209E-06, R-Kare 1,00, MSE 4,62525E-11, MAE 5,3656E-06'dır. Şekil 4.179'ta gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.



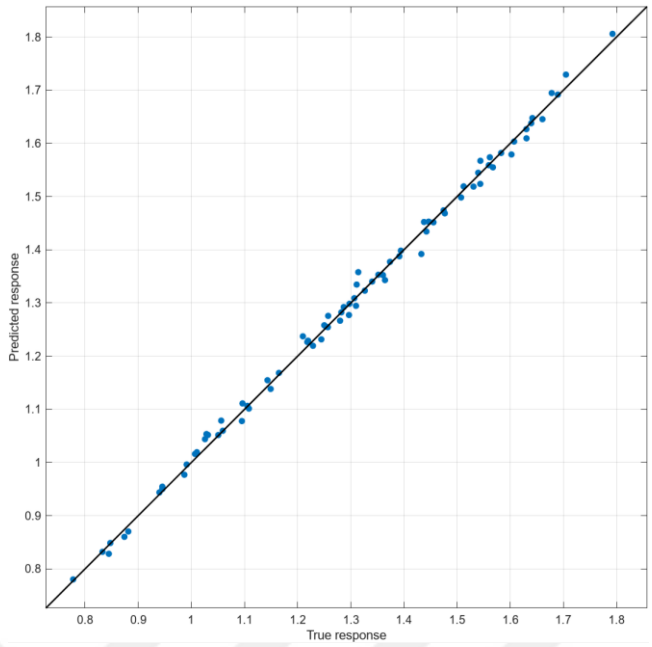
Şekil 4.179. İncir 2 Model Kütle gerçek değerler ve tahmin

İncir model 2 maksimum kuvvet için Gaussian Process regresyon modeli kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 1,7527, R-Kare 0,96, MSE 3,0719, MAE 1,4213'tür. Şekil 4.179'ta gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.

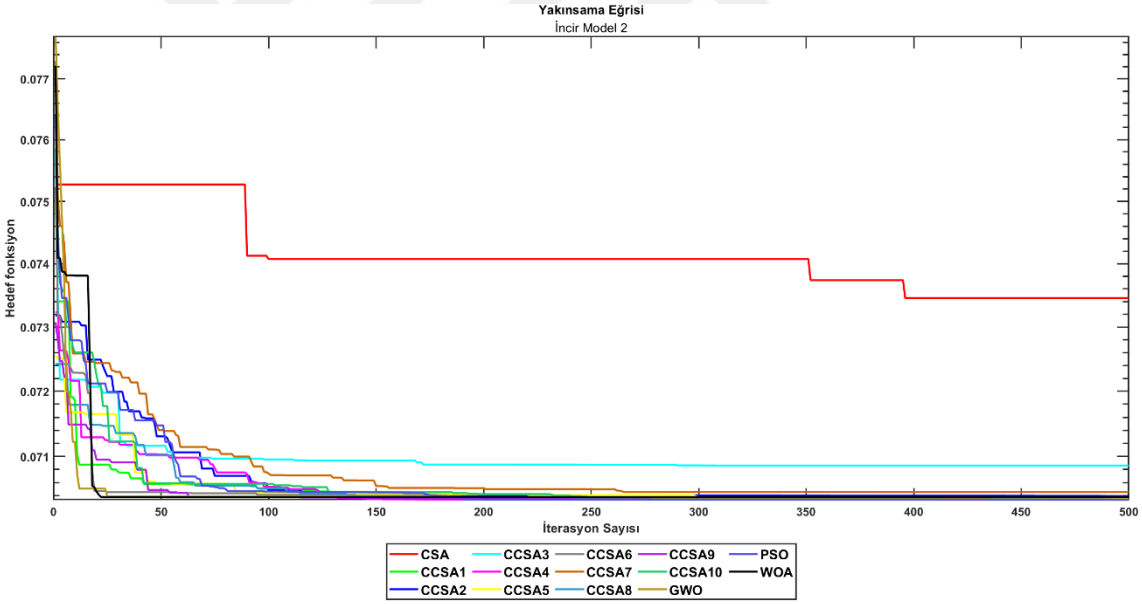


Şekil 4.180. İncir Model 2 Maksimum kuvvet gerçek değerler ve tahmin

İncir model 2 enerji sönümleme için Gaussian Process regresyon modeli kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 0,013747, R-Kare 1,00, MSE 0,00018898, MAE 0,010443'tür. Şekil 4.181'de gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 4.181. İncir Model 2 Enerji Sönümleme



Şekil 4.182. İncir Model 2 Optimizasyon Yakınsama Eğrisi

Optimizasyon sonuçları incelendiğinde CCSA algoritmaları iyi yakınsama yaparak kütleyi %9,20 seviyesinde düşürmüş ve enerjiyi %12 seviyesinde artırmıştır. Maksimum kuvvet değerinde %25 seviyelerinde azalma gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar karşılaştırılmalı olarak Çizelge 4.45'te verilmiştir.

Çizelge 4.45. İncir Model 2 Optimizasyon Sonuçları

	T1	T2	T3	T4	T5	Kütle	Enerji	Maksimum Kuvvet
CSA	0,957127418	1,423757995	1,85561943	1,50877806	1,851959588	0,073458805	1,307606247	33,8795474
CCSA1	0,800290785	0,8	2,163659374	2,2	2,108904684	0,070371022	1,300001278	29,73534377
CCSA2	0,800050421	0,802637698	2,130917264	2,2	2,124436234	0,070397789	1,300001914	29,78355391
CCSA3	0,8	0,986956719	2,19708318	1,871181894	2,034626838	0,070858782	1,300004032	30,71426525
CCSA4	0,800001153	0,8	2,199959157	2,199871857	2,089917782	0,070343739	1,300000249	29,68964813
CCSA5	0,80002966	0,800000344	2,199908156	2,182293244	2,095044206	0,070354378	1,300000327	29,70810686
CCSA6	0,8	0,8	2,199476563	2,199752241	2,090279728	0,070345018	1,300025316	29,69086985
CCSA7	0,817024671	0,8	2,199999895	2,199979566	2,074764884	0,070459669	1,300000258	29,798154
CCSA8	0,800017219	0,8	2,2	2,199998298	2,089847524	0,070343777	1,300001131	29,68958687
CCSA9	0,800021753	0,8	2,2	2,199999891	2,089839899	0,070343767	1,300000019	29,68959151
CCSA10	0,8	0,8	2,199972863	2,198194257	2,090400145	0,070344709	1,300000216	29,69137247
GWO	0,8	0,8	2,2	2,2	2,09009109	0,070346543	1,300082433	29,69113485
PSO	0,800000001	0,800000005	2,19904078	2,2	2,090367193	0,070344271	1,300000037	29,69063014
WOA	0,8	0,8	2,196122818	2,144552183	2,108119896	0,070379616	1,300000028	29,75071914

4.6.3. İncir Model 3 Optimizasyon

Çizelge 4.46'da İncir Model 3 için veri kümesi verilmiştir. Veri kümesinde 80 adet farklı değişken takımına ait maksimum kuvvet (kN), ortalama kuvvet (kN), enerji sönümleme (kJ) ve kütle (kg) değerleri Ls-Dyna ile sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4647. İncir Model 3 Veri Kümesi

S.No	T1	T2	T3	T4	T5	Mak. Kuv	Ort. Kuv	Yer.Değ	Enerji Abs.	Kütle
1	1,1655	1,934264	1,518277	1,284826	1,119827	27,3686	21,77267	49,9998	1,088629	0,072439
2	1,254323	1,62337	1,786614	1,563947	1,386844	36,9138	24,34057	50	1,217029	0,075981
3	0,853874	1,419526	1,100877	1,826398	1,835307	29,0837	22,35917	50	1,117959	0,068574
4	2,181023	0,968384	1,967349	1,32144	1,783944	44,2363	29,40226	49,9996	1,470101	0,089788
5	0,936629	1,408789	1,054966	1,330625	1,040623	20,2393	16,51125	49,9999	0,825561	0,058108
6	1,885263	2,032189	2,151143	1,944376	1,493641	50,9055	32,41708	49,9999	1,620851	0,097178
7	1,575	1,566258	2,061194	0,821463	2,033899	46,2068	30,29357	50	1,514678	0,088554
8	1,323708	1,20572	0,84414	1,486999	1,286476	24,9636	18,52079	49,9997	0,926034	0,064839
9	0,94606	1,545991	0,864547	1,149791	0,831659	18,6443	14,7076	49,9998	0,735377	0,055657
10	1,934783	2,110182	1,079699	0,971332	1,947602	47,2541	31,54573	49,9999	1,577284	0,095353
11	1,055099	1,644998	2,132817	0,813993	1,654725	32,9463	25,02016	49,9998	1,251003	0,075815
12	1,46514	1,809384	0,884206	1,685792	1,433508	37,1237	23,69869	50	1,184935	0,077666
13	1,99061	1,020057	1,281963	1,765234	2,085497	42,2718	28,97988	50	1,448994	0,088073

