KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPI PROJELERİNDE KARAR VERME SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ VE BU SÜREÇLERİ YÖNETEBİLEN BİR YAZILIM PROGRAMI OLUŞTURULMASI

DOKTORA TEZİ

Mehmet YILMAZ

ŞUBAT 2025
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPI PROJELERİNDE KARAR VERME SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ VE BU SÜREÇLERİ YÖNETEBİLEN BİR YAZILIM PROGRAMI OLUŞTURULMASI

Mehmet YILMAZ
ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 / 02 /2025
Tezin Savunma Tarihi : 26 / 02 /2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tayfun DEDE
ORCID : - - -

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Yapı Projelerinde Karar Verme Süreçlerinin İncelenmesi ve Bu Süreçleri Yönetebilen Bir Yazılım Programı Oluşturulması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tayfun DEDE’ye teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Vedat TOĞAN’a ve Sayın Doç. Dr. Gökhan ÖZÇELİK’e, ayrıca eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tezimin değerlendirme sürecinde değerli desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Önder Halis BETTEMİR ve Doç. Dr. Semra ÇOMU YAPICI’ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, her adımımda arkamda duran, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Arzu YILMAZ ve babam Ekmel YILMAZ’a sonsuz teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım. Her daim desteğini esirgemeyen sevgili kardeşim Kağan YILMAZ’a ve akademik hayat serüvenime çıkmamda en büyük ilham kaynağım olan, bu yolculukta beni her daim yüreklendiren değerli dayım Ali MEYDAN’a gönülden teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin yazılma sürecinde bir an olsun desteğini esirgemeyen ve beni daima teşvik eden sevgili eşim Tuğba YILMAZ’a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Mehmet YILMAZ

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yapı Projelerinde Karar Verme Süreçlerinin İncelenmesi ve Bu Süreçleri Yönetebilen Bir Yazılım Programı Oluşturulması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tayfun DEDE’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/02/2025

Mehmet YILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET X
SUMMARY XI
ŞEKİLLER DİZİNİ XII
TABLOLAR DİZİNİ XIX
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XXX
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Araştırma Boşluğu 4
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 7
1.4. Literatür Taraması 8
1.4.1. Zaman-Maliyet Literatür Taraması 12
1.4.2. Zaman-Maliyet-Kalite Literatür Taraması 14
1.4.3. Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski ve Kalite Literatür Taraması 17
1.4.4. Zaman-Maliyet-Çevresel Etki ve Kalite Literatür Taraması 19
1.5. Metasezgisel Algoritmalar 22
1.5.1. Rao Serileri 23
1.5.2. Gri Kurt Algoritması 24
1.5.3. Balina Optimizasyon Algoritması 25
1.6. Tezin İçeriği 27
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 29
2.1. Proje Yönetim Parametreleri 29
2.2. Amaç Fonksiyonlarının Matematiksel Formülasyonu 29
2.3. Optimizasyon Kısıtları 33
2.4. Proje Yönetim Parametrelerinin Çok Amaçlı Optimizasyonu 33
2.5. Kalabalık Mesafe Tabanlı Baskın Olmayan Sıralama Operatörü (NDSII) 35
2.5.1. NDSII Operatörünün Rao-1 ve Rao-2 Algoritmaları ile Entegrasyonu 37

2.5.2. NDSII Operatörünün GWO ve WOA Algoritmaları ile Entegrasyonu 39
2.6. Referans Nokta Tabanlı Baskın Olmayan Sıralama Operatörü (NDSIII) 41
2.6.1. NDSIII Operatörünün Rao-1 ve Rao-2 Algoritmaları ile Entegrasyonu 44
2.6.2. NDSIII Operatörünün GWO ve WOA Algoritmaları ile Entegrasyonu 47
2.7. Güçlendirilmiş Pareto Yöntemi 50
2.7.1. SP Operatörünün Rao-1 ve Rao-2 Algoritmaları ile Entegrasyonu 52
2.7.2. SP Operatörünün GWO ve WOA Algoritmaları ile Entegrasyonu 54
2.8. Operatöleri Değiştirilmiş Güçlendirilmiş Pareto Operatörü (MSP) 58
2.8.1. MSP Operatörünün Algoritmalara Entegrasyonu 60
2.9. BHARAT Yöntemi ile Karar Verme Süreci 62
2.10. Çok Amaçlı Optimizasyon Performans Ölçütleri 63
2.11. Geliştirilen Yazılım Programı 66
2.11.1. ProjectOptima Programının Temel Özellikleri ve Kullanımı 67
2.11.2. ProjectOptimaMCDM Programının Temel Özellikleri ve Kullanımı 71
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 74
3.1. Çok Amaçlı İnşaat Proje Problemleri İçin Sayısal Örnekler 74
3.2. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemleri 75
3.2.1. 29 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemi 76
3.2.2. 29 Aktivite TCTP Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 82
3.2.3. 69 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemi 89
3.2.4. 69 Aktivite TCTP Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 95
3.2.5. 290 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemi 100
3.2.6. 290 Aktivite TCTP Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 105
3.2.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Problemleri Genel Değerlendirme 109
3.2.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi 110
3.3. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemleri 114
3.3.1. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemi 115
3.3.2. 18 Aktivite TCQTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 123
3.3.3. 60 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemi 129

3.3.4. 60 Aktivite TCQTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 137
3.3.5. 180 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemi 144
3.3.6. 180 Aktivite TCQTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 149
3.3.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Problemleri Genel Değerlendirme 154
3.3.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi 155
3.4. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Ödünleşim Problemleri 159
3.4.1. 25 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi 160
3.4.2. 25 Aktivite TCETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 167
3.4.3. 29 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi 174
3.4.4. 29 Aktivite TCETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 181
3.4.5. 250 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi 186
3.4.6. 250 Aktivite TCETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 192
3.4.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Problemleri Genel Değerlendirme 197
3.4.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi 199
3.5. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemleri 204
3.5.1. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski (ICR=200$) Ödünleşim Problemi 205
3.5.2. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=200$) İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 212
3.5.3. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski (ICR=0$) Ödünleşim Problemi 219
3.5.4. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=0$) İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 223
3.5.5. 180 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi 229
3.5.6. 180 Aktivite TCSRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 234

3.5.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Problemleri Genel Değerlendirme 239
3.5.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi 240
3.6. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemleri 244
3.6.1. 29 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi 245
3.6.2. 29 Aktivite TCQETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 252
3.6.3. 69 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi 258
3.6.4. 69 Aktivite TCQETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 267
3.6.5. 290 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi 273
3.6.6. 290 Aktivite TCQETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 279
3.6.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Problemleri Genel Değerlendirme 284
3.6.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi 285
3.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemleri 289
3.7.1. 13 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi 290
3.7.2. 13 Aktivite TCQSRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 298
3.7.3. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi 304
3.7.4. 18 Aktivite TCQSRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 311
3.7.5. 180 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi 317
3.7.6. 180 Aktivite TCQSRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 323
3.7.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Problemleri Genel Değerlendirme 328
3.7.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Optimizasyonunda Bharat ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi 330

3.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemleri 334
3.8.1. 25 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi 334
3.8.2. 25 Aktivite TCQESRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 343
3.8.3. 250 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi 348
3.8.4. 250 Aktivite TCQESRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi 355
3.8.5. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Problemleri Genel Değerlendirme 359
3.8.6. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi 360
3.9. Çok Amaçlı İnşaat Proje Planlama Problemleri Genel Değerlendirme 363
4. SONUÇLAR 367
5. ÖNERİLER 371
6. KAYNAKLAR 372
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

YAPI PROJELERİNDE KARAR VERME SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ VE BU SÜREÇLERİ YÖNETEBİLEN BİR YAZILIM PROGRAMI OLUŞTURULMASI

Mehmet YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Tayfun DEDE
2025, 380 Sayfa

İnşaat projelerinin optimizasyonunda karşılaşılan çok amaçlı planlama problemlerinin çözümünde genellikle metasezgisel algoritmaların geliştirilmesine odaklanılmış, ancak algoritmaların performansını doğrudan etkileyen çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin geliştirilmesine yeterli önem verilmemiştir. Bu tez çalışmasında metasezgisel algoritmaların performansını artırmak amacıyla, referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) ve güçlendirilmiş pareto (SP) operatörleri farklı metasezgisel algoritmalara entegre edilmiş, ayrıca dört ve daha fazla amaçlı problemler için operatörleri değiştirilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) operatörü geliştirilmiştir. Zaman, maliyet, kalite, çevresel etki ve güvenlik riski amaçlarını içeren yedi farklı problem sınıfı için Gri kurt optimizasyonu, Balina optimizasyon algoritması ve Rao serileri kullanılarak, literatürdeki algoritmalara göre çok daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha kaliteli sonuçlar elde edilmiştir. Teorik çalışmaların pratiğe aktarılması için Matlab ve MS Project entegrasyonlu bir yazılım geliştirilmiş, böylece inşaat sektöründe proje optimizasyonuna yenilikçi bir çözüm sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çok amaçlı optimizasyon, Seçme ve eleme operatörleri, Matlab-MS Project, İnşaat projesi planlama, Karar verme teknikleri

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF DECISION-MAKING PROCESSES IN CONSTRUCTION PROJECTS AND DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PROGRAM THAT CAN MANAGE THESE PROCESSES

Mehmet YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Tayfun DEDE
2025, 380 Pages

In the optimization of construction projects, multi-objective planning problems have generally focused on developing metaheuristic algorithms; however, insufficient attention has been given to developing multi-objective selection and elimination operators that directly affect algorithm performance. In this thesis study, to improve the performance of metaheuristic algorithms, reference-based non-dominated sorting (NDSIII) and strength pareto (SP) operators were integrated with different metaheuristic algorithms, and a modified strengthened Pareto (MSP) operator was developed for four and more objective problems. Using Grey Wolf Optimization, Whale Optimization Algorithm and Rao series for seven different problem classes involving time, cost, quality, environmental impact, and safety risk objectives, higher quality solutions were obtained with significantly fewer function evaluations compared to existing algorithms in the literature. A software with Matlab and MS Project integration was developed to transform theoretical studies into practice, thus providing an innovative solution for project optimization in the construction industry.

Key Words: Multi-objective optimization, Selection and elimination operators, MATLAB-MS Project, Construction project planning, Decision making techniques

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Metasezgisel algoritmalar 23
Şekil 2. Aktiviteler arası ilişkiler 30
Şekil 3. NDSII operatöründe sıralama ve kalabalık mesafe 36
Şekil 4. NDSIIRao-1 ve NDSIIRao-2 algoritmaları akış diyagramı 38
Şekil 5. NDSIIWOA algoritması akış diyagramı 40
Şekil 6. NDSIIGWO algoritması akış diyagramı 41
Şekil 7. NDSIIIRao-1 ve NDSIIIRao-2 algoritmalarının akış diyagramı 46
Şekil 8. NDSIIIGWO algoritması akış diyagramı 49
Şekil 9. NDSIIIWOA algoritması akış diyagramı 50
Şekil 10. SPRao-1 ve SPRao-2 algoritmalarının akış diyagramı 54
Şekil 11. SPGWO algoritmasının akış diyagramı 56
Şekil 12. SPWOA algoritmasının akış diyagramı 57
Şekil 13. MSP ile entegre edilen algoritmalara ait akış diyagramı 61
Şekil 14. Geliştirilen yazılıma ait çalışma döngüsü 67
Şekil 15. ProjectOptima programı başlatmaya ait görsel 68
Şekil 16. ProjectOptima programı algoritma ve optimizasyonda kullanılacak amaç fonksiyonu seçimi 69
Şekil 17. ProjectOptima programı optimizasyonda kullanılacak MS Project programı seçimi 69
Şekil 18. ProjectOptima programı optimizasyon süreci ve kayıt dosyası 70
Şekil 19. ProjectOptima programında optimizasyonda MS Project'in kullanımı 70
Şekil 20. ProjectOptimaMCDM programında çok kriterli karar verme süreci 72
Şekil 21. ProjectOptimaMCDM programında MS Project iş takvimi güncellemesi 72
Şekil 22. Seçilen pareto çözümüne göre güncellenen iş takvimi 73
Şekil 23. Çok amaçlı proje planlama problemleri 75
Şekil 24. 29 aktiviteli TCTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri 78
Şekil 25. SPRAO1 tarafından üretilmiş 29 aktivite zaman-maliyet pareto grafiği 81
Şekil 26. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için geliştirilen algoritmaların C-metrik kullanılarak MOSGO algoritması ile performans karşılaştırması 84

Şekil 27. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için, her algoritmanın kendi içinde ortalama C-metrik performans karşılaştırması 84
Şekil 28. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların ortalama C-metrik performansları karşılaştırması 85
Şekil 29. 29 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 88
Şekil 30. 69 aktiviteli TCTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri 91
Şekil 31. SPWOA tarafından üretilmiş 69 aktivite zaman-maliyet pareto grafiği 94
Şekil 32. 69 aktivite zaman-maliyet problemi için geliştirilen algoritmaların C-metrik kullanılarak MOSGO algoritması ile performans karşılaştırması 97
Şekil 33. 69 aktivite zaman-maliyet problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 97
Şekil 34. 69 aktivite zaman-maliyet problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 98
Şekil 35. 69 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 100
Şekil 36. 290 aktiviteli TCTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri 102
Şekil 37. SPWOA tarafından üretilmiş 290 aktivite zaman-maliyet pareto grafiği 104
Şekil 38. 290 aktivite zaman-maliyet problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 106
Şekil 39. 290 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 108
Şekil 40. 29 aktiviteli TCTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 111
Şekil 41. 69 aktiviteli TCTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 112
Şekil 42. 290 aktiviteli TCTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 114
Şekil 43. 18 aktiviteli TCQTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman, maliyet ve maksimum kalite değerleri 119
Şekil 44. SPRAO2 tarafından üretilmiş 18 aktivite zaman-maliyet-kalite pareto grafiği 122
Şekil 45. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 125
Şekil 46. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 126

Şekil 47. 18 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 129
Şekil 48. 60 aktiviteli TCQTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman, maliyet ve maksimum kalite değerleri 132
Şekil 49. NDSIIIWOA tarafından üretilmiş 60 aktivite zaman-maliyet-kalite pareto grafiği 137
Şekil 50. 60 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 140
Şekil 51. 60 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 141
Şekil 52. 60 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 144
Şekil 53. 180 aktiviteli TCQTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman, maliyet ve maksimum kalite değerleri 145
Şekil 54. SPWOA tarafından üretilmiş 180 aktivite zaman-maliyet-kalite pareto grafiği 149
Şekil 55. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 151
Şekil 56. 180 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 153
Şekil 57. 18 aktiviteli TCQTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 156
Şekil 58. 60 aktiviteli TCQTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 157
Şekil 59. 180 aktiviteli TCQTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 158
Şekil 60. 25 aktiviteli TCETP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler 162
Şekil 61. SPRAO1 tarafından üretilmiş 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki pareto grafiği 167
Şekil 62. 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 170
Şekil 63. 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 171
Şekil 64. 25 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 174
Şekil 65. 29 aktiviteli TCETP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler 176
Şekil 66. NDSIIIRAO2 tarafından üretilmiş 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki pareto grafiği 181

Şekil 67. 29 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 183
Şekil 68. 29 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 186
Şekil 69. 250 aktiviteli TCETP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler 188
Şekil 70. SPWOA tarafından üretilmiş 250 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki pareto grafiği 191
Şekil 71. 250 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 194
Şekil 72. 250 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 197
Şekil 73. 25 aktiviteli TCETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 200
Şekil 74. 29 aktiviteli TCETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 201
Şekil 75. 250 aktiviteli TCETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 203
Şekil 76. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler 207
Şekil 77. NDSIIIRAO1 tarafından üretilmiş 18 aktivite (ICR=200$) zaman-maliyet-güvenlik riski pareto grafiği 211
Şekil 78. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 214
Şekil 79. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 216
Şekil 80. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 218
Şekil 81. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler 219
Şekil 82. NDSIIIRAO1 tarafından üretilmiş 18 aktivite (ICR=0$) zaman-maliyet-güvenlik riski pareto grafiği 223
Şekil 83. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=0$) problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 225
Şekil 84. 18 aktivite (ICR=0$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 228
Şekil 85. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler 230

Şekil 86. SPWOA tarafından üretilmiş 180 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski pareto grafiği 233
Şekil 87. 180 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 236
Şekil 88. 180 aktivite TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 238
Şekil 89. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 241
Şekil 90. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 242
Şekil 91. 180 aktiviteli TCSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 243
Şekil 92. 29 aktiviteli TCQETP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 248
Şekil 93. MSPWOA tarafından üretilmiş 29 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki pareto grafiği 251
Şekil 94. 29 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 254
Şekil 95. 29 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 255
Şekil 96. 29 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 258
Şekil 97. 69 aktiviteli TCQETP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 262
Şekil 98. MSPWOA tarafından üretilmiş 69 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki pareto grafiği 266
Şekil 99. 69 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 269
Şekil 100. 69 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 270
Şekil 101. 69 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 272
Şekil 102. 290 aktiviteli TCQETP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 274
Şekil 103. MSPWOA tarafından üretilmiş 290 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki pareto grafiği 278

Şekil 104. 290 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 281
Şekil 105. 290 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 283
Şekil 106. 29 aktiviteli TCQETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 286
Şekil 107. 69 aktiviteli TCQETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 287
Şekil 108. 290 aktiviteli TCQETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 288
Şekil 109. 13 aktiviteli TCQSRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 293
Şekil 110. MSPRAO2 tarafından üretilmiş 13 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski pareto grafiği 297
Şekil 111. 13 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 300
Şekil 112. 13 aktivite zaman-maliyet-kalite- güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 301
Şekil 113. 13 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 303
Şekil 114. 18 aktiviteli TCQSRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 307
Şekil 115. MSPRAO2 tarafından üretilmiş 18 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski pareto grafiği 311
Şekil 116. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 314
Şekil 117. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite- güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 314
Şekil 118. 18 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 317
Şekil 119. 180 aktiviteli TCQSRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 319
Şekil 120. MSPWOA tarafından üretilmiş 180 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski pareto grafiği 322
Şekil 121. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 325

Şekil 122. 180 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 327
Şekil 123. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 331
Şekil 124. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 332
Şekil 125. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 333
Şekil 126. 25 aktiviteli TCQESRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 337
Şekil 127. MSPRAO1 tarafından üretilmiş 25 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski pareto grafiği 342
Şekil 128. 25 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 345
Şekil 129. 25 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 346
Şekil 130. 25 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 348
Şekil 131. 25 aktiviteli TCQESRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler 350
Şekil 132. MSPWOA tarafından üretilmiş 250 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski pareto grafiği 353
Şekil 133. 250 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması 356
Şekil 134. 250 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi 358
Şekil 135. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 361
Şekil 136. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi 363

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Çok amaçlı inşaat planlama problemlerinde kullanılan optimizasyon yaklaşımlarının karşılaştırılması 9

Tablo 2. 29 Aktivite zaman-maliyet opsiyonları 77

Tablo 3. 29 aktiviteli problem için GWO ve WOA algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 79

Tablo 4. 29 aktiviteli problem için RAO1 ve RAO2 algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 80

Tablo 5. 29 aktiviteli problem için MOSGO ve en iyi algoritmaların pareto çözümlerinin kıyaslaması 81

Tablo 6. 29 aktivite için SPRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 82

Tablo 7. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 83

Tablo 8. 29 aktiviteli zaman-maliyet ödünleşim problemi için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütlerinin karşılaştırılması 86

Tablo 9. 29 aktiviteli zaman-maliyet ödünleşim problemi için MID ve DM performans ölçütleri karşılaştırması 86

Tablo 10. 29 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 88

Tablo 11. 69 aktiviteye ait zaman-maliyet opsiyonları 89

Tablo 12. 69 aktiviteli problem için GWO ve WOA algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 92

Tablo 13. 69 aktiviteli problem için Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 93

Tablo 14. 29 aktiviteli problem için MOSGO ve en iyi algoritmaların pareto çözümlerinin kıyaslaması 94

Tablo 15. 69 aktivite için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 95

Tablo 16. 69 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 96

Tablo 17. 69 aktivite TCTP için algoritmalara ait HV,SP ve MID performans ölçütleri karşılaştırması 99

Tablo 18. 69 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 99

Tablo 19. 290 Aktivite Zaman-maliyet opsiyonları 101

Tablo 20. 290 aktiviteli problem için GWO ve WOA algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 103
Tablo 21. 290 aktiviteli TCTP için RAO1 ve RAO2 algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 103
Tablo 22. 290 Aktivite için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 105
Tablo 23. 290 aktivite zaman-maliyet problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 106
Tablo 24. 290 aktivite için algoritmalara ait HV,SP ve MID performans ölçütleri karşılaştırması 107
Tablo 25. 290 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 108
Tablo 26. 29 aktiviteli TCTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 111
Tablo 27. 69 aktiviteli TCTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 112
Tablo 28. 290 aktiviteli TCTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 113
Tablo 29. 18 Aktivite TCQTO problemi zaman-maliyet-kalite opsiyonları 116
Tablo 30. 18 aktiviteli TCQTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 119
Tablo 31. 18 aktiviteli TCQTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 120
Tablo 32. 18 aktiviteli TCQTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 120
Tablo 33. 18 aktiviteli TCQTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 121
Tablo 34. 18 aktiviteli TCQTP problemi için SPRAO2 ve SPWOA algoritmalarına ait Pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması 121
Tablo 35. 18 aktivite TCQTP için SPRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 123
Tablo 36. 18 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, OMODE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 124
Tablo 37. 18 aktivite TCQTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 127
Tablo 38. 18 aktivite TCQTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 127
Tablo 39. 18 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 128
Tablo 40. 60 Aktivite TCQTP problemi zaman-maliyet-kalite opsiyonları 130

Tablo 41. 60 aktiviteli TCQTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 133
Tablo 42. 60 aktiviteli TCQTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 134
Tablo 43. 60 aktiviteli TCQTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 135
Tablo 44. 60 aktiviteli TCQTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 135
Tablo 45. 60 aktiviteli TCQTP problemi için NDSIIIWOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması 136
Tablo 46. 18 Aktivite TCQTP için NDSIIIWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 136
Tablo 47. 60 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOABCDE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 139
Tablo 48. 60 aktivite TCQTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 142
Tablo 49. 60 aktivite TCQTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 142
Tablo 50. 60 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 143
Tablo 51. 180 aktiviteli TCQTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 146
Tablo 52. 180 aktiviteli TCQTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 147
Tablo 53. 180 aktiviteli TCQTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 147
Tablo 54. 180 aktiviteli TCQTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 148
Tablo 55. 180 aktivite TCQTP için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 148
Tablo 56. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 150
Tablo 57. 180 aktivite TCQTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 151
Tablo 58. 180 aktivite TCQTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 152
Tablo 59. 180 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 153

Tablo 60. 18 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 156
Tablo 61. 60 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 157
Tablo 62. 180 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 159
Tablo 63. 25 Aktivite TCETP problemi zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları 161
Tablo 64. 25 aktiviteli TCETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 163
Tablo 65. 25 aktiviteli TCETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 164
Tablo 66. 25 aktiviteli TCETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 165
Tablo 67. 25 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 165
Tablo 68. 25 aktiviteli TCETP problemi için SPRAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması 166
Tablo 69. 25 Aktivite TCETP için SPRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 167
Tablo 70. 25 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, OMODE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 169
Tablo 71. 25 aktivite TCETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 172
Tablo 72. 25 aktivite TCETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 172
Tablo 73. 25 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 173
Tablo 74. 29 Aktivite zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları 175
Tablo 75. 29 aktiviteli TCETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 177
Tablo 76. 29 aktiviteli TCETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 177
Tablo 77. 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 179
Tablo 78. 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 179
Tablo 79. 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin, eMOGOA algoritması pareto çözümleriyle karşılaştırılması 180

Tablo 80. 25 Aktivite TCETP için NDSIIIRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 180
Tablo 81. 29 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 183
Tablo 82. 29 aktivite TCETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 184
Tablo 83. 29 aktivite TCETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 184
Tablo 84. 29 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 185
Tablo 85. 250 aktiviteli TCETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 188
Tablo 86. 250 aktiviteli TCETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 189
Tablo 87. 250 aktiviteli TCETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 190
Tablo 88. 250 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 190
Tablo 89. 180 aktivite TCQTP için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 191
Tablo 90. 250 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 193
Tablo 91. 250 aktivite TCETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 194
Tablo 92. 250 aktivite TCETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 195
Tablo 93. 250 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 196
Tablo 94. 25 aktiviteli TCETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 200
Tablo 95. 29 aktiviteli TCETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 202
Tablo 96. 250 aktiviteli TCETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 202
Tablo 97. 18 Aktivite TCSRTP problemi zaman-maliyet-güvenlik riski opsiyonları 205
Tablo 98. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 208
Tablo 99. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 209

Tablo 100. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 209
Tablo 101. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 210
Tablo 102. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması 211
Tablo 103. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=200$) için NDSIIIRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 211
Tablo 104. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOGA algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 213
Tablo 105. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 216
Tablo 106. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 217
Tablo 107. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 218
Tablo 108. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 220
Tablo 109. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 221
Tablo 110. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 221
Tablo 111. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 222
Tablo 112. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=0$) için NDSIIIRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 222
Tablo 113. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=0$) problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 225
Tablo 114. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 226
Tablo 115. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 226
Tablo 116. 18 aktivite (ICR=0$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 228
Tablo 117. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 230
Tablo 118. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 231

Tablo 119. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 232
Tablo 120. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 232
Tablo 121. 180 aktivite TCSRTP için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 234
Tablo 122. 180 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 235
Tablo 123. 180 aktivite TCSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 237
Tablo 124. 180 aktivite TCSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 237
Tablo 125. 180 aktivite TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 238
Tablo 126. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 241
Tablo 127. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 242
Tablo 128. 180 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 244
Tablo 129. 29 Aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki opsiyonları 246
Tablo 130. 29 aktiviteli TCQETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 248
Tablo 131. 29 aktiviteli TCQETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 249
Tablo 132. 29 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 249
Tablo 133. 29 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 250
Tablo 134. 29 aktiviteli TCQETP problemi için MSPWOA algoritmasına ait Pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların Pareto çözümleriyle karşılaştırılması 250
Tablo 135. 29 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 252
Tablo 136. 29 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 253
Tablo 137. 29 aktivite TCQETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 256
Tablo 138. 29 aktivite TCQETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 256

Tablo 139. 29 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 257
Tablo 140. 69 Aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki opsiyonları 259
Tablo 141. 69 aktiviteli TCQETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 263
Tablo 142. 69 aktiviteli TCQETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 264
Tablo 143. 69 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 264
Tablo 144. 69 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 265
Tablo 145. 69 aktiviteli TCQETP problemi için MSPWOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması 265
Tablo 146. 69 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 266
Tablo 147. 69 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 268
Tablo 148. 69 aktivite TCQETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 271
Tablo 149. 69 aktivite TCQETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 271
Tablo 150. 69 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 272
Tablo 151. 290 aktiviteli TCQETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 275
Tablo 152. 290 aktiviteli TCQETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 276
Tablo 153. 290 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 276
Tablo 154. 290 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 277
Tablo 155. 290 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 278
Tablo 156. 290 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 280
Tablo 157. 290 aktivite TCQETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 281
Tablo 158. 290 aktivite TCQETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 282

Tablo 159. 290 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 283
Tablo 160. 29 aktiviteli TCQETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 286
Tablo 161. 69 aktiviteli TCQETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 287
Tablo 162. 290 aktiviteli TCQETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 289
Tablo 163. 13 Aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski opsiyonları 291
Tablo 164. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 294
Tablo 165. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 294
Tablo 166. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 295
Tablo 167. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 295
Tablo 168. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için MSPRAO2 algoritmasına ait Pareto çözümlerinin MOPSO Pareto çözümleriyle karşılaştırılması 296
Tablo 169. 13 Aktivite TCQSRTP için MSPRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 297
Tablo 170. 13 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların MOPSO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 299
Tablo 171. 13 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 301
Tablo 172. 13 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 302
Tablo 173. 13 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 303
Tablo 174. 18 Aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski opsiyonları 304
Tablo 175. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 308
Tablo 176. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 308
Tablo 177. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 309
Tablo 178. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 309
Tablo 179. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 310

Tablo 180. 13 Aktivite TCQSRTP için MSPRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 310
Tablo 181. 18 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların NSGAIII algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 312
Tablo 182. 18 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 315
Tablo 183. 18 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 315
Tablo 184. 18 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 316
Tablo 185. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 319
Tablo 186. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 320
Tablo 187. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 321
Tablo 188. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 321
Tablo 189. 290 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 323
Tablo 190. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 324
Tablo 191. 180 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 326
Tablo 192. 180 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 326
Tablo 193. 180 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 328
Tablo 194. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 330
Tablo 195. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 332
Tablo 196. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 333
Tablo 197. 25 Aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel eti-güvenlik riski opsiyonları 335
Tablo 198. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 339
Tablo 199. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 339

Tablo 200. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 340
Tablo 201. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 340
Tablo 202. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için MSPRAO1 algoritmasına ait Pareto çözümlerinin OBNSGAIII Pareto çözümleriyle karşılaştırılması 341
Tablo 203. 25 Aktivite TCQSRTP için MSPRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 343
Tablo 204. 25 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların OBNSGAIII algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması 344
Tablo 205. 25 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 346
Tablo 206. 25 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 347
Tablo 207. 25 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 348
Tablo 208. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 351
Tablo 209. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 351
Tablo 210. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 352
Tablo 211. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması 352
Tablo 212. 250 Aktivite TCQSRTP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri 354
Tablo 213. 250 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması 355
Tablo 214. 250 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması 357
Tablo 215. 250 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması 357
Tablo 216. 250 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri 358
Tablo 217. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 361
Tablo 218. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü 362

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

GWO	: Gri kurt algoritması
WOA	: Balina algoritması
RAO	: Rao serileri
HV	: Hiper hacim
MID	: Ortalama ideal mesafe
NDSII	: Kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama
NDSIII	: Referans tabanlı baskın olmayan sıralama
MSP	: Modifiye edilmiş güçlendirilmiş pareto
SP	: Güçlendirilmiş pareto yöntemi
TCTP	: Zaman-maliyet ödünleşim problemi
TCQTP	: Zaman-maliyet-kalite ödünleşim problemi
TCSRTP	: Zaman-maliyet-güvenlik riski ödünleşim problemi
TCETP	: Zaman-maliyet-çevresel etki ödünleşim problemi
TCQETP	: Zaman-maliyet-kalite-çevresel etki ödünleşim problemi
TCQSRTP	: Zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski ödünleşim problemi
TCQESRTP	: Zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski ödünleşim problemi
ES	: Erken başlama
EF	: Erken bitiş
LS	: Geç başlama
LF	: Geç bitiş
ICR	: Direkt olmayan maliyet

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Projelerin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için kapsamlı bir planlama süreci gerekmektedir. Bu süreç, projenin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanmasını sağlarken aynı zaman da iş programları, kaynak tahsisi ve risk yönetimi gibi kritik unsurları da içermektedir. Planlama aşamasında yapılan detaylı analizler ve öngörüler, projenin ilerleyen aşamalarında karşılaşılabilecek potansiyel sorunları önceden tespit etmeyi ve çözüm yolları geliştirmeyi mümkün kılmaktadır. Proje yönetimi sürecinde planlama aşamasının ihmali, gecikmelere, maliyet artışlarına, kalite problemlerine hatta iş güvenliği risklerine yol açabilmektedir. Sonuç olarak, inşaat projelerinde sistematik planlama hem projenin kalitesini artırmakta hem de beklenmedik sorunlarla başa çıkma kapasitesini yükseltmektedir. Böylece projenin beklenen performansına ve uzun vadeli başarısına ulaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Planlama sürecinin temelinde, birbirleriyle bağlantılı bir dizi faaliyet yer almaktadır. Her faaliyet için seçilecek yapım teknolojisi, çalışma metodolojisi, kaynak miktarı ve ekipman türü gibi faktörlere bağlı olarak çeşitli uygulama alternatifleri oluşturulabilmektedir. Bu alternatifler, projenin zaman, maliyet, kalite, çevresel etki ve güvenlik riski gibi hedeflerini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, bir faaliyetin tamamlanma süresini kısaltmak amacıyla ek vardiya çalışması veya ilave ekipman kullanımı planlanabilir ancak bu tercih maliyetlerde artışa veya iş güvenliği risklerinde yükselmeye neden olabilmektedir.