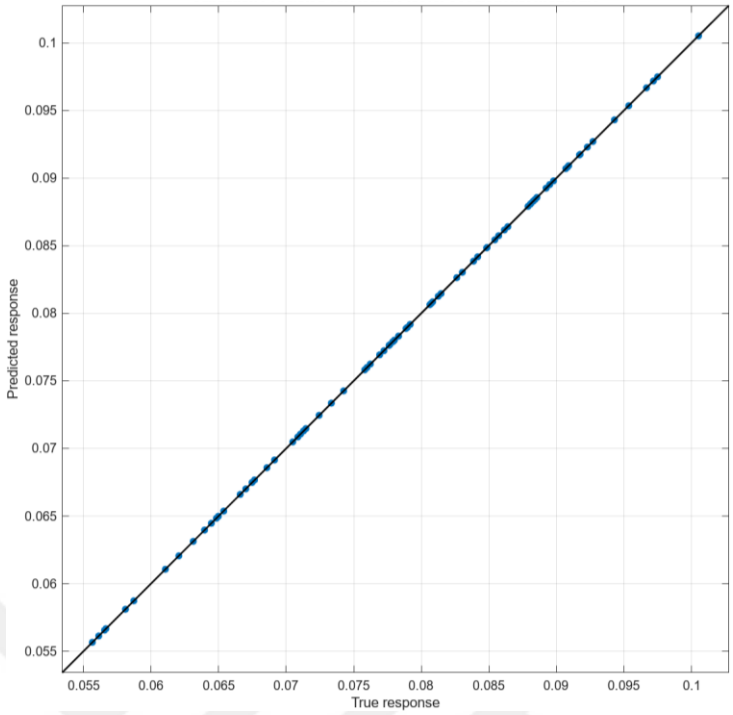
Çizelge 4.46. İncir Model 3 Veri Kümesi (devam)

14	1,522988	1,906166	1,713178	1,426243	1,766054	46,0567	29,46572	49,9999	1,473283	0,088284
15	0,808804	0,989505	1,978332	1,345032	1,595901	26,5607	20,76008	49,9997	1,037998	0,063123
16	1,097772	1,585759	1,893846	1,061622	2,1528	36,093	28,2357	49,9998	1,411779	0,08146
17	1,039631	0,874204	1,152437	0,863565	1,728032	23,2556	17,97406	49,9997	0,898698	0,06106
18	1,449864	1,832675	1,435229	1,59461	1,21944	35,5707	23,77673	50	1,188836	0,078009
19	1,545484	1,500007	1,829208	1,573505	1,145628	35,4499	23,60655	49,9999	1,180325	0,076919
20	1,226205	0,823509	1,692838	1,501728	1,608301	28,4173	21,29451	49,9999	1,064724	0,067475
21	1,433822	1,268125	1,480048	1,444947	1,222503	28,9756	21,03973	49,9999	1,051984	0,070488
22	1,377918	1,034967	1,68315	1,648931	0,870483	24,5121	18,40724	49,9999	0,92036	0,063959
23	1,735548	1,489869	0,914955	1,157808	1,970528	41,3362	26,44664	49,9999	1,32233	0,083867
24	1,263579	0,993138	2,180818	0,910431	2,126592	35,5305	26,17126	49,9999	1,30856	0,077934
25	1,718849	1,750554	1,329729	1,225318	1,455652	42,6695	25,86503	50	1,293251	0,083039
26	1,698947	2,152293	0,902812	1,373698	1,876058	45,2762	29,76426	49,9999	1,48821	0,090904
27	1,83038	1,875679	1,80567	2,055159	1,824477	50,7921	32,96495	50	1,648248	0,096665
28	0,873561	0,845583	1,616598	0,838806	1,422056	21,2353	16,84	50	0,842	0,05656
29	1,190848	1,865626	2,190905	1,238914	1,35862	34,062	25,85792	49,9998	1,292891	0,078964
30	2,042922	0,908347	0,811556	2,175679	1,663792	36,9677	24,71531	49,9997	1,235758	0,080744
31	1,492685	1,440711	1,40775	1,100172	1,114558	31,4881	20,82291	49,9997	1,041139	0,070862
32	1,213075	1,467278	1,119921	1,974284	1,892199	33,9767	25,07624	50	1,253812	0,076917
33	1,982886	1,360943	1,090369	1,626589	1,627754	40,5095	26,4162	50	1,32081	0,084867
34	0,890422	1,457326	1,309441	1,032991	2,056283	30,6118	23,41995	49,9999	1,170995	0,071282
35	2,023952	1,60252	1,412656	1,739266	1,192733	38,7774	26,18598	49,9998	1,309294	0,08544
36	1,138705	1,166076	1,654961	2,130845	1,088518	24,9951	20,0052	49,9999	1,000258	0,065377
37	0,838083	2,005128	2,11574	0,987312	0,841225	27,636	19,82503	49,9994	0,991239	0,066599
38	1,866857	0,811982	1,935139	2,158431	1,254406	35,0701	24,40889	49,9997	1,220437	0,077883
39	0,827061	2,165082	1,751041	1,523662	2,186068	39,8027	30,62404	50	1,531202	0,084834
40	0,912589	1,291439	1,51283	1,546908	1,679335	28,1985	21,89851	49,9999	1,094923	0,067655
41	1,282241	1,744541	1,907965	1,970584	1,167959	34,1654	24,52694	49,9997	1,22634	0,077237
42	1,785154	2,081957	0,822	1,850799	0,946415	37,4621	23,92605	49,9997	1,196295	0,080839
43	1,771852	1,776314	2,104058	1,213382	1,079821	39,9002	25,99705	49,9999	1,29985	0,084172
44	1,604128	1,080842	1,024823	0,954462	1,580178	29,1397	21,1599	49,9999	1,057993	0,071459
45	1,172426	2,024593	1,391187	1,176527	1,914036	35,785	28,11482	49,9998	1,405736	0,082624
46	2,11941	1,611297	1,4629	1,936967	1,299212	44,6948	28,03108	49,9999	1,401551	0,089498
47	1,619166	1,137124	2,056538	1,724782	1,311342	34,2039	24,70728	50	1,235364	0,077611
48	1,399226	1,198214	1,883535	1,010391	1,71237	34,8631	24,37093	49,9999	1,218544	0,076227
49	1,646033	1,237042	0,944341	0,937666	2,134588	35,9086	25,38806	49,9997	1,269395	0,080636
50	1,808161	1,321459	2,005817	1,475767	2,060996	44,514	31,50761	49,9999	1,575377	0,091705
51	1,376626	1,238808	1,952179	1,185605	0,896445	26,5457	19,65695	49,9996	0,98284	0,067012
52	1,328044	2,140096	1,147404	1,898631	1,762393	42,7965	28,77087	49,9998	1,438538	0,085724
53	2,138261	1,380437	1,556438	1,78835	1,473018	45,2492	28,62391	49,9999	1,431193	0,089234
54	1,946005	1,684304	1,657788	1,086043	0,935207	37,768	23,93528	50	1,196764	0,081255

Çizelge 4.46. İncir Model 3 Veri Kümesi (devam)