İnşaat projelerinde planlama yaklaşımı genellikle projenin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanmasına odaklanmaktadır. Ancak bu iki amaca ek olarak proje planlama aşamasında, kalite standartlarının sağlanması, çevresel etkinin en aza indirilmesi ve güvenlik risklerinin azaltılması gibi birbiriyle çelişebilen hedeflerden biri, birkaçı veya tümü dahil edilebilmektedir. Bu hedeflerin birbiriyle çelişmesi nedeniyle, bir hedefte iyileştirme yapılırken diğer hedeflerde istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilmekte ve bu durum ödünleşimlerin doğmasına neden olabilmektedir. Bu sebeple, planlama aşamasında amaçlar arasında optimum dengenin sağlanması için her bir faaliyette en uygun alternatiflerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, çok sayıda proje faaliyeti ve

bunların gerçekleştirilme alternatifleri düşünüldüğünde, optimum kombinasyonun belirlenmesi karmaşıklaşmakta ve çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünü gerekli kılmaktadır. İnşaat yönetimi literatüründe bu tür kombinatoryal problemler, çok amaçlı çizelgeleme problemi (MOSP) olarak kategorize edilmiştir (Panwar & Jha, 2019).

Literatürde, proje yönetimi alanındaki ilk çalışmalar, zaman ve maliyet odaklı optimizasyon problemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Zaman-maliyet ödünleşim problemleri (TCTP), genel olarak iki ana kategori altında ele alınmıştır. Birincisi, belirli bir proje süresi için maliyetin en uygun şekilde dengelenmesini amaçlayan tek hedefli optimizasyon problemleri, ikincisi ise zaman ve maliyet gibi birbiriyle çelişen çoklu hedefler arasında pareto-optimal çözümler sunan çok amaçlı optimizasyon problemleridir.

Bu tür problemlerin çözümüne yönelik ilk çalışmalar, doğrusal programlama (LP), tamsayılı programlama (IP) ve dinamik programlama (DP) gibi matematiksel yöntemlerin uygulanmasıyla başlamıştır (Burns vd., 1996; Kelley, 1961; Meyer ve Shaffer, 1963). Ancak zaman-maliyet ödünleşim problemleri, aktivitelerin sayısı ve her bir aktiviteye ait alternatiflerin sayısına bağlı olarak hızla karmaşıklaşmakta ve çözüm uzayı üstel olarak büyümektedir. Örneğin, n adet aktivite ve her bir aktivite için m alternatif olduğu durumda, toplam kombinasyon sayısı m^n olmaktadır. Dolayısıyla, geleneksel optimizasyon yöntemleri bu tür geniş çözüm uzaylarını taramakta yetersiz kaldığı ve özellikle büyük ölçekli projelerde pratik çözümler sunamadığı tespit edilmiştir (Sonmez ve Bettemir, 2012). Bu bağlamda, zaman-maliyet ödünleşimi problemlerinde etkili ve uygulanabilir çözümler sunmak için birçok araştırmacı tarafından metasezgisel algoritmalar önerilmiştir. Bu algoritmalar, büyük çözüm uzaylarını etkin bir şekilde keşfedebilmekte ve çok sayıda çelişen hedef arasında optimal veya optimale yakın pareto çözümlerini hızlı bir şekilde sunabilmektedir. Literatürde genetik algoritmalar (GA), benzetilmiş tavlama (SA), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), kurbağa sıçraması algoritması (SFLA), öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) ve hibrit yaklaşımlar gibi çeşitli metasezgisel yöntemlerin zaman-maliyet ödünleşimi problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde uygulandığı görülmektedir (Albayrak ve Özdemir, 2018; Dhawan vd., 2022; Eirgash vd., 2019; Feng vd., 1997; Pham vd., 2024; Sonmez ve Bettemir, 2012; Tao vd., 2019; Xiong ve Kuang, 2008; Yang, 2007; Zheng vd., 2005, 2004).

Geleneksel zaman-maliyet ödünleşim problemleri, projelerin belirli bir sürede ve maliyet sınırları içinde tamamlanmasını sağlamayı hedeflemiş, ancak bu yaklaşım kalite faktörünü göz ardı etmiştir. Bunun sonucunda, projelerde kısa vadeli maliyet avantajları

sağlansa da, uzun vadede düşük kalite standartları nedeniyle performans sorunları ve yüksek bakım maliyetleri ortaya çıkmıştır (El-Rayes ve Kandil, 2005). Bu yüzden, araştırmacılar zaman-maliyet-kalite (TCQTP) optimizasyonuna yönelmiş ve bu problemlere daha hızlı çözümler önerebilmek için metasezgisel algoritmalar önermişlerdir. El-Rayes ve Kandil (2005) genetik algoritmalar kullanarak inşaat projelerinde kalite, maliyet ve zaman dengesini optimize eden çok amaçlı bir model geliştirmiştir. Afshar vd. (2007) TCTQ optimizasyonu için çok kolonili karınca algoritmasına dayalı bir pareto yöntemi sunmuştur. Fallah-Mehdipour vd. (2012) kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralamaya dayalı genetik algoritmanın (NSGAII) performansını incelemiştir. Zhang ve Xing (2010) bulanık pareto tabanlı çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonunu (FPSO) önerirken, Mungle vd. (2013) bulanık kümeleme tabanlı genetik algoritma (FCGA) kullanarak TCTQ problemlerinde en iyi çözüm setini belirlemiştir. Bu araştırmalara ek olarak TCQTP problemlerinde, daha hızlı yakınsama ve gelişmiş çözüm kalitesi için hibrit teknikler geliştirmiştir. Zhang vd. (2014) ödül-ceza mekanizmaları ve kalite performans indeksi (QPI) içeren bağışıklık genetik parçacık sürü optimizasyonunu (IGPSO) kullanmıştır. Cheng vd. (2016) kaotik başlatılan çok amaçlı diferansiyel evrim (CAMODE) yaklaşımını önermiştir. Tran vd. (2015) diferansiyel evrim ile yapay arı kolonisi algoritmalarını (MOABCDE) birleştirmiştir. Luong vd. (2021) karşıt tabanlı çok amaçlı diferansiyel evrim algoritmasını (OMODE) geliştirmiştir. Wang vd. (2021) NSGA-II kullanarak süre, maliyet ve kalite arasındaki en iyi dengeyi belirlemiştir. Son ve Khoi (2024) ise balçık küfü algoritmasını (SMA) TCTQ optimizasyonunda kullanmıştır.

Zaman, maliyet ve kalite optimizasyonundaki gelişmelere rağmen, inşaat projelerinin başarısını etkileyen çok sayıda öngörülemeyen risk bulunmaktadır. Özellikle son yıllarda, iş güvenliği konusundaki artan farkındalık ve yasal düzenlemeler, güvenlik risklerinin proje planlamasında daha sistematik bir şekilde ele alınması gerektiğini vurgulamıştır (Yi ve Langford, 2006). İşyeri kazaları veya ölümler gibi ciddi güvenlik sorunları çalışanların moralini olumsuz etkileyerek iş kalitesinde düşüşe ve proje gecikmelerine yol açabilmektedir (Choudhry, 2017; Wanberg vd., 2013). Bu nedenle, karar vericilerin projeleri daha esnek bir şekilde yönetebilmeleri için planlama aşamasında zaman, maliyet ve güvenlik risklerini birlikte değerlendirmeleri, beklenmedik olaylara yanıt verebilmelerini ve belirlenen hedeflere daha etkili bir şekilde ulaşmalarını sağlamaktadır (Afshar ve Dolabi, 2014). Afshar ve Dolabi (2014), güvenlik risklerini zaman ve maliyet problemlerine dahil ederek nitel faaliyet tabanlı güvenlik riski (QASR) yöntemini geliştirerek bu yaklaşıma

öncülük etmiş ve çok amaçlı genetik algoritma tabanlı bir model kullanarak çözmüşlerdir. Panwar ve Jha (2021), dört amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemini referans tabanlı baskın olmayan sıralamaya dayalı genetik algoritma (NSGA-III) kullanarak çözmüştür. Sharma vd. (2023), parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasını kullanarak zaman kısıtları altında zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemini ele almıştır.

İnşaat projelerinde güvenlik risklerinin ve kalitenin yanı sıra, son yıllarda iklim değişikliği ve çevresel sürdürülebilirlik konularındaki artan kaygılar, proje yönetiminde çevresel etkilerin de optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur (Marzouk vd., 2008; Özcan Deniz vd., 2012). Bu bağlamda, zaman-maliyet-çevresel etki ödünleşimi (TCETP) konusu önem kazanmaya başlamıştır. Çevresel etkilerin optimizasyonunda da diğer planlama problemlerinde olduğu gibi metasezgisel algoritmalara önem verilmiştir. Örneğin, Marzouk vd. (2008), proje süresini, maliyetini ve toplam kirliliği optimize etmek için çok amaçlı genetik algoritma kullanan yenilikçi bir çerçeve önermiştir. Özcan Deniz vd. (2012), küresel ısınma potansiyeline (GWP) odaklanarak, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yaklaşımıyla zaman, maliyet ve çevresel etkileri dengeleyen genetik algoritma tabanlı bir metodoloji geliştirmiştir. Cheng ve Tran (2015), tünel inşaatı vaka çalışmasında zaman-maliyet-çevre etkisi probleminin çözümü için karşıt tabanlı çok amaçlı diferansiyel evrim (OMODE) algoritmasını geliştirmiştir. Eirgash ve Togan (2023), öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritmasını (TLBO) altın oran tabanlı bir zıt öğrenme stratejisiyle geliştirerek, çözüm kalitesinden ödün vermeden yakınsama hızını ve doğruluğunu artırmıştır. Bu gelişmelere paralel olarak, Huynh vd. (2021) çok amaçlı sosyal grup optimizasyon modeli (MOSGO) ile zaman, maliyet, kalite ve karbon emisyonlarını entegre bir şekilde optimize etmeyi başarmıştır. Son ve Khoi (2023b) balçık küfü algoritması ile karşıt tabanlı turnuva mutasyonlu (SMAOTM) hibrit algoritmayı TCQE problemleri için önermişlerdir.

1.2. Araştırma Boşluğu

Literatürde yapılan çalışmaların incelenmesi neticesinde, inşaat projelerindeki çok amaçlı karar verme problemlerinin çözümünde genellikle karşıt tabanlı yaklaşımlar, kaotik başlatma stratejileri ve hibrit algoritmalar gibi metasezgisel algoritmaların geliştirilmesine odaklanıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar, algoritmaların arama kabiliyetlerini ve yakınsama hızlarını iyileştirmede önemli başarılar elde etmiştir. Ancak, inşaat proje

planlama problemlerinin özünde çok amaçlı veya çok fazla amaçlı optimizasyon problemleri olmasına rağmen, metasezgisel algoritmaların çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin geliştirilmesine yeterli önem verilmediği tespit edilmiştir. Halbuki bu operatörler, algoritmanın bir sonraki iterasyona aktaracağı popülasyonun belirlenmesinde ve dolayısıyla çözüm kalitesinde kritik rol oynamaktadır.

Özellikle zaman, maliyet, kalite, güvenlik riski ve çevresel etki gibi birbiriyle çelişen birçok hedefin eş zamanlı optimize edilmesi gereken durumlarda, etkili seçme ve eleme operatörlerinin kullanılması, pareto-optimal çözüm kümesinin kalitesini ve çeşitliliğini doğrudan etkilemektedir. Mevcut çalışmalarda kullanılan geleneksel seçme ve eleme operatörleri, genellikle baskınlık ilişkisine dayalı sıralama ve kalabalık mesafe tabanlı hesaplama gibi temel yaklaşımlara dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, özellikle amaç sayısının arttığı durumlarda yetersiz kalabilmekte ve çözüm uzayının etkin bir şekilde keşfedilmesini sınırlandırabilmektedir. Örneğin, NSGA-II algoritmasında kullanılan kalabalık mesafesi operatörü, dört ve daha fazla amaçlı problemlerde çözümlerin çeşitliliğini korumakta zorlanmaktadır (Deb ve Jain, 2014).

Literatürde çok amaçlı optimizasyon problemleri için baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA-II) (Deb vd., 2002), referans tabanlı baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA-III) (Deb ve Jain, 2014), güçlendirilmiş pareto evrimsel algoritma (SPEA2) (Zitzler vd., 2001) ve pareto zarf-tabanlı seçim algoritması (PESA2) (Corne vd., 2001) gibi çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Ancak inşaat yönetimi alanındaki çalışmaların çoğunlukla kalabalık mesafe tabanlı veya kalabalık entropi tabanlı yaklaşımlar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Dört veya daha fazla amaçlı problemler literatürde "çok fazla amaçlı problem" olarak tanımlanmış olup, NSGA-II, SPEA2 ve PESA2 algoritmalarının bu tür problemlerde performansının önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir (Chand ve Wagner, 2015; Saxena vd., 2009). Bu nedenle literatürde NSGAII algoritması yerine çok fazla amaçlı problemlerin çözümü için referans tabanlı NSGA-III algoritması geliştirilmiştir (Deb ve Jain, 2014). Ancak inşaat projelerinin planlanmasına ait çalışmaların incelemesi sonucunda, NSGA-III algoritmasının referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörünün genetik algoritma dışındaki metasezgisel algoritmalarda yeterince test edilmediği, sadece diferansiyel evrim algoritması ile sınırlı kaldığı görülmüştür. Benzer şekilde, SPEA2 algoritmasının önerdiği güçlendirilmiş pareto (SP) yönteminin inşaat proje planlama problemlerinde hiçbir algoritma ile geliştirilmediği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, mevcut metasezgisel algoritmaları geliştirmek yerine, bu algoritmaların performansının farklı seçme ve eleme operatörleri ile iyileştirilebileceği gösterilmiştir. Çalışma kapsamında literatürde son yıllarda önerilmiş ve farklı alanlarda üstünlük sağlamış Rao serileri (Rao, 2020), balina optimizasyon algoritması (WOA) (Mirjalili ve Lewis, 2016) ve gri kurt optimizasyonu (GWO) (Mirjalili vd., 2014) algoritmaları kullanılmıştır. Rao serileri, basitliği ve özel parametre gereksinimlerinin olmaması nedeniyle tercih edilmiş olup, çeşitli mühendislik problemlerinde güçlü sonuçlar göstermiştir (Kalemci ve İkizler, 2020; Pham vd., 2022; Rao ve Pawar, 2020; Uzlu, 2024). Gri kurtların sosyal davranışlarından ve avlanma stratejilerinden ilham alan GWO algoritması ile kambur balinaların avlanma yöntemlerinden esinlenen WOA algoritması da farklı alanlarda ve geniş arama uzaylarında üstün performans sergilemiştir (Huang vd., 2022; Kalemci vd., 2020; Kaveh, 2017; Lu vd., 2018; Sang-To vd., 2022).

Seçilen her bir algoritma, farklı çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirilerek test edilmiştir. İki amaçlı zaman-maliyet ödünleşim probleminde, algoritmalar kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII) operatörü ve güçlendirilmiş pareto (SP) operatörü ile geliştirilerek karşılaştırılmıştır. Üç amaçlı problemlerde (zaman-maliyet-kalite, zaman-maliyet-çevresel etki ve zaman-maliyet-güvenlik riski), referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII), kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII) ve güçlendirilmiş pareto (SP) operatörleri kullanılarak algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. Orijinal SP operatörünün dört veya daha fazla amaçlı problemlerdeki yetersizliğini gidermek amacıyla, kesme mekanizması k-ortalamalar kümeleme yöntemi ile geliştirilmiş ve uygunluk hesaplamalarında Öklid mesafesi yerine, değişkenler arasındaki korelasyonları hesaba katan Mahalanobis uzaklığı kullanılarak modifiye edilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) yöntemi önerilmiştir. Dört amaçlı problemlerde MSP, SP ve NDSIII operatörleri karşılaştırılırken, beş amaçlı inşaat proje planlama problemlerinde MSP ve NDSIII operatörlerinin performansları analiz edilmiştir.

Bu bağlamda, inşaat projelerindeki çok amaçlı optimizasyon problemlerinin daha etkin çözümü için, mevcut algoritmaların performanslarını artıracak yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Literatürde ilk kez, SPEA2 algoritmasının güçlendirilmiş pareto (SP) operatörü ve NSGA-III algoritmasının referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörü farklı metasezgisel algoritmalarla entegre edilerek, bu operatörlerin genetik algoritma dışındaki performansları değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, SP operatörünün dört ve daha fazla amaçlı problemlerde görülen eksiklikleri, önerilen MSP operatörü ile

giderilmiştir. Bu yeni operatör, çözüm uzayının karmaşık yapısına uyum sağlayabilen ve hesaplama verimliliğini koruyan yapısıyla, çok fazla amaçlı inşaat çizelgeleme problemlerinin çözümüne katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Geliştirilen bu yeni operatör entegrasyonları ve iyileştirmelerin, inşaat projelerindeki karmaşık çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözüm performansını artırması beklenmektedir.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma, çok amaçlı inşaat proje planlama problemlerinde seçme ve eleme operatörlerinin farklı metasezgisel algoritmalarla entegrasyonunu inceleyerek, tüm optimizasyon ve karar verme sürecini bütünleşik olarak yöneten bir karar destek sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda üç önemli operatör geliştirmesi yapılmıştır. Literatürde sadece genetik algoritma ile birlikte kullanılan güçlendirilmiş pareto (SP) operatörü ve yalnızca genetik ve diferansiyel evrim algoritmalarında kullanılan referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörü ilk kez Rao serileri, Balina optimizasyonu (WOA) ve Gri kurt optimizasyonu (GWO) gibi farklı metasezgisel algoritmalara entegre edilmiştir. Ayrıca, SP operatörünün dört ve daha fazla amaçlı problemlerdeki sınırlılıklarını gidermek için k-ortalamalar kümeleme yöntemi ve mahalanobis uzaklığı kullanılarak modifiye edilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) operatörü geliştirilmiştir. Bu operatörlerin yanı sıra literatürde yaygın olarak kullanılan kalabalık mesafe tabanlı (NDSII) operatörü de karşılaştırmalı analizlere dahil edilmiştir.

Geliştirilen operatörlerin performans karşılaştırması, inşaat planlama projelerinde sıklıkla karşılaşılan farklı optimizasyon problemleri üzerinde amaç sayısına göre aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İki amaçlı zaman-maliyet ödünleşimi, üç amaçlı zaman-maliyet-kalite, zaman-maliyet-çevresel etki ve zaman-maliyet-güvenlik riski, dört amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski ve zaman-maliyet-kalite-çevresel etki, beş amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski-çevresel etki problemleri ele alınmıştır. Problem boyutlarına göre farklı operatör kombinasyonları test edilmiştir. İki amaçlı problemlerde NDSII ve SP operatörleri, üç amaçlı problemlerde NDSII, NDSIII ve SP operatörleri, dört amaçlı problemlerde SP, NDSIII ve önerilen MSP operatörü, beş amaçlı problemlerde ise NDSIII ve MSP operatörü kullanılmıştır. Tüm bu analizlerde algoritmaların performansları, baskınlık, çeşitlilik, dağılım ve hesaplama verimliliği gibi çeşitli kriterler açısından değerlendirilmiştir.

Geliştirilen operatörlerin ve algoritmaların etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve elde edilen sonuçların pratiğe aktarılabilmesi için MATLAB tabanlı bir yazılım oluşturulmuştur. Geliştirilen karar destek sistemi hem optimizasyon sürecinde hem de optimizasyon sonrası çözüm seçiminde karar vericilere destek sağlayan bütünleşik bir yazılım sunmaktadır. MATLAB ve MS Project entegrasyonu ile geliştirilen bu yazılım, modüler yapısı sayesinde farklı operatörlerin ve algoritmaların kolaylıkla eklenebilmesine olanak tanırken, amaç fonksiyonlarının iki farklı şekilde değerlendirilebilmesine imkân vermektedir. Zaman, maliyet, kalite, çevresel etki ve güvenlik riski amaç fonksiyonları doğrudan MATLAB üzerinden tanımlanabilmekte veya zaman ve maliyet verileri MS Project'ten otomatik olarak çekilebilmektedir. Kullanıcılar, arayüz üzerinden operatör ve algoritmaları seçerek optimizasyon sürecini başlatabilmektedir. Elde edilen pareto-optimal çözüm kümesinden alternatif seçimi için en iyi bütünsel uyarlanabilir özellik sıralama tekniği (BHARAT) başta olmak üzere çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri entegre edilmiştir. Karar vericiler, kendi belirledikleri ağırlık değerlerini kullanabilmekte veya pareto çözüm kümesinden tercih ettikleri herhangi bir alternatifi özgürce belirleyebilmektedir.

Yazılımın önemli özelliklerinden biri de, seçilen pareto çözümüne göre MS Project'teki iş takvimini otomatik olarak güncelleyebilmesidir. Bu özellik, teorik optimizasyon sonuçlarının pratik proje yönetimi uygulamalarına doğrudan entegrasyonunu sağlamaktadır. Böylece çalışma, yalnızca akademik bir araştırma olmanın ötesine geçerek, inşaat sektöründeki proje yöneticilerine günlük iş akışlarında kullanabilecekleri pratik bir araç sunmakta ve optimizasyon çalışmalarının uygulanabilirliğini artırarak akademik araştırmaların sektöre entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.

1.4. Literatür Taraması

İnşaat sektöründe proje yönetimi, birden fazla hedefin eş zamanlı olarak optimize edilmesini gerektiren karmaşık süreçleri içerebilmektedir. Bu hedefler geleneksel olarak projenin tamamlanma süresi ve maliyeti üzerine odaklanırken, son yıllarda kalite, güvenlik ve çevresel etkiler gibi faktörler de önem kazanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların başlangıçta zaman-maliyet ödünleşimi üzerine odaklandıkları, ancak diğer kavramların da önem kazanmasıyla birlikte kalite, güvenlik riski ve çevresel etki gibi hedefleri de optimizasyon sürecine dahil ettikleri görülmektedir.

Bu bölümde, çok amaçlı inşaat planlama problemlerinin optimizasyonu için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Tablo 1'de, literatürdeki bazı çalışmalar için kullanılan algoritma türleri, optimize edilen hedefler ve çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri yaklaşımları açısından kategorize edilmiştir. Tabloda, NDSII yöntemi ile gösterilen kalabalık mesafeye dayalı baskın olmayan sıralama yöntemlerini kullanan algoritmalar, NDSIII yöntemi ile referans noktalı baskın olmayan sıralama çözümü kullanan algoritmalar ve SP güçlendirilmiş pareto yöntemi gösterilmiştir. Ayrıca, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde öncül yaklaşım kullanılarak optimizasyon öncesinde amaçlara ağırlık verilerek tek bir amaca indirgeme yöntemi 'ağırlık' sütununda belirtilmiştir. Baskınlık ilişkisi ile gösterilenler ise çok amaçlı problemlerde temel yöntemler (Fonseca ve Fleming, 1993; Gen ve Cheng, 1999; Goldberg, 1989; Horn vd., 1994; Srinivas ve Deb, 1994) ile geliştirilmiş algoritmaların veya sadece baskınlık ilişkisine dayalı pareto sonuçları oluşturduğunu ya da çalışmalarında kullandıkları eleme ve seçme operatörlerinin detaylarını açıkça belirtmediklerini göstermektedir. Tablodaki çalışmalar incelendiğinde, araştırmaların çoğunlukla kalabalık mesafeye dayalı baskın olmayan sıralama yöntemini (NDSII) kullandığı görülmektedir. Bu yöntem genetik algoritmaların yanı sıra parçacık sürü optimizasyonu, diferansiyel evrim ve daha birçok farklı meta-sezgisel algoritmalarla da uygulanmıştır. Referans noktalı baskın olmayan sıralama çözümünün (NDSIII) üç, dört ve beş amaçlı problemlerde yalnızca genetik algoritma tabanlı çalışmalarda kullanıldığı, güçlendirilmiş pareto yönteminin (SP) ise henüz literatürde uygulanmadığı tespit edilmiştir. Literatür taraması kapsamında incelenen çalışmalar dört alt başlık altında ele alınmıştır.

Tablo 1. Çok amaçlı inşaat planlama problemlerinde kullanılan optimizasyon yaklaşımlarının karşılaştırılması

Yazarlar	Z	M	K	Ç.E.	G.R.	NDSII	NDSIII	SP	Ağırlık	Baskınlık İlişkisi	Algoritma
Feng vd. (1997)	✓	✓								✓	GA
Zheng vd. (2005)	✓	✓							✓		GA
Yang (2007)	✓	✓								✓	PSO
Xiong ve Kuang (2008)	✓	✓							✓		ACO
Ng ve Zhang (2008)	✓	✓							✓		ACS

Tablo 1'in devamı

Yazarlar	Z	M	K	Ç.E.	G.R.	NDSII	NDSIII	SP	Ağırlık	Baskınlık İlişkisi	Algoritma
Zhang ve Li (2010)	✓	✓								✓	CSMOPSO
Geem (2010)	✓	✓								✓	HS
Sönmez ve Bettemir (2012)	✓	✓									Hibrit-GA
Aminbakhsh ve Sonmez (2016,2017)	✓	✓								✓	Siemens-PSO, PFPSO
Eirgash vd. (2019)	✓	✓				✓					NDSTLBO
Tran (2020)	✓	✓				✓					MOSGO
Yılmaz ve Dede (2023)	✓	✓				✓					NDSIIRAO
El-Rayes ve Kandil (2005)	✓	✓	✓			✓					NSGAII
Afshar vd. (2007)	✓	✓	✓							✓	NA-ACO
Zhang ve Xing (2010)	✓	✓	✓								FMOPSO
Fallah-Mehdipour vd. (2012)	✓	✓	✓			✓					NSGAII-MOPSO
Mungle vd. (2013)	✓	✓	✓			✓					FCGA
Monghasemi vd. (2015)	✓	✓	✓			✓					NSGAII
Tran vd. (2015)	✓	✓	✓			✓					MOABCDE
Cheng vd. (2016)	✓	✓	✓			✓					CAMODE
Polat vd. (2015)	✓	✓	✓			✓					NSGAII
Magalhaes-Mendes (2016)	✓	✓	✓						✓		GA
Luong vd. (2021)	✓	✓	✓			✓					OMODE
Sharma ve Trivedi (2022a)	✓	✓	✓			✓					NSGAII
Son ve Khoi(2022, 2024)	✓	✓	✓							✓	SMA
Liu vd. (2023)	✓	✓	✓							✓	MOIWCA
Afshar ve Dolabi (2014)	✓	✓			✓					✓	MOGA
Panwar ve Jha (2021)	✓	✓	✓		✓		✓				NSGAIII

Tablo 1'in devamı

Yazarlar	Z	M	K	Ç.E.	G.R.	NDSII	NDSIII	SP	Ağırlık	Baskınlık İlişkisi	Algoritma
Sharma ve Trivedi (2022b)	✓	✓	✓		✓		✓				LHSNSGAIII
Sharma vd. (2023)	✓	✓	✓		✓					✓	MOPSO
Son ve Khoi (2023c)	✓	✓	✓		✓					✓	AOSMA
Sharma ve Trivedi (2023a)	✓	✓	✓		✓		✓				DOBNSGAIII
Jain ve Dubey (2023)	✓	✓	✓		✓		✓				LHSNSGAIII
Sharma ve Trivedi (2023b)	✓	✓	✓		✓		✓				OBNSGAIII
Marzouk vd. (2008)	✓	✓		✓						✓	NSGA
Ozcan-Deniz vd. (2012)	✓	✓		✓		✓					NSGAII
Liu vd. (2013)		✓		✓						✓	PSO
Cheng ve Tran (2015)	✓	✓		✓		✓					OMODE
Inyim vd. (2015)	✓	✓		✓		✓					NSGAII
Marzouk ve Abdelakder (2019)	✓	✓		✓		✓					NSGAII
Tiwari vd. (2022)	✓	✓		✓			✓				NSGAIII
Huynh vd. (2021)	✓	✓	✓	✓		✓					MOSGO
Son ve Khoi (2023a)	✓	✓	✓	✓						✓	ASSMA
Son vd. (2023)	✓	✓	✓							✓	eMOGOA
Son ve Khoi (2023b)	✓	✓	✓	✓						✓	SMAOTM
Bu Çalışma	✓	✓				✓	✓				**Rao1 Rao2 WOA GWO … (Algoritma ve operatör eklenebilme kolaylığı)**
	✓	✓	✓			✓	✓	✓			
	✓	✓		✓		✓	✓	✓			
	✓	✓			✓	✓	✓	✓			
	✓	✓	✓	✓			✓	✓			
	✓	✓	✓		✓		✓	✓			
	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓			

1.4.1. Zaman-Maliyet Literatür Taraması

İnşaat projelerinde zaman-maliyet ödünleşim problemi, birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Feng vd. (1997) inşaat projelerindeki zaman-maliyet ödünleşme problemini çözmek için genetik algoritmalar (GA) tabanlı bir model geliştirmiştir. Model pareto ön cephesini kullanarak zaman ve maliyetin optimum dengesini bulmayı hedeflemiştir.

Zheng vd. (2005), inşaat projelerinde karşılaşılan zaman-maliyet ödünleşim problemlerinin çözümü için genetik algoritma tabanlı çok amaçlı bir yaklaşım geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri algoritma, pareto sıralama ve niş oluşturma teknikleri sayesinde popülasyon çeşitliliğini koruyarak, zaman ve maliyet arasındaki ödünleşimi optimize eden etkili çözümler üretmeyi başarmıştır.

Yang (2007) inşaat projelerinde zaman-maliyet ödünleşim problemlerinin çözümü için elit parçacık sürü optimizasyonu (PSO) tabanlı yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmada, klasik PSO algoritması modifiye edilerek baskın olmayan çözümlerin elit arşivini tutan ve optimizasyon süreci sırasında rehberlerin seçimini yeniden tanımlayan bir model geliştirilmiştir.

Xiong ve Kuang (2008) tarafından yapılan çalışmada, zaman-maliyet ödünleşim problemi (TCTP) için karınca koloni optimizasyon (ACO) algoritmasına dayalı çok amaçlı bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmada, projelerdeki her aktivite için uygun seçenekleri belirleyerek zaman ve maliyet hedeflerini optimize etmek amacıyla değiştirilmiş adaptif ağırlık yaklaşımı (MAWA) ve ACO algoritması birlikte kullanılmıştır.

Ng ve Zhang (2008), inşaat projelerinde zaman-maliyet optimizasyonu için karınca kolonisi sistemi (ACS) yaklaşımı önermiştir. Çalışmada önerilen ACS algoritması, genetik algoritma tabanlı modellere kıyasla daha az popülasyon ve iterasyon sayısı ile optimal sonuçlara ulaşabildiği ve aynı proje süresi için daha düşük maliyetli çözümler üretebildiği gösterilmiştir.

Zhang ve Li (2010), inşaat projelerindeki zaman-maliyet dengesini optimize etmek için çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu metodunu önermiştir. Yöntem, projenin toplam süresini ve maliyetini minimize ederken, her aktivite için farklı inşaat yöntemlerini değerlendirmektedir.

Geem (2010), proje yönetiminde zaman ve maliyet arasındaki dengeyi optimize etmek için harmoni arama algoritması kullanılmış ve bu algoritmanın genetik algoritma ve karınca kolonisi optimizasyonu gibi diğer yöntemlere kıyasla daha iyi pareto çözümleri ürettiği

gösterilmiştir. Sönmez ve Bettemir (2012) araştırmasında, proje çizelgelemede zaman-maliyet optimizasyonu için meta-sezgisel algoritmalar kullanılmış ve genetik algoritma ile benzetimli tavlama algoritmasının güçlü yönleri birleştirilerek hibrit bir yaklaşım sunulmuştur.

Aminbakhsh ve Sonmez (2016) ayrık parçacık sürü optimizasyonu yöntemini kullanarak büyük ölçekli ayrık zaman-maliyet değişimi problemini çözmek için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada, Siemens yaklaşım yönteminin modifiye edilmiş bir versiyonu ile ayrık parçacık sürü optimizasyonunu entegre ederek başlangıç sürüsünün kalitesini artırmayı ve optimizasyonu hızlandırmayı amaçlamışlardır. Aminbakhsh ve Sonmez (2017) çalışmalarında, çok amaçlı kesikli zaman-maliyet optimizasyonu için pareto ön cepheli parçacık sürü optimizasyonu (PFPSO) yöntemini geliştirmişlerdir. Yazarlar, önerilen yöntemin performansını küçük, orta ve büyük ölçekli projelerde test etmişler ve gerçek hayat projelerinde kısa hesaplama süresinde başarılı sonuçlar elde etmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca, çok amaçlı zaman-maliyet optimizasyonda süreci yönetebilmek C#-MSProject tabanlı bir yazılım geliştirmişlerdir.

Eirgash vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, inşaat yönetimi alanında karşılaşılan zaman-maliyet ödünleşim problemlerini çözmek için kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralamayla öğretme öğrenme temelli optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Önerilen modelin etkinliği, 18 aktiviteli küçük ölçekli, 63 aktiviteli orta ölçekli ve 630 aktiviteli büyük ölçekli test projeleri üzerinde denenmiş ve sonuçlar literatürdeki diğer modellerle karşılaştırılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre, geliştirilen model daha az hesaplama süresi ve daha düşük sapma oranlarıyla pareto çözümleri üretmiş, böylece inşaat projelerindeki zaman-maliyet ödünleşim problemlerinin çözümünde bu yöntemin başarılı ve kullanılabilir olduğu göstermişlerdir.