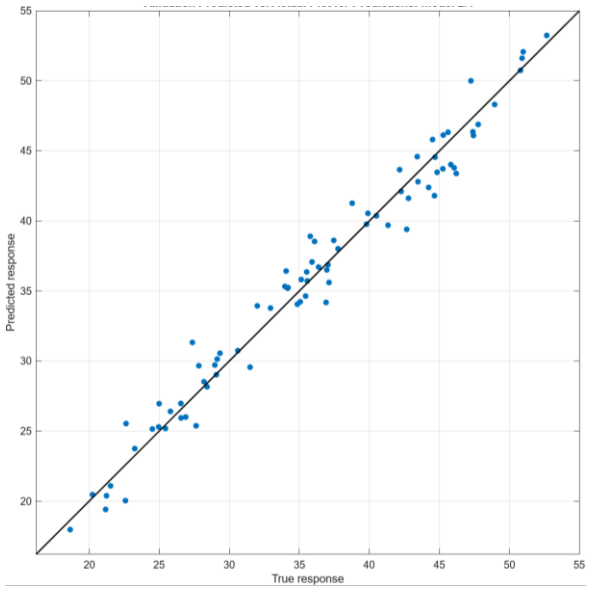
55	2,198344	1,984239	1,76378	1,674833	1,368802	50,9869	31,58646	49,9999	1,57932	0,097481
56	1,691589	1,704716	1,001735	1,878439	1,162091	35,1398	23,20647	49,9999	1,160321	0,078316
57	1,356476	2,067529	1,842519	1,804777	1,699168	45,8176	29,92162	49,9998	1,496075	0,088416
58	1,000542	0,950113	1,188827	1,008234	1,264467	21,1769	15,98456	49,9999	0,799226	0,056127
59	2,162617	1,109362	1,175674	2,108152	1,934767	43,4192	29,84462	49,9998	1,492225	0,090817
60	1,8494	1,045559	1,036583	2,022776	0,966033	27,829	20,20761	49,9999	1,010379	0,071058
61	0,990685	1,121085	2,034455	1,701589	1,974051	32,001	25,4095	50	1,270475	0,074252
62	1,884175	1,523147	1,351243	1,837045	2,180397	48,9471	32,05521	49,9999	1,602757	0,094293
63	1,428691	1,71789	2,013497	2,085307	1,061056	37,0517	25,03653	50	1,251827	0,079177
64	1,909325	1,66777	1,262767	1,906386	1,865813	47,773	30,80002	49,9999	1,539998	0,092288
65	1,010222	1,177805	1,37636	1,405244	1,539723	25,8006	20,16544	50	1,008272	0,064977
66	1,562117	2,054748	1,23349	1,293504	1,810187	44,8389	28,92418	49,9999	1,446206	0,088123
67	1,659792	1,783475	1,598635	1,062518	2,110773	47,3946	31,13608	49,9999	1,556801	0,091752
68	2,041078	1,944804	0,930815	1,117758	1,405385	42,1644	26,9342	49,9999	1,346707	0,0879
69	1,747211	1,89159	0,958962	2,070589	1,512122	43,4758	27,5996	49,9999	1,379977	0,086404
70	2,095377	1,284706	1,238471	2,038287	1,993564	45,6212	30,69786	50	1,534893	0,092701
71	1,628311	2,11949	1,496025	1,99952	1,557703	47,4337	29,66286	49,9998	1,483137	0,090694
72	0,959344	0,858017	1,735214	2,195305	1,334722	25,4469	19,52891	50	0,976445	0,062057
73	1,304146	1,961687	2,078893	1,757518	1,021318	36,3796	24,80442	49,9999	1,240219	0,078871
74	2,085024	0,891348	0,979169	1,383086	0,815091	26,8945	18,20314	49,9997	0,910152	0,069139
75	1,117214	1,342778	1,63428	1,60753	1,009874	22,6308	18,95444	49,9995	0,947713	0,064465
76	1,514475	2,182905	1,305919	1,456923	1,5204	44,6495	27,7473	49,9999	1,387362	0,086149
77	1,966227	1,066617	1,574416	0,875676	0,984696	29,3379	20,87297	49,9998	1,043645	0,073343
78	2,06791	1,824518	1,853279	1,268479	2,011209	52,6656	34,50424	49,9997	1,725202	0,100519
79	1,096211	0,925261	1,203275	2,113328	0,918049	22,5889	16,05116	50	0,802558	0,056658
80	1,066852	1,332353	1,536173	0,896472	0,857998	21,5281	16,10393	49,9995	0,805188	0,058725

İncir model 3 kütle için Lineer regresyon modeli kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 6,8949E-06, R-Kare 1,00, MSE 4,7539E-11, MAE 5,4435E-06'dır. Şekil 4.183'te gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.



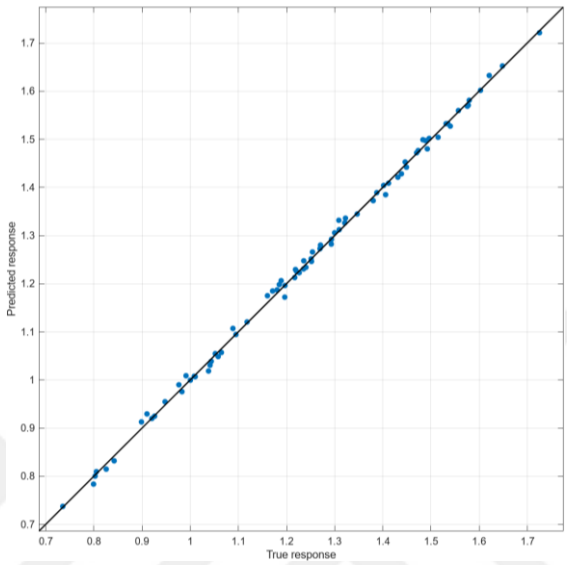
Şekil 4.183. İncir Model 3 Kütle gerçek değerler ve tahmin

İncir model 3 maksimum kuvvet için Stepwise Lineer regresyon modeli kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 1,4863, R-Kare 0.97, MSE 2.2091, MAE 1.1848'dir. Şekil 4.184'te gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.

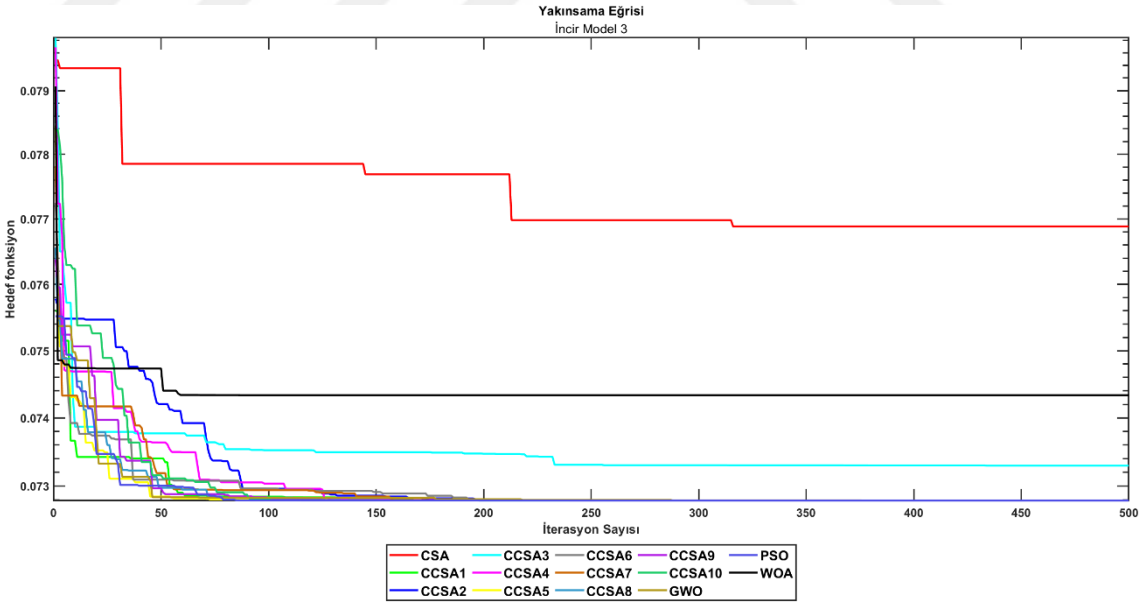


Şekil 4.184. İncir Model 3 Maksimum Kuvvet gerçek değerler ve tahmin

İncir model 3 enerji sönümleme için Gaussian Process regresyon modeli kullanılarak en iyi tahminler alınmıştır. Alınan tahmin değerleri RMSE 0,0097784, R-Kare 1,00, MSE 9,5617E-05, MAE 0.0077893'tür. Şekil 4.185'te gerçek değerler ve tahminle arasındaki dengeyi gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 4.185. İncir Model 3 Enerji Sönümleme gerçek değerler ve tahmin



Şekil 4.186. İncir Model 3 Optimizasyon Yakınsama Eğrisi

Optimizasyon sonuçları incelendiğinde CCSA algoritmaları iyi yakınsama yaparak kütleyi %6,47 seviyesinde düşürmüş ve enerjiyi %16,5 seviyesinde artırmıştır.

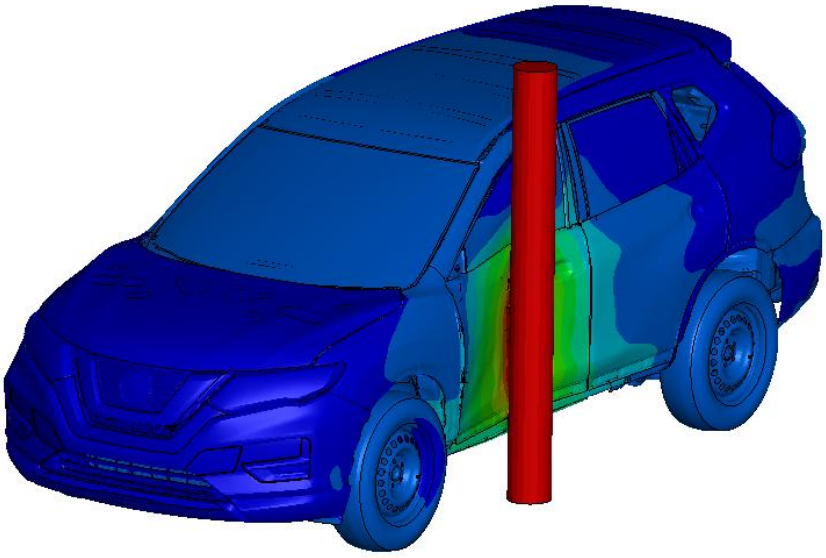
Maksimum kuvvet değerinde %16,25 seviyelerinde azalma gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar karşılaştırılmalı olarak Çizelge 4.47'de verilmiştir.