Tran (2020) yaptığı çalışmada, inşaat projelerinde zaman-maliyet optimizasyonu için çoklu-amaçlı sosyal grup optimizasyonu (MOSGO) algoritması önermiştir. Çalışmada önerilen algoritmanın performansı, MODE, MOABC, MOPSO ve NSGA-II gibi yaygın kullanılan dört algoritma ile karşılaştırılmış ve MOSGO'nun diğer algoritmalara göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

Yılmaz ve Dede (2023) inşaat projelerindeki zaman-maliyet optimizasyonu problemi için Rao serilerini kullanmıştır. Önerilen algoritmalar, çeşitli test problemleri üzerinde genetik algoritma, karınca kolonisi optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu ve memetik

algoritma gibi diğer metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

1.4.2. Zaman-Maliyet-Kalite Literatür Taraması

El-Rayes ve Kandil (2005), 18 aktiviteden oluşan otoyol inşaat projesinde geleneksel iki boyutlu zaman-maliyet ödünleşme analizini (Feng vd., 1997), üç boyutlu zaman-maliyet-kalite ödünleşme analizine dönüştürmüşlerdir. Çalışmalarında, inşaat süresi ve maliyetini minimize ederken kaliteyi maksimize etmek amacıyla kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemi kullanan genetik algoritma kullanmışlardır. Önerdikleri model, farklı kaynak kullanım alternatiflerini değerlendirerek optimal kaynak planları oluşturmakta ve bu sayede karar vericilere etkin çözümler sunmaktadır.

Afshar vd. (2007), geleneksel zaman ve maliyet hedeflerinin yanı sıra kaliteyi vurgulayan yeni sözleşmelerin ortaya çıkardığı zorlukları ele almak için baskın olmayan arşivleme tabanlı karınca kolonisi optimizasyonu (NA-ACO) algoritması geliştirmiştir. Geliştirilen algoritma, birden fazla kaynak kullanımına sahip 18 aktivite içeren bir vaka çalışması üzerinde test edilmiştir. Zaman-maliyet-kalite optimizasyonu için algoritma koloni başına 50 karınca, 20 döngü iterasyonu ve 60 toplam iterasyon kullanarak, 103 Pareto optimal çözüm elde etmiştir. Yazarlar, geliştirdikleri modeli ayrıca iki amaçlı zaman-maliyet ödünleşim problemine uygulayarak daha önceden Zheng vd. (2004) tarafından geliştirilen değiştirilmiş uyarlanabilir ağırlıklandırma yaklaşımı (MAWA) ile kıyaslamışlardır.

Zhang ve Xing (2010), bulanık çok amaçlı parçacık sürüsü optimizasyonu (FMOPSO) geliştirerek, inşaat projelerinde zaman-maliyet-kalite ödünleşimi (TCQT) problemlerine çözüm önermişlerdir. Önerdikleri model, pareto optimal çözüm önermek yerine tek bir en iyi çözüm öneren bulanık bir çoklu amaç fayda (MAU) metodolojisi kullanmışlardır. Geliştirdikleri modeli 13 aktiviteye sahip bir inşaat projesinde test etmişleridir.

Fallah-Mehdipour vd. (2012) inşaat proje yönetiminde zaman-maliyet-kalite ödünleşimi (TCQTP) problemlerini çözmek için çok amaçlı parçacık sürüsü optimizasyonu (MOPSO) ve baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGAII) karşılaştıran bir çalışma sunmuşlardır. Bu algoritmalar, kesikli karar alanında çalışacak şekilde uyarlanmış ve 18 aktiviteye sahip zaman-maliyet ve 7 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite inşaat yönetim problemi için çözülmüştür. Sonuçlar, NSGAII algoritmasının hem zaman-maliyet

ödünleşimi (TCT) hem de zaman-maliyet-kalite ödünleşimi (TCQT) problemlerinde alternatifleri belirlemede MOPSO algoritmasından daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Mungle vd. (2013) 18 aktiviteye sahip otoyol inşaatı projesinde çok amaçlı zaman-maliyet-kalite problemini çözmek için baskın olmayan sıralama tabanlı genetik algoritmaya (NSGA-II) bulanık kümeleme ve bulanık karar verme tekniklerini entegre eden bulanık kümeleme tabanlı bir genetik algoritma (FCGA) algoritmasını geliştirmişlerdir. Çalışma, geniş arama uzayını etkili bir şekilde azaltmış ve proje süresi, maliyeti ve kalitesi arasında en uygun ödünleşimleri sağlayarak inşaat yöneticileri için daha iyi karar vermeyi kolaylaştırmıştır.

Monghasemi vd. (2015), ödül ve ceza sistemi kullanan çok amaçlı zaman-maliyet-kalite problemlerini çözmek için NSGAII algoritmasını kullanmışlardır. Çok amaçlı optimizasyon algoritması tarafından elde edilen pareto kümesinden en iyi çözümü sıralamak ve seçmek için kanıtsal akıl yürütme (ER) yaklaşımı uygulayarak çok kriterli karar destek modeli önermişlerdir.

Tran vd. (2015), zaman-maliyet-kalite ödünleşimi sorununu çözmek amacıyla yapay arı algoritması ve diferansiyel evrim algoritmalarını birleştirerek hibrit bir çok amaçlı optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Önerdikleri algoritma, pareto çözümlerini elde etmek için kalabalık entropi yöntemini kullanan baskın olmayan sıralama tabanlı çok amaçlı bir yaklaşımı içermektedir. Algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için 60 aktiviteden oluşan bir zaman-maliyet-kalite problemi üzerinde testler yapılmıştır. Araştırmacılar, geliştirdikleri modeli NSGA-II, MOPSO, MODE ve MOABC algoritmaları ile karşılaştırarak daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Cheng vd. (2016), inşaat proje çizelgelemesinde zaman-maliyet-kalite ödünleşimi problemini çözmek için uyarlanabilir mutasyon stratejisi ile kaotik başlangıçlı çok amaçlı diferansiyel evrim (CA-MODE) algoritmasını geliştirmişlerdir. Pareto sonuçlarını elde etmek için arşiv ve kalabalık entropi yöntemini kullanan baskın olmayan sıralama tabanlı çok amaçlı yöntemi geliştirdikleri algoritmaya entegre etmişlerdir. Önerdikleri algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için 18 aktiviteden oluşan bir zaman-maliyet-kalite problemini test etmişlerdir. Yazarlar, önerdikleri modeli NSGA-II, MOPSO ve MODE algoritmaları ile karşılaştırmışlar ve bu algoritmalara göre çok amaçlı optimizasyon problemlerinde daha iyi performans sergilediklerini göstermişlerdir.

Polat vd. (2015), inşaat projelerinde taşeron seçimi için baskın olmayan sıralama tabanlı genetik (NSGA-II) algoritma kullanılarak çok amaçlı bir optimizasyon modeli

geliştirilmiştir. Yazarlar, zaman, maliyet ve kalite performanslarını dikkate alarak en uygun taşeron kombinasyonunu seçmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, İstanbul'da bir ticaret merkezi projesi vaka çalışması olarak ele alınmış ve 20 farklı iş paketi için taşeron seçenekleri değerlendirilmiştir. Geliştirdikleri model, taşeronlar arasındaki etkileşimleri göz önünde bulundurarak tüm iş paketleri için en uygun taşeron kombinasyonunu seçmeyi başarmıştır.

Magalhaes-Mendes (2016), inşaat projelerinde zaman-maliyet-kalite dengesi optimizasyonu için genetik algoritma kullanmıştır. Yazar, her bir amaca ağırlık atayarak bunları tek bir amaca dönüştürerek optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Vaka çalışması olarak, 7 aktiviteden oluşan bir proje incelemiş ve sonuçlar önerdikleri algoritmanın proje süresi, maliyet ve kalite açısından iyi çözümler sağladığını göstermiştir.

Kannimuthu vd. (2019), çoklu modlu kaynak kısıtlamalı proje çizelgeleme probleminde zaman, maliyet ve kaliteyi optimize etmek için çok amaçlı ikili tam sayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. En iyi uzlaşma çözümlerini belirlemek için RR-PARETO3 algoritması kullanılmıştır. Pareto cephesinden elde edilen çözümlerden en iyi tek çözümün seçimi için RR-PARETO3 algoritması kullanılmıştır. Önerdikleri algoritma her bir kriterin önem sırasına ve duyarlılığına göre en kötü çözümleri iteratif olarak filtreleyerek tek bir optimal çözüme ulaşmıştır. Bu yaklaşım, bireysel hedeflerin değerlerini tek bir sayıya indirgemeden, tüm hedeflerin dengeli bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Luong vd. (2021) inşaat projelerinde zaman-maliyet-kalite dengesi optimizasyonu için karşıt tabanlı çok amaçlı diferansiyel evrim (OMODE) algoritması kullanılmıştır. Yazarlar, bu çok amaçlı optimizasyon probleminde, proje süresi, maliyeti ve kalitesi arasında denge sağlamak için karşıt tabanlı öğrenme tekniği ile popülasyon sıçraması işlemlerini kullanmış ve çeşitliliği korumak için kalabalık entropi tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemini kullanmışlardır. Çalışma, 18 aktiviteden oluşan bir otoyol inşaat projesi vaka çalışmasını ele almış ve önerilen algoritmanın etkinliğini göstermiştir. Sonuçlar, OMODE algoritmasının, NSGA-II, MOPSO ve MODE gibi diğer optimizasyon algoritmalarına kıyasla daha iyi çözümler sağladığını göstermektedir.

Sharma ve Trivedi (2022a), inşaat projelerinde kalite değerlerinin ağırlıklarını belirlemek için analitik hiyerarşi sürecinden (AHP) faydalanmışlardır. 13 aktiviteli zaman-maliyet-kalite problemini çözmek için NSGA-II algoritmasını kullanmışlardır.

Son ve Khoi tarafından yapılan çalışmalarda (Son ve Khoi, 2022, 2024), inşaat projelerinin zaman, maliyet ve kalite optimizasyonu için balçık küf algoritması (SMA)

kullanarak bir model geliştirmişlerdir. Ancak, çalışmalarında spesifik olarak çok amaçlı optimizasyon yöntemini açıklamamışlardır. SMA algoritmasının verimliliği farklı aktivite sayılarına sahip vaka çalışmaları ile test edilmiştir.

Liu vd. (2023), inşaat projelerindeki zaman, maliyet ve kaliteyi optimize etmek için çok amaçlı bağışıklık kurt koloni algoritması (MOIWCA) kullanarak bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen çok amaçlı modelde optimizasyon sürecinde seçme ve eleme operatörü olarak, PESA2 algoritmasının önerdiği arşiv ve ızgara oluşturarak en kalabalık bölgelerin çıkarıldığı bir yöntemdir. Yazarlar, ödül-ceza mekanizmasını kullanarak geleneksel zaman-maliyet modelini geliştirmiş ve kalite ile zaman arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi dikkate alarak doğrusal olmayan bir zaman-maliyet-kalite modeli oluşturmuştur. Modelin etkinliği, yüksek hızlı bir demiryolu inşaat projesi üzerinde yapılan vaka çalışması ile gösterilmiştir.

1.4.3. Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski ve Kalite Literatür Taraması

Afshar ve Dolabi (2014), inşaat projelerinde zaman, maliyet ve güvenlik riski arasındaki çok amaçlı optimizasyon problemini ele almışlardır. Genetik algoritma tabanlı bir yöntem geliştirerek pareto sıralama, uygunluk orantılı seçim ve adaptif mutasyon oranı özelliklerini kullanmışlardır. Güvenlik risklerini değerlendirmek için niteliksel aktivite tabanlı bir güvenlik risk yöntemi (QASR) önermişlerdir. 18 aktiviteli inşaat projesi üzerinde yaptıkları inceleme neticesinde güvenlik risklerin dahil edilmesinin pareto optimal çözümlerin sayısını artırdığını ve güvenlik riskini iyileştirdiğini göstermiştir.

Panwar ve Jha (2021), inşaat projelerinde zaman, maliyet, kalite ve güvenlik risklerini eşzamanlı olarak optimize etmek için NSGA-III algoritmasını önermişlerdir. Bu yaklaşım, çok fazla amaçlı optimizasyon problemlerinde çeşitliliği korumada diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Sharma ve Trivedi (2022b), inşaat projelerinde çok modlu kaynak kısıtlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski ödünleşim problemi optimizasyonu için latin hiperküp (LHS) tabanlı NSGA-III algoritmasını kullanarak dört amacı eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlamışlardır. Yazarlar ayrıca, kalite belirlemesi için analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve güvenlik parametrelerinin belirlenmesi için bulanık mantık kullanmışlardır. Modelin performansını değerlendirmek için 13 faaliyetli bir vaka çalışması üzerinde uygulama

yapmış ve sonuçları standart NSGA-III ve çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu (MOPSO) ile karşılaştırmışlardır.

Sharma vd. (2023), inşaat projelerinde kalite ve güvenlik arasındaki dengeyi optimize etmek için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Model, proje kalite indeksi (PQI) maksimizasyonu ve proje güvenlik riski (PSR) minimizasyonu olmak üzere iki amaç fonksiyonunu ele almaktadır. Çalışmada, belirli zaman ve maliyet kısıtlamaları altında üç katlı bir bina örneği üzerinde test edilmiştir. Pareto-optimal çözümleri elde etmek için baskın olmayan sıralama kullanılmış ve global en iyi çözüm, en yüksek ortalama öklid mesafeye sahip çözüm olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) ile karşılaştırılmış ve PSO algoritmasının daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Son ve Khoi (2023c) , zaman, maliyet, kalite ve güvenlik olmak üzere dört farklı hedefi eş zamanlı olarak optimize etmek amacıyla adaptif karşıtlık tabanlı balçık küfü algoritması (AOSMA) adını verdikleri yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmanın performansı, 13 aktiviteden oluşan bir inşaat projesi üzerinde test edilmiş ve MOPSO, NSGA III ve LHS-tabanlı NSGA III gibi diğer popüler algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, AOSMA algoritmasının çözüm kalitesi ve hesaplama süresi açısından diğer algoritmalara göre üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Sharma ve Trivedi (2023a) inşaat projelerinin çizelgelemesi için ayrık karşıt-tabanlı baskın olmayan sıralama genetik algoritması (DOBNSGAIII) kullanarak diğer çok amaçlı optimizasyon algoritmalarına kıyasla daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Jain ve Dubey (2023), inşaat projelerinde çok modlu kaynak kısıtlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski ödünleşim problemi optimizasyonu için latin hiperküp (LHS) tabanlı NSGA-III algoritmasını kullanarak dört amacı eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlamışlardır.

Sharma ve Trivedi (2023b), projelerde zaman, maliyet, kalite, güvenlik riski ve çevresel etki olmak üzere beş amaç fonksiyonunu eşzamanlı optimize etmek için karşıtlık tabanlı baskın olmayan sıralama genetik algoritması (OBNSGAIII) önermişlerdir. 25 aktiviteli bir örnek proje üzerinde test edilen model, MOPSO, OBMODE, NSGAIII ve LHS-NSGA III gibi diğer çok amaçlı optimizasyon algoritmalarına göre üstün performans göstermiştir.

1.4.4. Zaman-Maliyet-Çevresel Etki ve Kalite Literatür Taraması

Marzouk vd. (2008) inşaat projelerinde çevre kirliliğini ele alan çok amaçlı bir optimizasyon çerçevesi sunmuşlardır. Çalışmalarında, proje süresi, maliyeti ve toplam kirlilik (toz, zararlı gazlar ve gürültü dahil) olmak üzere üç hedefi eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlamışlardır. Çok amaçlı optimizasyon yöntemi olarak baskın olmayan sıralama genetik algoritması (NSGA) yaklaşımını uygulamışlardır. Bu yaklaşım, çözümleri baskın olma seviyelerine göre sıralayıp, her seviyedeki çözümlere bir paylaşım fonksiyonu stratejisi uygulayarak pareto-optimal çözümler elde etmeyi hedeflemektedir. Araştırmacılar, önerilen çerçeveyi 25 inşaat faaliyeti içeren gerçek bir vaka çalışması üzerinde test etmiş ve algoritmanın çeşitli parametrelerinin (popülasyon büyüklüğü, nesil sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranları) duyarlılığını analiz etmişlerdir.

Ozcan-Deniz vd. (2012) proje süresi, maliyeti ve çevresel etki (küresel ısınma potansiyeli) olmak üzere üç hedefi eş zamanlı olarak optimize etmeyi amaçlamışlardır. Optimizasyon için NSGA-II algoritmasını kullanmışlardır. Önerdikleri çerçevede, zaman ve maliyete ek olarak çevresel etki değerlendirmesini entegre ederek, inşaat yönetiminde geleneksel proje yöntemini genişletmiştir. Araştırmacılar, önerilen çerçeveyi 11 inşaat faaliyeti içeren gerçek bir vaka çalışması üzerinde test etmişlerdir.

Liu vd. (2013) inşaat projelerinde toplam inşaat maliyetleri ve karbon emisyonlarını eş zamanlı olarak optimize etmek için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) tabanlı bir çok amaçlı optimizasyon modeli önermişlerdir. Pareto-optimal çözümleri elde etmek için, baskın olmayan çözümleri dinamik olarak saklayan ve güncelleyen bir arşiv kullanmışlardır. Modelin etkinliğini göstermek için, üç ana iş bölümü (tavan, duvar, zemin) içeren basitleştirilmiş bir yenileme projesi üzerinde uygulama yapmışlardır. Önerdikleri model inşaat projelerini iş paketlerine ayırarak her kaynak seçeneği için doğrudan ve dolaylı karbon emisyonlarını tahmin etmekte ayrıca toplam inşaat maliyetlerini hesaplayan ve çevresel dengeyi sağlayan Pareto-optimal çözümler sunmaktadır. Sonuçlar, orijinal tasarıma kıyasla hem maliyet hem de karbon emisyonlarında önemli azalmalar göstermiştir. Ayrıca, modeli ticari bir yazılım kullanarak uygulamışlardır.

Cheng ve Tran (2015), inşaat projelerinde zaman-maliyet-çevresel etki dengesini optimize etmek için karşıt tabanlı çoklu-amaçlı diferansiyel evrim (OMODE) algoritmasını geliştirmişlerdir. Yazarlar, pareto optimal çözümleri elde etmek amacıyla baskın olmayan sıralama ve entropi tabanlı kalabalık mesafesi yaklaşımını kullanılmıştır. Cheng ve Tran

(2015) yaptıkları çalışmada, vaka çalışması olarak Marzouk vd. (2008) tarafından önerilen 25 aktiviteli modeli kullanmışlar önerilen OMODE algoritmasının MODE, MOPSO ve NSGA-II gibi yaygın kullanılan çok amaçlı evrimsel algoritmalardan daha iyi çözümler ürettiğini göstermişlerdir.

Inyim vd. (2015), sürdürülebilir bina tasarımını desteklemek amacıyla yapı bilgi modellemesi (BIM) yardımıyla maliyet ve çevresel etki analizini entegre eden SimulEICon adlı bir yazılım aracı geliştirmişlerdir. Bu araç yardımıyla NSGA-II çok amaçlı genetik algoritmasını kullanarak inşaat süresi, maliyet ve karbon emisyonlarını optimize ederek ve karar vericilere çok sayıda optimal çözüm sunma yeteneğini ortaya koymuşlardır.

Panwar ve Jha (2019), inşaat projelerinde çok amaçlı çizelgeleme optimizasyonu için NSGA-III tabanlı bir model önermişlerdir. Model, zaman, maliyet, kaynak ve çevresel etki olmak üzere 4 hedefi eş zamanlı olarak optimize etmektedir. Araştırmacılar, önerilen modelin performansını literatürdeki iki ve üç hedefli modellerle karşılaştırarak doğrulamış ve üstün performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Marzouk ve Abdelakder (2019), sürdürülebilir inşaat kararlarını desteklemek için çok amaçlı optimizasyon ve çok kriterli karar verme yöntemlerini birleştiren kapsamlı bir çerçeve önermişlerdir. Çalışmalarında, inşaat süresi, yaşam döngüsü maliyeti, çevresel etki ve birincil eneryi tüketimini minimize etmek için NSGA-II algoritmasını kullanmışlardır. Yazarlar elde edilen Pareto optimal çözümler arasından en iyi alternatifi seçmek için yedi farklı MCDM yöntemini karşılaştırmış ve bu yöntemleri değerlendirmek için yeni bir ölçü geliştirmişlerdir.

Banihashemi vd. (2021), inşaat projelerinin çevresel etkilerini minimize ederken zaman, maliyet ve kalite hedeflerini de optimize etmek için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşımda, her proje faaliyeti için farklı uygulama modları tanımlanmış ve Leopold matrisi yöntemi kullanılarak bu modların çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Yazarlar, çevresel etkileri en aza indirirken diğer proje hedeflerini de karşılayan optimal uygulama modlarını belirlemek için çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, bir kırsal su temini projesi üzerinde test edilmiş ve sonuçlar, projenin çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltırken diğer hedefleri de karşıladığını göstermiştir.

Tiwari vd. (2022), inşaat projelerinde zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyonu için NSGAIII algoritması yardımıyla 13 aktiviteli bir örnek proje üzerinde modellerini test etmiş ve NSGA-II algoritması ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, pareto-optimal çözümler kümesinden tek bir optimal çözüm seçmek için ağırlık toplam yöntemini kullanmışlardır.

Huynh vd. (2021), inşaat projelerinde zaman, maliyet, kalite ve karbon dioksit emisyonu (TCQE) faktörlerini eş zamanlı olarak optimize etmek için çok amaçlı sosyal grup optimizasyonu (MOSGO) adlı yeni bir algoritma önermişlerdir. Araştırmacılar, algoritmanın performansını iki gerçek inşaat projesi üzerinde test etmiş ve sonuçları MODE, MOABC, MOPSO ve NSGA-II gibi yaygın kullanılan çok amaçlı evrimsel algoritmalarla karşılaştırmışlardır. Yazarlar, pareto-optimal çözümleri elde etmek için baskın olmayan sıralama ve kalabalık entropi yöntemlerini kullanmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda, MOSGO algoritmasının diğer algoritmalara göre daha iyi çeşitlilik, yakınsama ve dağılım sağladığını göstermiştir. Ayrıca, elde edilen pareto-optimal çözümler arasından en uygun çözümü seçmek için kanıta dayalı akıl yürütme yöntemini kullanmışlardır.

Kaveh vd. (2021) inşaat projelerinde zaman, maliyet, kaynak kullanımı, çevresel etki, güvenlik riski ve kaliteyi optimize eden çok amaçlı optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, referans noktalama tabanlı baskın olmayan sıralama diferansiyel evrim Algoritması (NSDE-R) kullanılmıştır. Bu algoritma, hedef fonksiyon uzayında çeşitliliği korumak için eşit olarak dağıtılmış referans noktalarını kullanmaktadır. Ayrıca, nihai çözümü belirlemek için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Modelin etkinliği, bir bina inşaatı projesi üzerinde gerçekleştirilen vaka çalışması ile gösterilmiştir.

Shishehgarkhaneh vd. (2022), bina bilgi modellemesi (BIM) ile yeni geliştirdikleri ateş şahini algoritması (FHO) adlı metasezgisel algoritmanın entegrasyonuna dayalı bir çerçeve önermişlerdir. Araştırmacılar, 5 katlı bir konut binası üzerinde yaptıkları vaka çalışmasında, FHO algoritmasının zaman, maliyet, kalite, risk ve karbon emisyonu gibi beş farklı hedefi eş zamanlı optimize etme yeteneğini test etmişlerdir. Tüm bu hedefleri tek bir amaç fonksiyonunda birleştiren bir yaklaşım benimseyerek, ağırlıklı toplam yöntemini kullanmışlardır.

Son ve Khoi (2023a), inşaat projelerinde kaynakların kısıtlı olduğu zaman, maliyet, kalite ve çevresel etki arasındaki dengeyi optimize etmek için yeni bir hibrit algoritma önermişlerdir. Uyarlanabilir seçim balçık küfü algoritması (ASSMA) adını verdikleri bu yöntem, balçık küfü algoritması (SMA) ile Turnuva Seçimi (TS) tekniğini birleştirmektedir. Yazarlar, algoritmanın performansını 8 aktiviteli bir kırsal su boru hattı projesi üzerinde test etmişlerdir. Çalışmada, çok amaçlı optimizasyon için pareto yaklaşımı kullanıldığı belirtilmiş, ancak pareto çözümlerinin elenmesi ve seçilmesi için kullanılan spesifik bir yöntem (örneğin, kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama gibi) açıkça tanımlanmamıştır.

Son vd. (2023), inşaat projelerinde zaman, maliyet ve karbon emisyonu arasındaki dengeyi optimize etmek için geliştirilmiş çok amaçlı çekirge optimizasyon algoritmasını (eMOGOA) önermişlerdir. Araştırmacılar, orijinal çok amaçlı çekirge optimizasyon algoritmasını (MOGOA) turnuva seçimi (TS) ve zıtlık tabanlı öğrenme (OBL) teknikleriyle birleştirerek algoritmanın keşif ve sömürü dengesini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Yazarlar, algoritmanın performansını 29 aktiviteli gerçek bir karayolu inşaat projesi üzerinde değerlendirilmiştir. Ancak, makalede Pareto optimal çözümlerin nasıl elde edildiğine dair spesifik bir çok amaçlı yöntem açıkça belirtilmemiştir.

Son ve Khoi (2023b), inşaat projelerinde zaman-maliyet-kalite- karbon emisyonu (TCQE) optimizasyonu için yeni bir hibrit algoritma olan balçık küf algoritmasını karşıt tabanlı öğrenme, turnuva seçimi ve mutasyon/çaprazlama operatörleri ile birleştiren SMAOTM algoritmasını geliştirmişlerdir Algoritmanın etkinliğini test etmek için Vietnam'da üç gerçek inşaat projesini kullanmışlardır. SMAOTM algoritmasının performansını MOSGO, MODE, MOPSO, NSGA-II ve CAMODE gibi son yıllarda literatürde kullanılan algoritmalarla karşılaştırmışlardır. Yazarlar, algoritmanın genel yapısını ve ana bileşenlerini açıklamışlar, ancak pareto cephesindeki çözümlerin nasıl korunduğu veya güncellendiği konusunda detaylı bilgi vermemişlerdir.

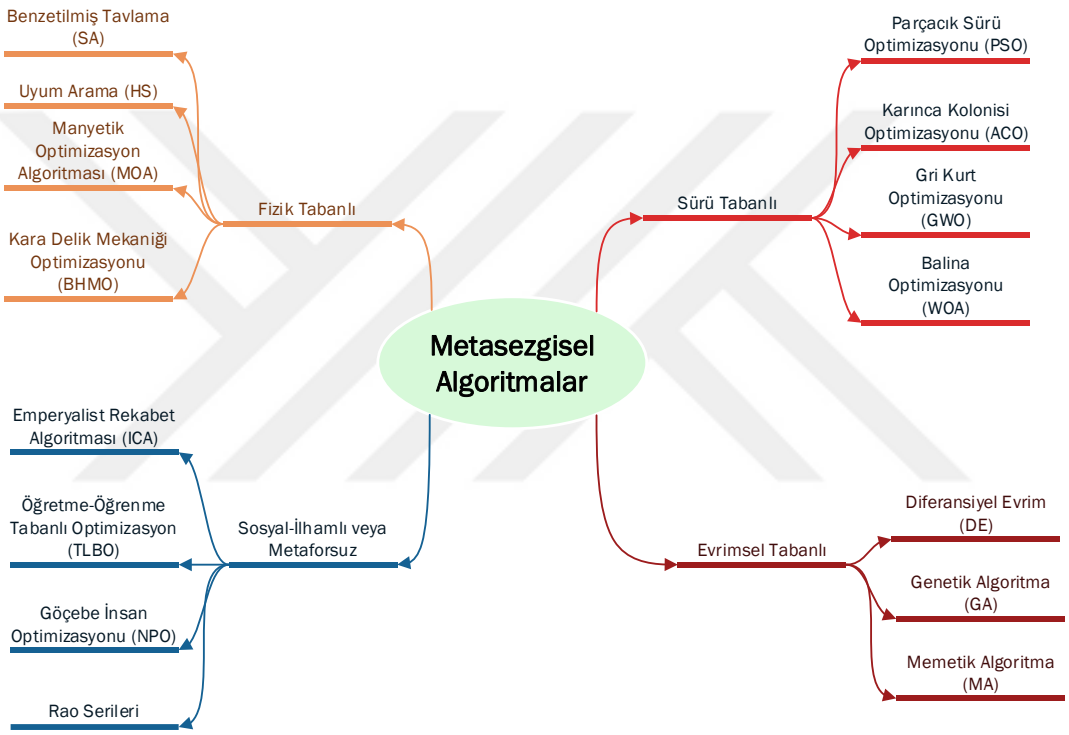
1.5. Metasezgisel Algoritmalar

Metasezgisel algoritmalar, son yıllarda karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan gelişmiş arama ve optimizasyon teknikleridir. Bu algoritmalar evrimsel süreçlerden, fizik yasalarından, hayvan sürü davranışlarından, insan sosyal davranışlarından ve matematiksel sistemlerden ilham alarak geliştirilmektedir (Mirjalili vd., 2014). Şekil 1'de bazı metasezgisel algoritmalara ait örnekler gösterilmektedir.

Bu tür algoritmalar, özellikle geleneksel matematiksel yöntemlerin yetersiz kaldığı, çözüm uzayının çok büyük olduğu ve birden fazla hedefin eş zamanlı optimize edilmesi gereken durumlarda etkili sonuçlar vermektedir. Birçok mühendislik problemlerinde, metasezgisel algoritmaların keşif ve sömürü yetenekleri kullanılarak global optimuma yakın çözümler başarıyla elde edilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, metasezgisel algoritma geliştirmekten ziyade mevcut algoritmaların, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kullandığı seçme ve eleme

operatörlerinin değiştirilmesiyle performanslarının artırılabileceğini göstermektir. Bu kapsamda operatör geliştirmesi yapılacak algoritmaların seçiminde, literatürde son yıllarda önerilmiş ve farklı mühendislik alanlarında başarılı sonuçlar göstermiş olan Rao serileri, gri kurt algoritması ve balina algoritması tercih edilmiştir. Ancak, geliştirilen programa yeni bir algoritma eklemek oldukça rahat ve kullanıcı arayüzlüdür. Takip eden bölümlerde, bu algoritmaların matematiksel formülasyonları, çalışma prensipleri detaylı olarak açıklanacaktır.



Şekil 1. Metasezgisel algoritmalar

1.5.1. Rao Serileri

Rao serileri, Rao (2020) tarafından geliştirilen basit, metafor içermeyen ve herhangi parametreler gerektirmeyen üç optimizasyon algoritmasından oluşmaktadır. Bu seriler sadece popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sayısı gibi temel kontrol parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. Rao serileri, en iyi ve en kötü çözümleri ve aday çözümler arasındaki rastgele etkileşimleri kullanarak arama uzayını keşfetmektedir. En iyi aday çözüm tüm aday çözümler arasında amaç fonksiyonunun en iyi değerini ve en kötü aday çözüm ise en kötü

değerini alır. Bu algoritmaların temel avantajları arasında basit matematiksel yapısı, kolay uygulanabilirliği, temel parametreleri gerektirmesi ve çeşitli optimizasyon problemlerinde etkili sonuçlar vermesi sayılabilmektedir (Kalemci ve İkizler, 2020; Pham vd., 2022; Rao ve Pawar, 2020; Uzlu, 2024). Rao serilerindeki üç algoritmanın matematiksel formülasyonu aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir:

$$\text{Rao} - 1;\ X_{yeni,i,t} = X_{i,t} + r_1 * \left(X_{En\ iyi,t} - X_{En\ kötü,t}\right) \quad (1)$$

$$\text{Rao} - 2;\ X_{yeni,i,t} = X_{j,t} + r_1 * \left(X_{En\ iyi,t} - X_{En\ kötü,t}\right) + r_2 * \left(\left|X_{i,t}\ veya\ X_{j,t}\right| - \left|X_{j,t}\ veya\ X_{i,t}\right|\right) \quad (2)$$

$$\text{Rao} - 3;\ X_{yeni,i,t} = X_{j,t} + r_1 * \left(X_{En\ iyi,t} - \left|X_{En\ kötü,t}\right|\right) + r_2 * \left(\left|X_{i,t}\ veya\ X_{j,t}\right| - X_{j,t}\ veya\ X_{i,t}\right) \quad (3)$$

Burada, r_1 ve r_2, [0,1] aralığında seçilen rastgele sayılardır. Rao-2 ve Rao-3 algoritmalarında, "veya" ifadesi rastgele seçilen iki aday çözüm arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Eğer birinci çözümün uygunluk değeri ikinci çözümden daha iyiyse, birinci çözümün değeri kullanılır aksi durumda ikinci çözümün değeri kullanılır. Bu karşılaştırma mekanizması algoritmaların arama uzayını daha etkin keşfetmesini sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında sadece Rao-2 algoritması kullanılmıştır. Bunun nedeni, çok amaçlı inşaat proje planlama problemlerinin ayrık optimizasyon problemleri olmasıdır. Bu tür problemlerde çözümler zaten pozitif tam sayılardan oluştuğu için Rao-2 ve Rao-3 algoritmaları aynı sonuçları üretmektedir.