Çizelge 4.47. İncir Model 3 Optimizasyon Sonuçları

	T1	T2	T3	T4	T5	Kütle	Enerji	Maksimum Kuvvet
CSA	0,956020273	1,711237357	1,867915644	1,813843932	1,696781317	0,076885542	1,303346308	34,96253654
CCSA1	0,800011616	0,849068575	2,199999979	2,19999636	2,199999983	0,072787454	1,300002172	34,05395548
CCSA2	0,8	0,84908073	2,199986762	2,2	2,2	0,072787329	1,300000327	34,05386829
CCSA3	0,8	1,012520995	2,120012739	1,941044301	2,179260466	0,073298241	1,300001466	33,93605568
CCSA4	0,8	0,84909053	2,2	2,199984162	2,199990517	0,072787363	1,300000866	34,05386335
CCSA5	0,8	0,849070817	2,2	2,2	2,2	0,072787284	1,300000043	34,05385695
CCSA6	0,8	0,849141893	2,199894998	2,199996839	2,2	0,072787536	1,300000001	34,05388152
CCSA7	0,8	0,84907662	2,19999292	2,199998871	2,199999721	0,072787307	1,30000014	34,05386069
CCSA8	0,8	0,84907162	2,199999967	2,199997655	2,199999859	0,072787285	1,3	34,05385457
CCSA9	0,800000001	0,849074607	2,199996026	2,199999504	2,2	0,072787306	1,300000303	34,05386499
CCSA10	0,8	0,849071148	2,199999541	2,2	2,2	0,072787286	1,30000005	34,05385725
GWO	0,8	0,849112189	2,2	2,2	2,2	0,072787803	1,30001109	34,05416477
PSO	0,8	0,960850494	1,343904433	2,178295686	1,703591907	0,062728605	1,015714565	25,84547519
WOA	0,8	1,328030004	2,172511618	0,953731124	2,164290993	0,074338305	1,300000002	33,52121168

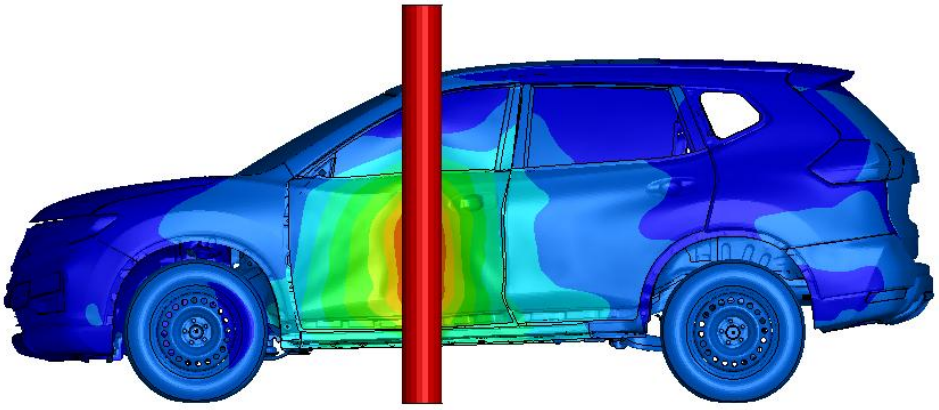
4.7. Elektrikli Araç Çarpışma Analizi

Elektrikli araçların batarya sistemlerinin çarpışma anında korunması için geliştirilen pasif güvenlik sistemi olan incir modellerine ait çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çarpışma analizleri Ls-dyna tarafından paylaşılan araç modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir. Araç modelinin altına alüminyum malzemeden imal 2 mm et kalınlığında batarya muhafazası yerleştirilmiştir. Batarya muhafazasının ara yüzeyine incir modelleri yerleştirilerek sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. İncir modelleri optimize edilmiş modellerdir ve PLA malzemesi kullanılmıştır.



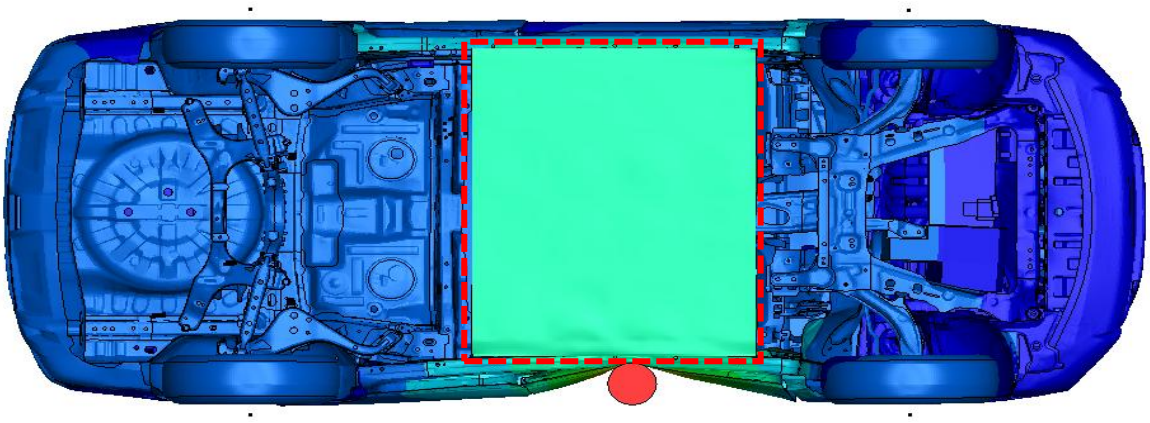
Şekil 4.187. Elektrikli araç direk çarpması önden görünüş

Yandan direk çarpması sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Elektrikli aracın yandan çarpışması sonucunda oluşan yer değiştirmelerin önden görünüşü Şekil 4.187'de, yan görünüşü Şekil 4.188'de verilmiştir.



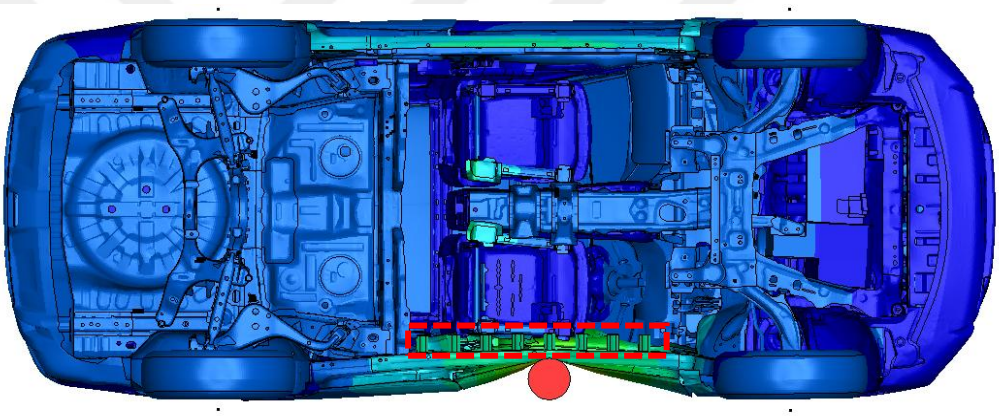
Şekil 4.188. Elektrikli araç direk çarpması yan görünüş

Batarya muhafazasının yer değiştirmesi Şekil 4.189'da verilmiştir.



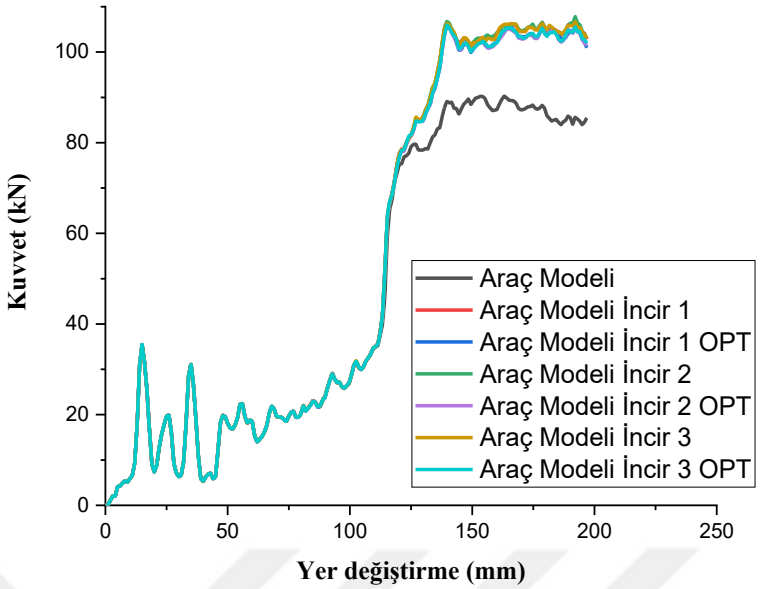
Şekil 4.189. Batarya Çerçevesinin direk ile teması

Batarya muhafazasında yer alan çarpışma kutusunun yer değiştirmesi Şekil 4.190'da verilmiştir.



Şekil 4.190. Çarpışma kutsunun direk ile teması

Elektrikli araç için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği şekil 4.191'de verilmiştir. Analiz sonucunda kuvvet-yer değiştirme grafiğinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.48'de verilmiştir. Çizelge 4.48'deki veriler incelendiğinde, optimize edilen tüm modellerin referans kıyasla çarpışma performansında belirgin bir iyileşme sağladığı görülmektedir; özellikle enerji sönümleme kapasitesinde referans modelin 9,191 kJ'lik değerine karşılık, İncir 1 optimizasyon modeli 10,283 kj'lik enerji sönümleme sağlamıştır. Optimizasyon modelleri ana modelden daha düşük kütlede benzer enerji sönümlemeleri sağlamıştır.