1.5.2. Gri Kurt Algoritması

Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (GWO), Mirjalili vd. (2014) tarafından doğadaki gri kurtların sosyal davranış ve avlanma stratejilerinden ilham alınarak geliştirilmiş bir metasezgisel optimizasyon algoritmasıdır. GWO algoritması, doğadaki gri kurt sürülerinin karmaşık sosyal yapısını ve avlanma mekanizmalarının, matematiksel ifadelere dökülerek optimizasyon problemlerine başarılı bir şekilde uyarlanmıştır.

Doğada gri kurt sürüleri, sosyal hiyerarşi açısından dört temel kategoride sınıflandırılır:

1. Alfa (α): Sürünün lideri ve en üst karar verici konumunda olan kurttur. Sürünün yönünü, avlanma stratejisini ve yerleşim kararlarını belirler.

2. Beta (β): Alfa kurdun hemen altında yer alan ikinci lider konumundadır. Alfa kurdun kararlarını destekler ve sürünün yönetiminde önemli rol oynar.
3. Delta (δ): Sürü hiyerarşisinde üçüncü sırada yer alan kurtlardır. Alfa ve beta kurtların emirlerini uygular.
4. Omega (ω): Sürü hiyerarşisinin en alt seviyesindeki kurtlardır. Diğer kurt kategorilerinin emirlerine uymak ve sürünün hayatta kalmasına katkıda bulunmakla yükümlüdürler.

Avlanma Stratejisi: Algoritma, gri kurtların avlanma davranışını üç temel aşamada (avın yerini belirleme, avı kuşatma, avı yakalama) matematiksel olarak ifade etmektedir. Algoritmanın temel çalışma prensibi şu aşamaları içerir:

$$\vec{A} = 2\vec{a}\vec{r}_1 - \vec{a}, \vec{C} = 2\vec{r}_2 \tag{4}$$

$$\vec{D}_\alpha = \left|\vec{C}_1\vec{X}_\alpha - \overrightarrow{X(t)}\right|, \quad \vec{D}_\beta = \left|\vec{C}_2\vec{X}_\beta - \overrightarrow{X(t)}\right|, \quad \vec{D}_\delta = \left|\vec{C}_3\vec{X}_\delta - \overrightarrow{X(t)}\right| \tag{5}$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta), \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta) \tag{6}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \tag{7}$$

Burada, alfa, beta ve delta gri kurtlarının pozisyon güncelleme vektörü $X_{1,2,3}$ ile gösterilmiştir. r_1 ve r_2 [0,1] arasında değişen rastgele bir sayı, a ise 2'den 0'a doğru doğrusal olarak azalan bir sayıyı ifade etmektedir. A ve C kontrol vektörleri, algoritmanın keşif ve sömürü arasındaki dengeyi sağlamaktadır.

1.5.3. Balina Optimizasyon Algoritması

Balina Optimizasyon Algoritması (WOA), Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından geliştirilmiştir. WOA algoritması, kambur balinaların avlanma davranışını taklit eden bir metasezgisel yöntemdir. Algoritma, balinaların avı çevreleme davranışını, balon ağ saldırı mekanizmasını ve av arama süreçlerini matematiksel olarak modelleyerek gerçekleştirir. Bu süreçte, balinaların avı çevrelemesi rastgele bir arama veya en iyi arama ajanı kullanılarak simüle edilir. Aynı zamanda algoritma, kambur balinaların spiral hareketlerle avın etrafında dolaşmasını taklit eden bir spiral güncelleme mekanizması kullanılır.

Avın Çevrelenmesi: Balinalar, avlarının yerini tespit ederek onları çevreler. Optimizasyon sürecinde bu davranış, en iyi çözüm pozisyonunu "av" olarak kabul

edilmesiyle modellenir. Diğer arama ajanları (balinalar), en iyi çözüme yaklaşarak pozisyonlarını ava göre günceller. WOA algoritması, optimum noktanın en iyi çözüm etrafında olduğu varsayımıyla çalışır ve bu davranışı aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade eder:

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\vec{X^*}(t) - \vec{X}(t)\right| \tag{8}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X^*}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \tag{9}$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a}, \vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \tag{10}$$

Burada, t mevcut iterasyonu, $X^*(t)$ en iyi konum vektörünü, X(t) arama ajanı vektörünü, A ve C katsayı vektörlerini göstermektedir. a, 2'den 0'a doğru iterasyon boyunca lineer olarak azalır, r ise [0,1] arasında rastgele değişen bir vektördür.

Baloncuk ağ saldırısı iki mekanizma ile modellenmiştir. Büzülen çember mekanizması durumunda A değeri rastgele [-1, 1] aralığında ayarlanmasıyla balinaların mevcut en iyi çözümün yakınında hareket etmesi sağlanır. Spiral güncelleme pozisyonundaysa balinaların avın etrafında logaritmik bir spiral boyunca hareket etmesini aşağıdaki denklemle modelleyen bir mekanizmadır:

$$\vec{X}(t+1) = \left|\vec{X^*}(t) - \vec{X}(t)\right| e^{bl} \cos(2\pi l) + \vec{X^*}(t) \tag{11}$$

Burada, $|X^*(t)-X(t)|$ ile balina ile av arasındaki mesafeyi ifade eder. b, logaritmik spiral şeklinin sabit parametresi ve l ise [-1,1] arasında rastgele bir sayıdır. WOA, av arama aşamasında keşfi desteklemek için ajanların rastgele konumlara yönelmesini sağlar. Bu süreçte, ajanlar rastgele seçilen başka bir ajana doğru hareket eder. Bu süreçlerin matematiksel ifadeleri Denklem 12 ve 13'te verilmektedir.

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\overrightarrow{X_{rast.}}(t) - \vec{X}(t)\right| \tag{12}$$

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_{rand}}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \tag{13}$$

Burada X_{rand} rastgele seçilmiş bir popülasyonu ifade etmektedir. |A|>1 olduğunda durumunda algoritma, rastgele bir arama ajanını referans alarak keşif yaparken, |A|<1

durumunda en iyi çözüm seçilerek sömürü gerçekleştirilir. Ayrıca, her bir popülasyon rastgele üretilen p değerine bağlı olarak, %50 olasılıkla spiral veya dairesel hareket arasında geçiş yapabilir. Bu mekanizma, algoritmanın keşif ve sömürü aşamalarını dinamik bir şekilde dengelemesini sağlar.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \overrightarrow{X^*}(t) - \overrightarrow{AD} \; if \; |A| < 1 \\ \overrightarrow{X_{rand}} - \vec{A}\vec{D} \; if |A| > 1 \end{cases} \quad if \; p < 0.5$$
$$\left|\overrightarrow{X^*}(t) - \vec{X}(t)\right| e^l \cos(2\pi l) + \overrightarrow{X^*}(t) \quad if \; p \geq 0.5 \qquad (14)$$

1.6. Tezin İçeriği

Birinci bölümde, projelerin başarılı bir şekilde yönetilmesinde çok amaçlı optimizasyonunun önemi ve inşaat sektöründe karşılaşılan temel planlama zorlukları ele alınmıştır. Bu kapsamda literatürdeki araştırma boşluğu incelenmiş, çalışmanın amacı ve kapsamı belirlenmiş ve detaylı bir literatür taraması sunulmuştur.

İkinci bölümde, çalışmanın metodolojik altyapısı detaylandırılmıştır. Öncelikle, optimizasyon probleminin tanımı ve matematiksel formülasyonu ile başlamakta, ardından problem kısıtlamaları detaylandırılmaktadır. Sonrasında, projelerin optimizasyonu için kullanılan Rao serileri, balina optimizasyon ve gri kurt optimizasyon algoritmaları ile entegre edilen dört farklı çok amaçlı seçme ve eleme operatörü, kalabalık mesafe tabanlı (NDSII), referans noktalı (NDSIII), güçlendirilmiş pareto tabanlı (SP) ve operatörleri değiştirilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) operatörleri detaylı olarak açıklanmıştır. Daha sonra, pareto-optimal çözümler arasından en uygun çözümün seçimi için kullanılan en iyi bütünsel uyarlanabilir özellik sıralama tekniği (BHARAT) yöntemi anlatılmış, ardından önerilen çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının performansını değerlendirmek için kullanılan çeşitlilik, dağılım ve baskınlık metrikleri ele alınmıştır. Son olarak, inşaat projelerinin etkin yönetimi için geliştirilen MATLAB ve MS Project entegrasyonlu ProjectOptima yazılım programının özellikleri ve kullanımı açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, geliştirilen algoritmaların performansları farklı vaka çalışmaları üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak irdelenmiştir. Bulgular ve tartışma bölümü, optimizasyon problemlerinin artan karmaşıklığına göre organize edilmiştir. İlk olarak, iki amaçlı zaman-maliyet (TCTP) ödünleşimlerinde NDSII ve SP operatörlerinin performansları karşılaştırılmıştır. Ardından, üç amaçlı ödünleşim problemlerinde (zaman-maliyet-kalite (TCQTP), zaman-maliyet-çevresel etki (TCETP) ve zaman-maliyet-güvenlik

riski(TCSRTP)), NDSII, NDSIII ve SP operatörlerinin etkinliği incelenmiştir. Dört amaçlı optimizasyon problemlerinde (zaman-maliyet-kalite-çevresel etki (TCQETP) ve zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski (TCQSRTP)) önerilen MSP operatörünün performansı, SP ve NDSIII operatörleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, beş amaçlı (zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski-çevresel etki (TCQSRETP)) optimizasyon probleminde MSP ve NDSIII operatörlerinin performansları analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında her bir grupta (TCTP, TCQTP, TCETP, TCSRTP, TCQSRTP, TCQETP, TCQSRETP) önerilen algoritmaların performanslarını daha doğru bir şekilde test etmek için literatürde önerilen algoritmalar (MOSGO, NGSAIII, MOGA, OMODE, MOABDE, OBNSGAIII) popülasyon ve iterasyon sayıları sabit tutularak yani orijinal haliyle tekrar üretilmiştir. Böylece hem literatürdeki algoritmaların tekrar üretilmesinde orijinal çalışmadaki sonuçların tutarlılığı doğrulanmış hem de bu çalışma kapsamında önerilen algoritmaların performansı objektif bir şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında üretilen algoritmaların büyük ölçekli projelerde de performansını test edebilmek için her bir grupta yer alan bir vaka çalışması on kat büyütülerek operatörlerin ve algoritmaların büyük ölçekli projelerdeki performansı da incelenmiştir. Her bir problem için algoritmaların ürettiği pareto çözümleri, 10 farklı bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilmiş ve her bir amaç fonksiyonu için ulaşılabilen en optimum değerler karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretilen pareto çözümlerinin performansı, çözüm çeşitliliği, dağılımı, baskınlık ve hesaplama verimliliği gibi kriterler açısından kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde, çalışmanın sonuçları, elde edilen önemli bulgular ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Proje Yönetim Parametreleri

İnşaat projelerinin çok amaçlı optimizasyonu için geliştirilen yöntemlerin detaylı olarak inceleneceği bu bölümde, öncelikle problemin temelini oluşturan zaman, maliyet, kalite, çevresel etki ve güvenlik riski amaç fonksiyonları için matematiksel formülasyonlar sunulmaktadır. Bu formülasyonu takiben, optimizasyon sürecinde dikkate alınması gereken kısıtlamalar tanımlanmaktadır.

Amaç fonksiyonlarının optimizasyonu için bu çalışma kapsamında kullanılan, Rao serileri, balina optimizasyon ve gri kurt optimizasyon algoritmalarının çalışma prensipleri ve özellikleri genel bilgiler bölümünde kapsamlı şekilde açıklanmıştır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde bu algoritmaların etkin kullanımı için dört farklı operatör kullanılmıştır. Bu kapsamda kalabalık mesafe tabanlı (NDSII), referans noktalı (NDSIII) ve güçlendirilmiş pareto (SP) operatörleri ile bu çalışmada önerilen operatörleri değiştirilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) operatörünün yapısı ve özellikleri detaylı olarak açıklanmıştır.

Optimizasyon süreci sonunda elde edilen pareto optimal çözümler arasından en uygun çözümün seçilebilmesi için çok kriterli karar verme yöntemi olan BHARAT (en iyi bütünsel uyarlanabilir özellik sıralama tekniği) yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının performansını farklı açılardan değerlendirmek için dört temel metrik ele alınmıştır. Pareto çözümlerinin kalitesini ölçen hiper hacim (HV), çözümlerin uzaydaki dağılımını değerlendiren yayılma (SP), algoritmaların birbirlerine göre üstünlüğünü karşılaştıran baskınlık metrikleri (C-metrik) ve çözümlerin ideal noktaya olan yakınlığını belirleyen ortalama ideal mesafe (MID) metrikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Son olarak, teorik çalışmaların pratiğe aktarılmasını kolaylaştırmak amacıyla geliştirilen MATLAB ve MS Project entegrasyonlu ProjectOptima yazılım programına ait detaylar verilmiştir.

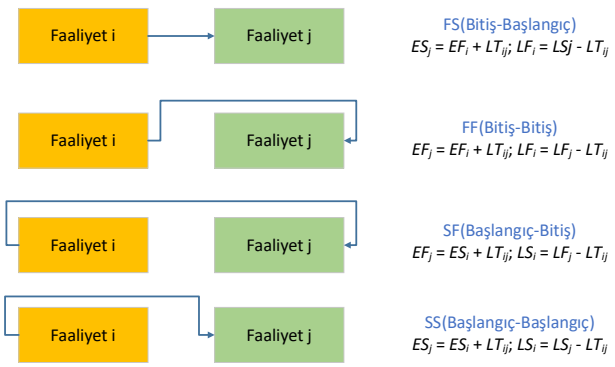
2.2. Amaç Fonksiyonlarının Matematiksel Formülasyonu

İnşaat projelerinde her aktivite için farklı yapım yöntemleri, ekipman seçenekleri ve kaynak kombinasyonları mevut olabilmektedir. Her bir alternatif seçimi, aktivitenin

tamamlanma süresini, maliyetini, kalitesini, çevresel etkisini ve güvenlik riskini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, daha fazla işçi ve ekipman kullanımı aktivite süresini kısaltabilirken maliyeti artırabilir veya yüksek performanslı malzeme kullanımı kaliteyi artırırken hem de maliyeti yükseltebilir. Bu nedenle, n adet aktivite ve her aktivite için m adet alternatif olduğu durumda, toplam m^n farklı kombinasyon oluşmaktadır. Bu kombinasyonlar arasından projenin hedeflerini en iyi şekilde karşılayan seçeneklerin belirlenmesi için optimizasyon yaklaşımı gerekmektedir.

İnşaat projelerindeki aktivitelerin süre optimizasyonunda en temel yaklaşımlardan biri olan Kritik Yol Metodu (CPM), projedeki aktivitelerinin birbirleriyle olan ilişkilerini ve sürelerini dikkate alarak projenin toplam süresini hesaplayan bir yöntemdir. Walker ve Kelley (1959) tarafından geliştirilen bu yöntem, projelerdeki kritik faaliyetleri belirleyerek hangi işlerin gecikme toleransına sahip olmadığını ortaya koymaktadır. Böylece proje yöneticileri, kaynakları daha etkin kullanabilmekte ve projenin zamanında tamamlanması için gerekli önlemleri alabilmektedir.

CPM'in temel prensibi, projedeki aktivitelerin birbirleriyle olan bağlantılarını ve öncelik ilişkilerini bir ağ diyagramı üzerinde göstermektir. Bu ağ yapısı, oklar üzerinde aktivite (AOA) ve düğümler üzerinde aktivite (AON) olmak üzere iki farklı şekilde oluşturulabilir. AOA yönteminde aktiviteler oklar ile gösterilirken düğüm noktaları olayları temsil etmektedir. AON yönteminde ise aktiviteler düğümler ile gösterilirken oklar ilişkileri temsil etmekte ve dört farklı ilişki türünü (Bitişten Başlangıca, Başlangıçtan Başlangıca, Bitişten Bitişe ve Başlangıçtan Bitişe) daha basit ve anlaşılır şekilde gösterebilmektedir. AON yönteminin daha esnek ve kullanışlı bir yapıya sahip olması nedeniyle günümüzde yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi dört temel ilişki türü bulunmaktadır.