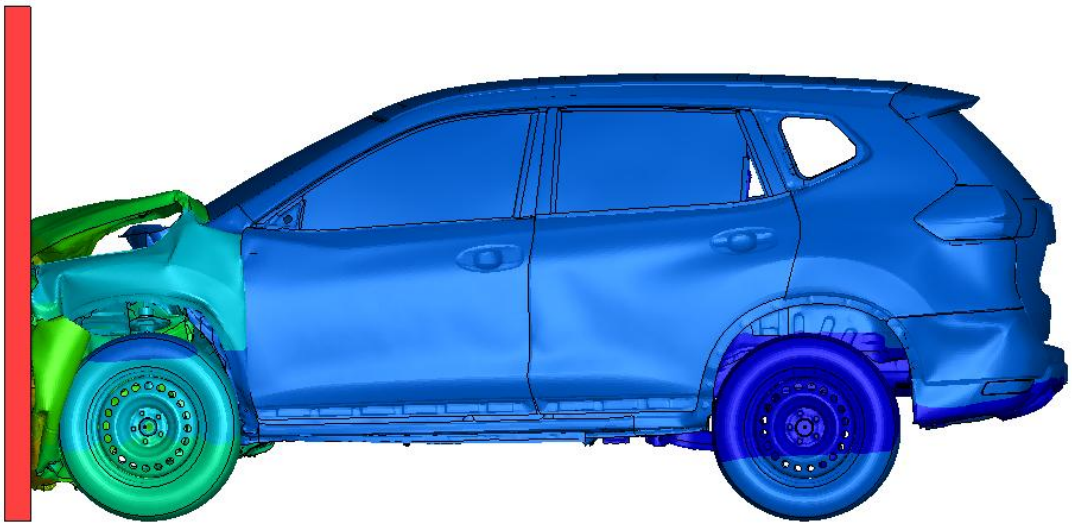


Şekil 4.191. Elektrikli araç çarpışma anına ait Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği

Çizelge 4.48. Elektrikli araç çarpışması sonuçları

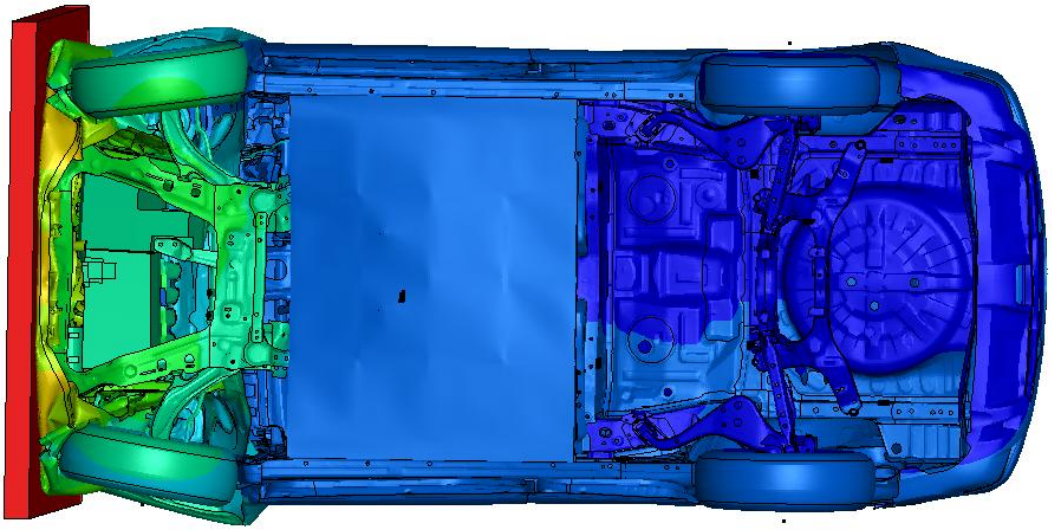
	Araç Modeli	Araç Model İncir 1	Araç Model İncir 1 OPT	Araç Model İncir 2	Araç Model İncir 2 OPT	Araç Model İncir 3	Araç Model İncir 3 OPT
Maksimum kuvvet (kN)	90,262	107,075	106,293	107,815	105,925	106,679	105,943
Ortalama Kuvvet (kN)	46,692	52,648	52,224	52,684	52,164	52,656	52,223
Yer değiştirme (mm)	196,854	196,881	196,880	196,903	196,906	196,902	196,902
Enerji Sönümleme (kJ)	9,191	10,365	10,282	10,374	10,271	10,368	10,283
% Enerji Sönümleme		12,773	11,87	12,871	11,75	12,806	11,88

Çarpışma analizleri içerisinden önden çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler %100 bariyer ve %40 konumlandırılmış bariyer ile gerçekleştirilmiştir. 56 km/saat hızla araç sabit duvara çarpıttırılmıştır.



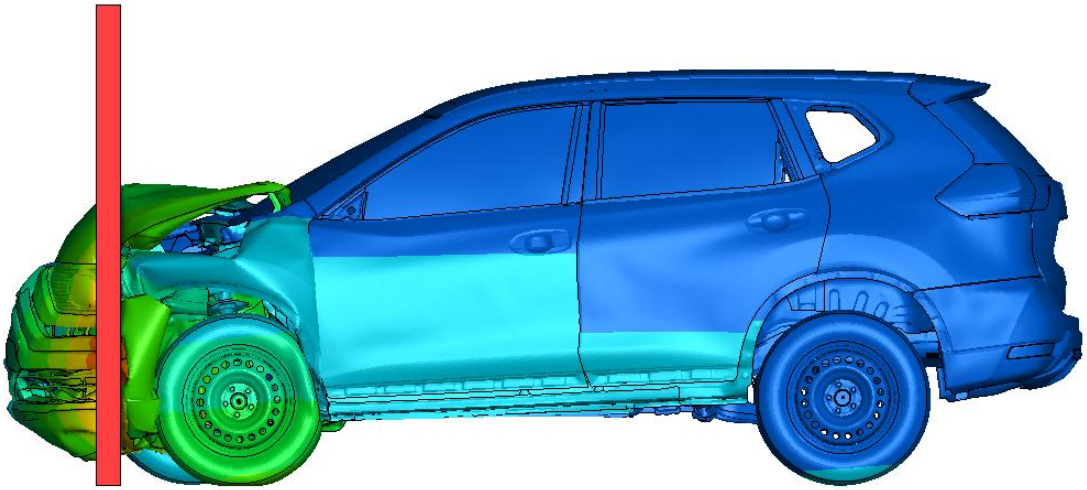
Şekil 4.391. %100 Bariyer Önden Çarpışma Yan Görünüm

Şekil 4.191'de %100 bariyere önden çarpmanın yan görünüşünde yer değiştirme durumları verilmiştir.



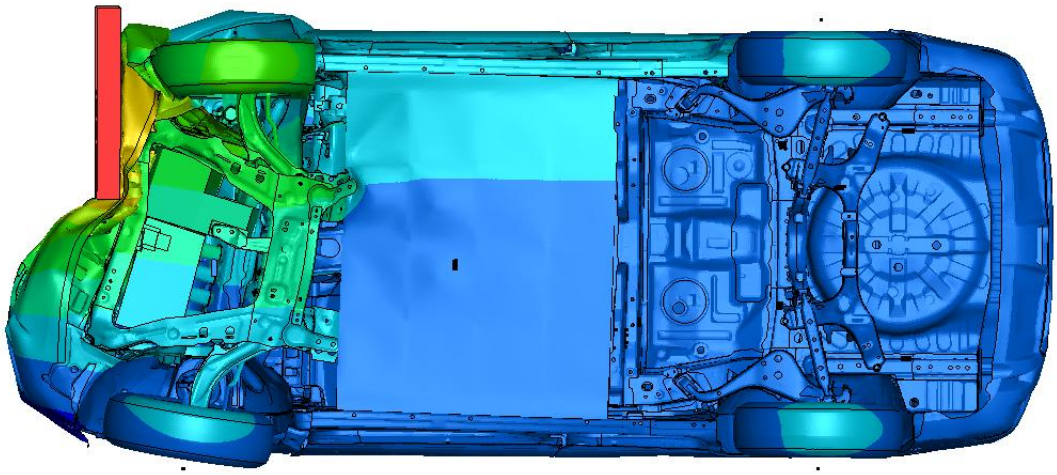
Şekil 4.194. %100 Bariyer Önden Çarpışma Alt Görünüm

Şekil 4.192'de %100 bariyere önden çarpmanın alt görünüşünde yer değiştirme durumları verilmiştir.



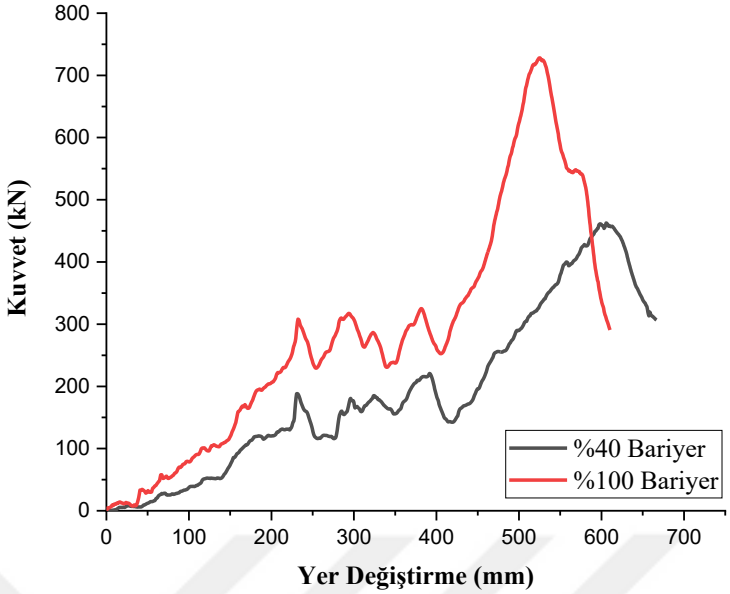
Şekil 4.193. %40 Bariyer Önden Çarpışma Yan Görünüm

Şekil 4.193'te %40 bariyere önden çarpmanın yan görünüşünde yer değiştirme durumları verilmiştir.



Şekil 4.194. %40 Bariyer Önden Çarpışma Alt Görünüm

Şekil 4.194'te %40 bariyere önden çarpmanın alt görünüşünde yer değiştirme durumları verilmiştir.



Şekil 4.195. Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

Şekil 4.195'te %40 ve %100 bariyere önden çarpmaya ait kuvvet yer değiştirme eğrisi verilmiştir. Çizelge 4.56'da analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.49. Önden Çarpışma Analiz Sonuçları

	%100 Bariyer	%40 Bariyer
Maksimum kuvvet (kN)	728,091	462,7875
Ortalama Kuvvet (kN)	304,5323	194,5603
Yer değiştirme (mm)	610,3621	666,7288
Enerji Sönümleme (kJ)	185,8749	129,7189

Önden çarpma analizleri neticesinde elde edilen veriler incelendiğinde, %100 bariyer senaryosunda yapının tüm enerji sönümleme kapasitesini kullanarak 728,09 kN maksimum kuvvet ve 185,87 kJ enerji sönümleme değerlerine ulaşmıştır. Buna karşın, %40 bariyer çarpışma durumunda darbe yükünün sınırlı bir alana odaklanması nedeniyle maksimum kuvvetin 462,78 kN seviyesine gerilediği, ancak yer değiştirme 666,72 mm ile tam örtüşmeli duruma göre yaklaşık %9 oranında arttığı gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu doktora tez çalışmasında, elektrikli araçların pasif güvenlik sistemlerinin geliştirilmesine yönelik olarak, yapay zekâ tabanlı optimizasyon algoritmaları ve eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak yenilikçi çarpışma kutusu tasarımları geliştirilmiş ve kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, elektrikli araçlarda hafiflik gereksinimi ile yüksek enerji sönümleme kapasitesi arasındaki dengeyi sağlayan, üretilebilir ve yüksek performanslı yapısal bileşenlerin tasarlanmasıdır. Bu kapsamda, doğadan ilham alan çok hücreli geometriler, kristal yapı algoritması ve kaotik haritalar kullanılarak hibrit ve özgün bir optimizasyon çerçevesi oluşturulmuştur.

Tez kapsamında geliştirilen çarpışma kutuları, PLA ve ABS malzemeleri kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş ve statik basma testleri ile deneysel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sayısal verilerle karşılaştırılmış ve kuvvet–yer değiştirme eğrileri açısından PLA ile üretilen çarpışma kutularında uyum sağlanmıştır. ABS ile üretilen çarpışma kutuları kırılma gözlemlendiği andan sonra farklı davranışlar sergilemiştir ve optimizasyon çalışmaları için yeterli performansı göstermemiştir. Çarpışma kutusu optimizasyonunda ve elektrikli araç uygulamasında PLA malzeme ile üretilen çarpışma kutuları kullanılmıştır.

Optimizasyon sürecinde, kristal yapı algoritmasının kaotik haritalar ile hibritleştirilmesi sayesinde algoritmanın yakınsama hızı ve küresel arama kabiliyeti önemli ölçüde artırılmıştır. Geliştirilen algoritma hem test fonksiyonları hem de basınçlı kap, çeki-bası yayı, üç çubuk kafes yapı, dişli takımı ve kaynaklı kiriş gibi klasik mühendislik tasarım problemleri üzerinde test edilmiş ve literatürde yaygın olarak kullanılan meta-sezgisel algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen algoritmanın rekabetçi olduğunu ve kaotik haritalı hibrit algoritmaların, kristal yapı algoritmasından üstün performans sergilediğini ve literatürdeki diğer algoritmalara rekabetçi olduğunu ortaya koymuştur.

Çarpışma kutularının optimizasyonunda toplam enerji sönümlenmesi %15 oranında artırılırken, maksimum çarpma kuvveti gibi yolcu güvenliği açısından kritik parametreler %15 azaltılmıştır. Optimizasyon sonuçları, geliştirilen geometrilerin hem daha düşük

kütleye sahip olduğunu hem de enerji sönümleme verimliliğinin artırıldığını göstermiştir. Bu durum, elektrikli araçlarda menzil artışı ve batarya güvenliği açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır.

Optimum olarak elde edilen çarpışma kutusu tasarımları, elektrikli araç benzetimi altında sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve araç seviyesinde çarpışma davranışına etkileri değerlendirilmiştir. Araç simülasyonu sonuçları, optimize edilmiş çarpışma kutularının batarya bölgesine iletilen kinetik enerjiyi sönümlemeye %12 oranında katkı sağlamıştır. Bu sonuç, geliştirilen tasarımların yalnızca bileşen düzeyinde değil, araç bütününde de etkin bir pasif güvenlik performansı sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar yarı statik basma testleri ile sınırlı tutulmuş olup, yüksek hızlı dinamik çarpışma testleri kapsam dışı bırakılmıştır. Eklemeli imalat sürecinde yalnızca PLA ve ABS malzemeleri kullanılmış, metal ve kompozit esaslı malzemeler değerlendirilmemiştir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen çarpışma kutusu tasarımlarının yüksek hızlı dinamik çarpışma testleri ile deneysel olarak doğrulanması önerilmektedir. Bununla birlikte metal ve kompozit esaslı eklemeli imalat malzemeleri kullanılarak çok malzemeli ve fonksiyonel derecelendirilmiş yapıların geliştirilmesi, çarpışma performansının daha da iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca önerilen optimizasyon algoritmasının çok amaçlı ve gerçek zamanlı araç tasarım süreçlerine entegre edilmesi, elektrikli araç güvenliği alanında önemli bir araştırma yönü olarak değerlendirilmektedir.

Genel olarak bu tez çalışması, elektrikli araçların pasif güvenlik sistemlerinde kullanılan çarpışma kutularının tasarım ve optimizasyonunu; yapay zekâ tabanlı algoritmalar, eklemeli imalatla üretilebilir doğadan ilham alan geometriler ve sonlu elemanlar analizi destekli vekil modelleme yaklaşımlarını entegre eden bütüncül bir çerçeve içerisinde ele almaktadır. Bu kapsamda geliştirilen yöntem ve elde edilen sonuçlar, hafiflik ve yüksek enerji sönümleme gereksinimlerini bir arada sağlayan yapısal bileşenlerin tasarımı için literatüre özgün ve yol gösterici bir katkı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, *153*(April), 106795. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795

Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., & Gandomi, A. H. (2021). The Arithmetic Optimization Algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *376*, 113609. https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609

Agnusdei, L., & Del Prete, A. (2022). Additive manufacturing for sustainability: A systematic literature review. *Sustainable Futures*. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100098

Akinsooto, O., Ogunnowo, E. O., & Ezeanochie, C. C. (2025). The Future of Electric Vehicles: Technological Innovations and Market Trends. *Engineering and Technology Journal*. https://doi.org/10.47191/etj/v10i04.04

Albak, E. İ. (2022). Optimization for multi-cell thin-walled tubes under quasi-static three-point bending. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *44*(5). https://doi.org/10.1007/s40430-022-03525-8

Albak, E. İ., Solmaz, E., Yıldız, A. R., & Öztürk, F. (2021b). Multiobjective crashworthiness optimization of graphene type multi-cell tubes under various loading conditions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *43*(5), 266. https://doi.org/10.1007/s40430-021-02979-6

Askari, Q., Younas, I., & Saeed, M. (2020). Political Optimizer: A novel socio-inspired meta-heuristic for global optimization. *Knowledge-Based Systems*, *195*, 105709. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.105709

Avci, B., Girotra, K., & Netessine, S. (2013). Electric Vehicles with a Battery Switching Station: Adoption and Environmental Impact. *Econometric Modeling: Agriculture*. https://doi.org/10.2139/ssrn.2005092

Ayyarao, T. S. L. V., Ramakrishna, N. S. S., Elavarasan, R. M., Polumahanthi, N., Rambabu, M., Saini, G., Khan, B., & Alatas, B. (2022). War Strategy Optimization Algorithm: A New Effective Metaheuristic Algorithm for Global Optimization. *IEEE Access*, *10*, 25073–25105. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3153493

Bates, S. R. G., Farrow, I. R., & Trask, R. S. (2016). 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption. *Materials and Design*, *112*, 172–183. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.062

Braik, M., Hammouri, A., Atwan, J., Al-Betar, M. A., & Awadallah, M. A. (2022). White Shark Optimizer: A novel bio-inspired meta-heuristic algorithm for global optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, *243*, 108457. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108457

Chhantyal, B., Khanal, S., & Maharjan, S. (2025). Comparison of particle swarm optimization and Bayesian optimization algorithms for the shape optimization of the star crash box. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. https://doi.org/10.1177/09544070251343338

Demirci, E., & Yıldız, A. R. (2018). An investigation of the crash performance of magnesium, aluminum and advanced high strength steels and different cross-sections for vehicle thin-walled energy absorbers. *Materials Testing*, *60*(7–8), 661–668. https://doi.org/10.3139/120.111201

Deng, X., & Cao, L. (2022). Crushing analysis and crashworthiness optimisation for a novel bioinspired multicell filled tubular structure. *International Journal of*

Crashworthiness, *27*(2), 414–429. https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1807688
Deng, X., Liu, W., & Jin, L. (2018). On the crashworthiness analysis and design of a lateral corrugated tube with a sinusoidal cross-section. *International Journal of Mechanical Sciences*, *141*(December 2017), 330–340. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.03.001
Dey, A., Eagle, I. N. R., & Yodo, N. (2021). A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. https://doi.org/10.3390/jmmp5030069
Dong, H. peng, Gao, G. jun, Xie, S. chao, & Li, J. (2015). Collision performance of bitubular tubes with diaphragms. *Journal of Central South University*, *22*(9), 3657–3665. https://doi.org/10.1007/s11771-015-2907-x
Eryildiz, M. (2023). Comparison of notch fabrication methods on the impact strength of FDM-3D-printed PLA specimens. *Materials Testing*, *65*(3), 423–430. https://doi.org/10.1515/mt-2022-0306
Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert Systems with Applications*, *152*, 113377. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377
Günaydın, K., Gülcan, O., & Türkmen, H. S. (2023). Experimental and numerical crushing performance of crash boxes filled with re-entrant and anti-tetrachiral auxetic structures. *International Journal of Crashworthiness*, *28*(5), 649–663. https://doi.org/10.1080/13588265.2022.2115962
Gürses, D., Mehta, P., Sait, S. M., & Yildiz, A. R. (2022). African vultures optimization algorithm for optimization of shell and tube heat exchangers. *Materials Testing*, *64*(8), 1234–1241. https://doi.org/10.1515/mt-2022-0050
Haro, E. H., Oliva, D., Beltrán, L. A., & Casas-Ordaz, A. (2025). Enhanced differential evolution through chaotic and Euclidean models for solving flexible process planning. *Knowledge-Based Systems*, *314*(February), 113189. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113189
Hashim, F. A., Hussain, K., Houssein, E. H., Mabrouk, M. S., & Al-Atabany, W. (2020). Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*. https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z
Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, *97*, 849–872. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028
Hou, W., He, P., Yang, Y., & Sang, L. (2023). Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, *247*(January), 108198. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108198
Huang, L., Ding, S., Yu, S., Wang, J., & Lu, K. (2016). Chaos-enhanced Cuckoo search optimization algorithms for global optimization. *Applied Mathematical Modelling*, *40*(5–6), 3860–3875. https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.10.052
Hussain, K., Mohd Salleh, M. N., Cheng, S., & Shi, Y. (2019). Metaheuristic research: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review*, *52*(4), 2191–2233. https://doi.org/10.1007/s10462-017-9605-z
Iulia, V., & Szabo, L. (2022). A Brief History of Electric Vehicles. *Journal of Computer Science and Control Systems* , *15*(1), 19–26.
Jacob, J., Simunec, D. P., Kandjani, A., Trinchi, A., & Sola, A. (2024). A Review of Fused Filament Fabrication of Metal Parts (Metal FFF): Current Developments and

Future Challenges. *Technologies*. https://doi.org/10.3390/technologies12120267
Jain, M., Maurya, S., Rani, A., & Singh, V. (2018). Owl search algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm for global optimization. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, *34*(3), 1573–1582. https://doi.org/10.3233/JIFS-169452
Jusuf, A., Jarwadi, M. H., Hastungkorojati, D. G., Gunawan, L., Akbar, M., Zakaria, K., Izzaturrahman, M., & Palar, P. (2024). Design Exploration and Optimization of a Multi-Corner Crash Box under Axial Loading via Gaussian Process Regression. *International Journal of Technology*. https://doi.org/10.14716/ijtech.v15i6.7278
Kamboj, V. K., Nandi, A., Bhadoria, A., & Sehgal, S. (2020). An intensify Harris Hawks optimizer for numerical and engineering optimization problems. *Applied Soft Computing Journal*, *89*, 106018. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106018
Kanishka, K., & Acherjee, B. (2023). Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.024
Kmich, M., Ghouate, N. El, Bencharqui, A., Karmouni, H., Sayyouri, M., Askar, S. S., & Abouhawwash, M. (2025). Chaotic Puma Optimizer Algorithm for controlling wheeled mobile robots. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *63*(January), 101982. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101982
Közkurt, C., Özbay, H., Dalcalı, A., & Tektaş, M. (2020). Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, *3*(1), 34–50. https://dergipark.org.tr/tr/pub/jitsa/article/712337
Kumar, S., Singh, R., Singh, T., & Batish, A. (2020). Fused filament fabrication: A comprehensive review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *36*, 794–814. https://doi.org/10.1177/0892705720970629
Kumar, S., Yildiz, B. S., Mehta, P., Panagant, N., Sait, S. M., Mirjalili, S., & Yildiz, A. R. (2023). Chaotic marine predators algorithm for global optimization of real-world engineering problems. *Knowledge-Based Systems*, *261*. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110192
Lebrouhi, B., Khattari, Y., Lamrani, B., Maaroufi, M., Zeraouli, Y., & Kousksou, T. (2021). Key challenges for a large-scale development of battery electric vehicles: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103273
Li, R., Pan, Y., Zhang, X., Dai, W., Liu, B., & Li, J. (2024). Mechanical safety prediction of a battery-pack system under low speed frontal impact via machine learning. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, *160*(October 2023), 65–75. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.12.031
Liang, H., Hao, W., Sun, H., Pu, Y., Zhao, Y., & Ma, F. (2022). On design of novel bionic bamboo tubes for multiple compression load cases. *International Journal of Mechanical Sciences*, *218*(January), 107067. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107067
Liu, W., Placke, T., & Chau, K. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016
Magliaro, J., Altenhof, W., & Alpas, A. T. (2022). A review of advanced materials, structures and deformation modes for adaptive energy dissipation and structural crashworthiness. *Thin-Walled Structures*, *180*(January), 109808. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109808
Mahdavi-Meymand, A., & Zounemat-Kermani, M. (2022). Homonuclear Molecules

Optimization (HMO) meta-heuristic algorithm. *Knowledge-Based Systems*, *258*, 110032. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110032

Mansouri, H., Elkhanchouli, K., Elghouate, N., Bencherqui, A., Tahiri, M. A., Karmouni, H., Sayyouri, M., Moustabchir, H., Askar, S. S., & Abouhawwash, M. (2025). A modified black-winged kite optimizer based on chaotic maps for global optimization of real-world applications. *Knowledge-Based Systems*, *318*(January), 113558. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113558

Memane, K., Mashalkar, A., & Kumar, P. (2023). A Review Thin-Wall-Tube Energy-Absorbing Structure : Crash-Box. *Journal of Physics: Conference Series*, *2426*(1), 12060. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2426/1/012060

Miguel, M., Leite, M., Ribeiro, A. M. R., Deus, A. M., Reis, L., & Vaz, M. F. (2019). Failure of polymer coated nylon parts produced by additive manufacturing. *Engineering Failure Analysis*, *101*, 485–492. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.005

Mirjalili, S. (2015). Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. *Knowledge-Based Systems*, *89*, 228–249. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.006

Mitić, M., Vuković, N., Petrović, M., & Miljković, Z. (2015). Chaotic fruit fly optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, *89*, 446–458. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.08.010

Moghaddam, M., Kheradpisheh, A., & Asgari, M. (2021). A basic design for automotive crash boxes using an efficient corrugated conical tube. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *235*, 1835–1848. https://doi.org/10.1177/0954407021990921

Mustaffa, Z., Al-Qadami, E. H. H., Topa, A., Budiman, B. A., Mohd Hamka, N. A., Bayu Endrayana Dharmowijoyo, D., & Mohammad Razi, M. A. (2024). Numerical assessment of the side impacts on lithium-ion battery module integrated with honeycomb reinforcement. *Engineering Failure Analysis*, *161*(April), 108290. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108290

Nadimi-Shahraki, M. H., Taghian, S., & Mirjalili, S. (2021). An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems. *Expert Systems with Applications*, *166*(August 2020), 113917. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113917

Özbek, Ö., Doğan, N. F., & Bozkurt, Ö. Y. (2020). An experimental investigation on lateral crushing response of glass/carbon intraply hybrid filament wound composite pipes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *42*(7), 389. https://doi.org/10.1007/s40430-020-02475-3

Pamidimukkala, A., Kermanshachi, S., Rosenberger, J., & Hladik, G. (2023). Evaluation of barriers to electric vehicle adoption: A study of technological, environmental, financial, and infrastructure factors. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100962

Pan, Y., Xiong, Y., Dai, W., Diao, K., Wu, L., & Wang, J. (2022). Crush and crash analysis of an automotive battery-pack enclosure for lightweight design. *International Journal of Crashworthiness*, *27*(2), 500–509. https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1812253

Pan, Y., Xiong, Y., Wu, L., Diao, K., & Guo, W. (2021). Lightweight Design of an Automotive Battery-Pack Enclosure via Advanced High-Strength Steels and Size Optimization. *International Journal of Automotive Technology*, *22*(5), 1279–1290. https://doi.org/10.1007/s12239-021-0112-5

Peng, Y., Gu, S., Liang, Y., Ouyang, K., Li, Y., Wang, K., Wu, G., & Fan, C. (2026). Wave Optics Optimizer: A novel meta-heuristic algorithm for engineering optimization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *152*, 109337. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2025.109337

Qiu, N., Gao, Y., Fang, J., Feng, Z., Sun, G., & Li, Q. (2016). Theoretical prediction and optimization of multi-cell hexagonal tubes under axial crashing. *Thin-Walled Structures*, *102*, 111–121. https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.01.023

Saber, A., Amer, A., Shehata, A., El-Gamal, H., & Abd_Elsalam, A. (2025). Recent Developments in Additively Manufactured Crash Boxes: Geometric Design Innovations, Material Behavior, and Manufacturing Techniques. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/app15137080

Sadollah, A., Eskandar, H., Lee, H. M., Yoo, D. G., & Kim, J. H. (2015). Water cycle algorithm: A detailed standard code. *SoftwareX*, *5*, 37–43. https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.03.001

Sanguesa, J., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F., & Márquez-Barja, J. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*. https://doi.org/10.3390/smartcities4010022

Saremi, S., Mirjalili, S., & Lewis, A. (2017). Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application. *Advances in Engineering Software*, *105*, 30–47. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.01.004

Selmi, T., Khadhraoui, A., & Cherif, A. (2022). Fuel cell–based electric vehicles technologies and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*, 78121–78131. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23171-w

Sepasgozar, S., Shi, A., Yang, L., Shirowzhan, S., & Edwards, D. (2020). Additive Manufacturing Applications for Industry 4.0: A Systematic Critical Review. *Buildings*. https://doi.org/10.3390/buildings10120231

Shaikh, S. A., Taufique, M. F. N., Balusu, K., Kulkarni, S. S., Hale, F., Oleson, J., Devanathan, R., & Soulami, A. (2024). Finite Element Analysis and Machine Learning Guided Design of Carbon Fiber Organosheet-Based Battery Enclosures for Crashworthiness. *Applied Composite Materials*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s10443-024-10218-z

Shang-Guan, Y. P., Wang, J. S., Sun, Y. F., Li, Y. X., & Yan, B. (2025). Two dimensional chaotic mapping zebra optimization algorithm in polar coordinate system for debutanizer column feature selection and prediction model. *Results in Engineering*, *28*(July), 107127. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107127

Sharma, S., Panwar, A., & Tripathi, M. (2020). Storage technologies for electric vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.004

Simunec, D. P., & Sola, A. (2022). Emerging Research in Conductive Materials for Fused Filament Fabrication: A Critical Review. *Advanced Engineering Materials*, *24*. https://doi.org/10.1002/adem.202101476

Sood, M., & Wu, C.-M. (2023). Influence of 3D printed structures on energy absorption ability of brittle polymers under dynamic cyclic loading. *Express Polymer Letters*, *17*(4), 390–405. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2023.28

Sun, X., Li, Z., Wang, X., & Li, C. (2019). Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies*. https://doi.org/10.3390/en13010090

Tabacu, S., & Ducu, C. (2018). Experimental testing and numerical analysis of FDM multi-cell inserts and hybrid structures. *Thin-Walled Structures*, *129*(April), 197–

212. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.009
Taghavi, A. M., & Shahrouzi, M. (2024). Optimal design of spatial structures by a novel meta-heuristic algorithm: Sound energy optimizer. *Structures*, *70*, 107570. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107570
Talatahari, S., Azizi, M., Tolouei, M., Talatahari, B., & Sareh, P. (2021). Crystal Structure Algorithm (CryStAl): A Metaheuristic Optimization Method. *IEEE Access*, *9*, 71244–71261. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079161
Tian, Z., & Gai, M. (2024). Football team training algorithm: A novel sport-inspired meta-heuristic optimization algorithm for global optimization. *Expert Systems with Applications*, *245*, 123088. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123088
Veza, I., Syaifuddin, M., Idris, M., Herawan, S., Yusuf, A., & Fattah, I. (2024). Electric Vehicle (EV) Review: Bibliometric Analysis of Electric Vehicle Trend, Policy, Lithium-Ion Battery, Battery Management, Charging Infrastructure, Smart Charging, and Electric Vehicle-to-Everything (V2X). *Energies*. https://doi.org/10.3390/en17153786
Wang, G., Zhang, Y., Zheng, Z., Chen, H., & Yu, J. (2022). Crashworthiness design and impact tests of aluminum foam-filled crash boxes. *Thin-Walled Structures*. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109937
Wang, L., Cao, Q., Zhang, Z., Mirjalili, S., & Zhao, W. (2022). Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *114*, 105082. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105082
Wesselmecking, S., Kreins, M., Dahmen, M., & Bleck, W. (2022). Material oriented crash-box design – Combining structural and material design todoc_improve specific energy absorption. *Materials and Design*, *213*, 110357. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110357
Xilu, Z., Kong, C., Yang, Y., & Hagiwara, I. (2022). Reversed-Torsion-Type Crush Energy Absorption Structure and Its Inexpensive Partial-Heating Torsion Manufacturing Method Based on Origami Engineering. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, *144*(6). https://doi.org/10.1115/1.4052438
Xu, X., Rong, H., Trovati, M., Liptrott, M., & Bessis, N. (2018). CS-PSO: chaotic particle swarm optimization algorithm for solving combinatorial optimization problems. *Soft Computing*, *22*(3), 783–795. https://doi.org/10.1007/s00500-016-2383-8
Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., & Hermenean, K. (2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. *Composite Structures*, *200*(December 2017), 886–909. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.002
Yermurat, B., Seçgin, Ö., & Taşdemir, V. (2023). Multi-material additive manufacturing: investigation of the combined use of ABS and PLA in the same structure. *Materials Testing*. https://doi.org/10.1515/mt-2022-0368
Yildiz, B. S., Bureerat, S., Panagant, N., Mehta, P., & Yildiz, A. R. (2022). Reptile search algorithm and kriging surrogate model for structural design optimization with natural frequency constraints. *Materials Testing*, *64*(10), 1504–1511. https://doi.org/10.1515/mt-2022-0048
Yuan, L., Shi, H., Jiayao, & You, Z. (2019). Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles. *Thin-Walled Structures*.

https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.028
Yuzgec, U. (2025). Accelerated opposition learning based chaotic single candidate optimization algorithm: A new alternative to population-based heuristics. *Knowledge-Based Systems*, *314*(November 2024), 113169. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113169
Zeng, X., Wei, Y., Yu, Y., Hu, H., Tang, Q., & Hu, N. (2025). Assignment Technology Based on Improved Great Wall Construction Algorithm. In *Drones* (Vol. 9, Issue 2, p. 113). https://doi.org/10.3390/drones9020113
Zhang, C., & Ding, S. (2021). A stochastic configuration network based on chaotic sparrow search algorithm. *Knowledge-Based Systems*, *220*, 106924. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.106924
Zhang, W., Pan, K., Li, S., & Wang, Y. (2023). Special Forces Algorithm: A novel meta-heuristic method for global optimization. *Mathematics and Computers in Simulation*, *213*, 394–417. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.06.015
Zhang, X., Xiong, Y., Pan, Y., Du, H., & Liu, B. (2023). Crushing stress and vibration fatigue-life optimization of a battery-pack system. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *66*(3), 1–16. https://doi.org/10.1007/s00158-023-03510-2
Zhang, X., & Zhang, H. (2013). Energy absorption of multi-cell stub columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*, *68*, 156–163. https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.03.014
Zhang, Y. (2021). Chaotic neural network algorithm with competitive learning for global optimization. *Knowledge-Based Systems*, *231*, 107405. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107405
Zhang, Z., Sun, W., Zhao, Y., & Hou, S. (2018). Crashworthiness of different composite tubes by experiments and simulations. *Composites Part B: Engineering*, *143*, 86–95. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.021
Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Tamimi, Z. Al, Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *24*. https://doi.org/10.3390/s24092668