Şekil 2. Aktiviteler arası ilişkiler

CPM yönteminde, projenin toplam süresini belirlemek için ileri ve geri hesaplama olmak üzere iki aşamalı bir süreç izlenmektedir. İleri hesaplama, başlangıç noktasından son noktaya doğru ilerleyerek her aktivite için erken başlama (ES) ve erken bitiş (EF) zamanlarını hesaplarken, geri hesaplama son noktadan başlangıç noktasına doğru ilerleyerek her aktivite için geç başlama (LS) ve geç bitiş (LF) zamanlarını belirlemektedir. Bu hesaplamalar sonucunda, toplam bolluk süresi sıfır olan (LS-ES=0 veya LF-EF=0) aktiviteler dizisi kritik yolu oluşturmaktadır. Kritik yollar üzerindeki aktivitelerin süreleri toplamı proje toplam süresini oluşturmaktadır. Denklem 15 ve 19 arasından projeye ait sürelerin hesaplanması gösterilmektedir.

$$EF_i = ES_i + D_{ik} \tag{15}$$

$$ES_j = \max(EF_i)\,, \forall i \in P_j \tag{16}$$

$$LS_i = LF_i - D_{ik} \tag{17}$$

$$LF_i = \min\big(LS_j\big)\,, \forall j \in S_i \tag{18}$$

$$Toplam\ Proje\ Süresi(T) = \max\{EF_i\}\,, i = 1,2, \dots \dots, n \tag{19}$$

İlk aktivite için ES = 0 olarak alınır ve projenin toplam süresi (T), son aktivitenin erken bitiş zamanına eşittir. Burada:

- D_{ik}: i aktivitesinin k alternatifi için süresi
- P_j: j aktivitesinin öncül aktiviteleri kümesi
- S_i: i aktivitesinin ardıl aktiviteleri kümesi
- n: Projedeki toplam aktivite sayısı

Proje maliyetinin optimizasyonu için toplam maliyet amaç fonksiyonu iki temel birleşiminden oluşmaktadır:

1. Doğrudan Maliyetler (DC): Her aktivitenin yürütülmesi için gereken işçilik, malzeme ve ekipman maliyetlerini içermektedir.
2. Dolaylı Maliyetler (IC): Projenin toplam süresine bağlı olarak değişen genel giderler, şantiye maliyetleri ve yönetim giderlerini kapsamaktadır.

Toplam maliyet amaç fonksiyonu denklem 20'de gösterilmiştir.

$$Toplam\ Maliyet(C) = \sum_{i=1}^{n} C_{ik} + ICxT \quad (20)$$

Burada,

- C_{ik}: i aktivitesinin k alternatifi için doğrudan maliyet
- IC: Dolaylı maliyet
- T: Projenin toplam süresi
- n: Projedeki toplam aktivite sayısı

Proje kalitesi, her aktivite için belirlenen kalite performans değerlerinin ağırlıklı ortalaması ile hesaplanır. Kalite amaç fonksiyonu problemlerde iki farklı matematiksel yaklaşımla maksimize edilmeye çalışılır. Birinci yaklaşımda, her aktivite için belirlenen ağırlık değerleri kullanılarak hesaplama yapılırken, ikinci yaklaşımda, aktivitelerin kalite performans değerlerinin doğrudan toplamının aktivite sayısına bölünmesiyle sonuç elde edilir. Bu iki matematiksel yaklaşım denklem 21 ve 22'de gösterilmiştir.

$$Toplam\ Kalite\ (Q) = \sum_{i=1}^{n} wt_i \sum_{a=1}^{A} wt_{i,a} \times Q_{i,a}^{k} \quad (21)$$

$$Toplam\ Kalite\ (Q) = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{ik}}{n} \quad (22)$$

Burada, ilk formülde $wt_{i,a}$ i faaliyetindeki diğer göstergelere kıyasla a kalite göstergesinin ağırlığıdır. wt_i, i faaliyetinin projedeki diğer faaliyetlere kıyasla ağırlığıdır. Denklem 8'de Q_{ik}, i aktivitesinin k alternatifi için kalite performans değerini, n ise toplam aktivite sayısını ifade etmektedir. Her aktivitenin kalite performans değeri farklı opsiyonlara göre değişebilmektedir. Toplam kalite 0-100 arasında ifade edilmektedir.

İnşaat projelerinde çevresel etkinin minimize edilmesi, sürdürülebilirlik açısından önemli bir hedeftir. Aktivitelerin çevresel etki değerleri, karbon emisyon miktarı, enerji tüketimi, hava kirliliği, su kirliliği, gürültü kirliliği ve atık miktarı gibi faktörlere bağlı olarak belirlenebilmektedir. Çevresel etki amaç fonksiyonu matematiksel olarak aşağıda ifade edilmektedir.

$$Toplam\ Çevresel\ Etki\ (E) = \sum_{i=1}^{n} E_{ik} \quad (23)$$

Burada, E_{ik}, i aktivitesinin k alternatifi için çevresel etki değerini ifade etmektedir. İnşaat projelerinde iş güvenliği, çalışanların sağlığı ve projenin başarılı bir şekilde tamamlanması açısından kritik öneme sahiptir. Aktivitelerin güvenlik risk değerleri; yüksekten düşme, elektrik çarpması, malzeme düşmesi, ekipman kazaları, yangın ve patlama riski gibi faktörlere bağlı olarak belirlenebilmektedir. Güvenlik riski amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$Toplam\ Güvenlik\ Riski\ (SR) = \sum_{i=1}^{n} SR_{ik} \quad (24)$$

Burada, SR_{ik}, i aktivitesinin k alternatifi için güvenlik riski değerini ifade etmektedir.

2.3. Optimizasyon Kısıtları

Çok amaçlı inşaat projelerinin optimizasyonunda algoritmaların ürettiği çözümlerin uygulanabilir olması için belirli kısıtlamaları sağlaması gerekmektedir. Bu kısıtlamalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Her aktivitenin farklı kaynak kombinasyonları ve yapım yöntemleri olabilmesine rağmen, aktivitenin yürütülmesi sırasında bunlardan yalnızca biri seçilebilmektedir.
- Üretilen yeni popülasyonların karar değişkenleri, her bir aktivite için alt sınır ve üst sınırı sağlayacak şekilde pozitif tamsayı olmalıdır.
- Aktiviteler arasındaki öncelik ilişkileri korunmalıdır. Bu ilişkiler projenin akış şemasına göre belirlenmektedir.

2.4. Proje Yönetim Parametrelerinin Çok Amaçlı Optimizasyonu

İnşaat projelerinin planlanmasında çok amaçlı optimizasyon, proje süresi, maliyeti, kalitesi, çevresel etkisi ve güvenlik riski gibi birbiriyle çelişen birçok hedefin eş zamanlı olarak optimize edilmesini amaçlamaktadır. Bu tür problemlerde hedefler arasında ödünleşimler bulunduğundan, tek bir optimal çözüm yerine birden fazla optimal çözümden

oluşan bir küme elde edilmektedir. Bu sebeple çok amaçlı optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen yaklaşımlar tarihsel süreç içerisinde önemli gelişmeler kaydetmiştir. İlk olarak Goldberg (1989), evrimsel algoritmaların çok amaçlı problemlere uygulanmasında baskınlık kavramının ve pareto optimallik ilkelerinin birlikte düşünülmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışma, baskınlık tabanlı sıralama yaklaşımını önererek günümüzde yaygın olarak kullanılan elitist tabanlı çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının temelini oluşturmuştur. Goldberg'in bu önerisi doğrultusunda, Fonseca ve Fleming (1993) baskınlık ilişkisine dayalı ilk çok amaçlı genetik algoritmayı (MOGA) geliştirmiş daha sonra Srinivas ve Deb (1994) baskın olmayan sıralama genetik algoritmasını (NSGA) önermiştir. Horn vd. (1994) ise niş oluşturma tekniğini kullanarak pareto cephesinin daha iyi keşfedilmesini sağlamıştır. Bu çalışmaları takiben, Zitzler vd. (1998) tarafından geliştirilen güçlü pareto evrimsel algoritması (SPEA), hem baskın olmayan çözümleri arşivleme hem de uygunluk paylaşımı stratejisini kullanmıştır. Corne vd. (2000) tarafından önerilen pareto zarf tabanlı seçim algoritması (PESA) ise çözüm uzayını hiper küplere bölerek çeşitliliği korumayı amaçlamıştır.

Bu algoritmaların eksikliklerini gidermek amacıyla çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının yeni versiyonlarla geliştirilmiştir. Zitzler vd. (2001), SPEA'nın geliştirilmiş versiyonu SPEA2 algoritmasını önermiş, Corne vd. (2001) ise PESA algoritmasının gelişmiş hali PESA2'yi geliştirerek bölge tabanlı seçim stratejisini iyileştirmiştir. Deb vd. (2002) tarafından geliştirilen NSGA-II algoritması, hızlı baskın olmayan sıralama ve kalabalık mesafe hesaplaması ile çok amaçlı optimizasyon problemlerinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir. Ancak, NSGA-II, SPEA2 ve PESA2 algoritmalarının dört ve daha fazla amaçlı problemlerdeki performansının önemli ölçüde düştüğü tespit edilmiştir (Chand ve Wagner, 2015). Bu nedenle Deb ve Jain (2014), çok fazla amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümü için referans noktalı baskın olmayan sıralama yaklaşımına dayanan NSGA-III algoritmasını geliştirmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle bu alandaki temel kavramların incelenmesi gerekmektedir. Bu bölümde sırasıyla baskınlık ilişkisi, Pareto optimallik ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları ele alınacaktır.

Baskınlık İlişkisi**:** Çok amaçlı optimizasyon problemlerindeki çözümler arasındaki ilişki, baskınlık kavramı ile ifade edilmektedir. Baskınlık, bir çözümün diğer bir çözüme

göre ne kadar iyi olduğunu belirlemek için kullanılan temel bir kavramdır ve iki temel koşulun sağlanması gerekmektedir:

1. İncelenen çözüm, diğer çözüme göre hiçbir amaçta daha kötü performans göstermemelidir.
2. İncelenen çözüm, diğer çözüme göre en az bir amaçta daha iyi performans göstermelidir. Bu ilişkiler matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

X_1 çözümünün X_2 çözümünü baskılaması için:

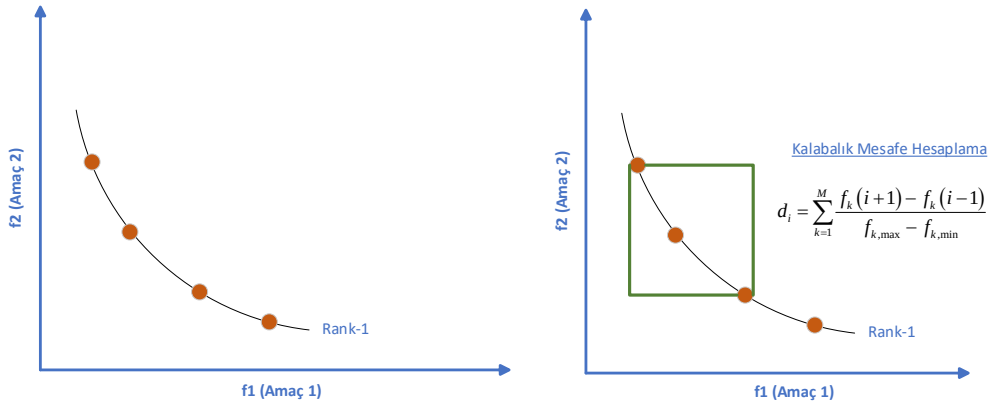
- $\forall i \in \{1,2,...,m\}: f_i(X_1) \leq f_i(X_2)$
- $\exists j \in \{1,2,...,m\}: f_j(X_1) < f_j(X_2)$

Pareto Optimallik: Bir çözümün pareto optimal olabilmesi için, kendisini baskılayan başka bir çözümün olmaması gerekmektedir. Başka bir deyişle, bir Pareto optimal çözümün herhangi bir amacını iyileştirmek ancak diğer amaçlardan en az birinin kötüleşmesi ile mümkün olabilmektedir. Pareto çözümlerin oluşturduğu kümeye pareto optimal küme veya pareto cephesi adı verilmektedir. Bu çözümler kümesi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde elde edilebilecek en iyi ödünleşimleri göstermektedir. İki amaçlı problemlerde pareto cephesi bir eğri, üç amaçlı problemlerde bir yüzey, dört ve daha fazla amaçlı problemlerde ise bir hiper-yüzey şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Bir sonraki bölümde seçme ve eleme operatörlerinin metasezgisel algoritmalarla entegrasyonu ele alınacaktır. Bu kapsamda sırasıyla kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), referans noktalı baskın olmayan sıralama (NDSIII), güçlendirilmiş pareto yöntemi (SP) ve operatörleri değiştirilmiş güçlendirilmiş pareto yöntemi (MSP) operatörleri detaylı olarak incelenecektir.

2.5. Kalabalık Mesafe Tabanlı Baskın Olmayan Sıralama Operatörü (NDSII)

Kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII) operatörü, ilk olarak Deb vd. (2002) tarafından NSGA-II algoritmasında önerilmiş bir seçme ve eleme operatörüdür. Bu operatörün temel çalışma prensibi iki ana bileşene dayanmaktadır. Temel özelliklerinden biri, Şekil 3'te gösterildiği gibi çözümleri sıralamak için pareto cepheleri sıralama (rank) kavramını ve çözümlerin çeşitliliğini korumak için kalabalık mesafe ölçütünü kullanmasıdır.



Şekil 3. NDSII operatöründe sıralama ve kalabalık mesafe

Baskın olmayan sıralama, popülasyondaki tüm çözümler baskınlık ilişkisine göre farklı cephelere ayrılır. İlk cephede hiç kimse tarafından domine edilmeyen çözümler yer alır ve bu çözümler pareto cephesi 1'e (Rank 1) atanır. İkinci cephede sadece birinci cephedeki çözümler tarafından domine edilen çözümler yer alır ve bunlar pareto cephesi 2'ye atanır. Bu süreç tüm çözümler bir sıralama değeri alana kadar devam eder.

Kalabalık mesafe hesaplaması, her bir cephe içindeki çözümlerin çeşitliliğini korumak için kullanılan bir metriktir. Her bir amaç fonksiyonunda komşu çözümler arasındaki normalleştirilmiş farkların toplamı ile hesaplanır. Cephenin uç noktalarındaki çözümlere sonsuz değeri atanarak bu çözümlerin korunması sağlanır. Kalabalık mesafenin matematiksel formülasyonu:

$$d_i = \sum_{k=1}^{M} \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_{k,max} - f_{k,min}} \tag{25}$$

Burada:

- f(i+1): i. çözümün k. amaç fonksiyonunda bir sonraki komşusunun değeri
- f(i-1): i. çözümün k. amaç fonksiyonunda bir önceki komşusunun değeri
- $f_{k,max}$: k. amaç fonksiyonunun maksimum değeri
- $f_{k,min}$: k. amaç fonksiyonunun minimum değeri

NDSII operatörüne göre, çözümlerin sıralanması sırasında öncelikle pareto cepheleri, küçükten büyüğe doğru sıralanır. Her bir pareto cephesine ait çözümler için kalabalık

mesafeler hesaplanarak, büyükten küçüğe doğru sıralama yapılır. Böylece, çözümlerin kalitesi pareto cepheleriyle, çeşitliliği ise kalabalık mesafe yardımıyla korunmuş olur.

Bu operatör özellikle iki ve üç amaçlı optimizasyon problemlerinde oldukça başarılı sonuçlar verdiği literatürdeki çalışmalarda görülmüştür (Eirgash vd., 2019; Yılmaz vd., 2023). Ancak amaç sayısı arttıkça, özellikle dört ve daha fazla amaçlı problemlerde kalabalık mesafe hesaplamasının etkinliği azalmakta ve çözümlerin çeşitliliğini korumada zorluklar yaşanmaktadır. Sırasıyla NDSII operatörünün Rao-1, Rao-2, GWO ve WOA algoritmaları ile entegrasyonu alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

2.5.1. NDSII Operatörünün Rao-1 ve Rao-2 Algoritmaları ile Entegrasyonu

Rao serileri bölümünde detaylı olarak açıklandığı gibi, Rao-1 ve Rao-2 algoritmaları optimizasyon sürecini en iyi ve en kötü çözümlere göre yönlendirmektedir. Bu algoritmaların NDSII operatörü ile entegrasyonu sonucunda geliştirilen NDSIIRao-1 ve NDSIIRao-2 algoritmalarının işlem adımları aşağıda detaylandırılmıştır:

Adım 1: Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi: Popülasyon büyüklüğü (N) ve maksimum iterasyon sayısı (it) belirlenir.

Adım 2: Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Proje planlama problemindeki aktivitelerin alternatif sayılarına bağlı olarak alt ve üst sınır koşulları dikkate alınarak tamsayı olacak şekilde rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her bir çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

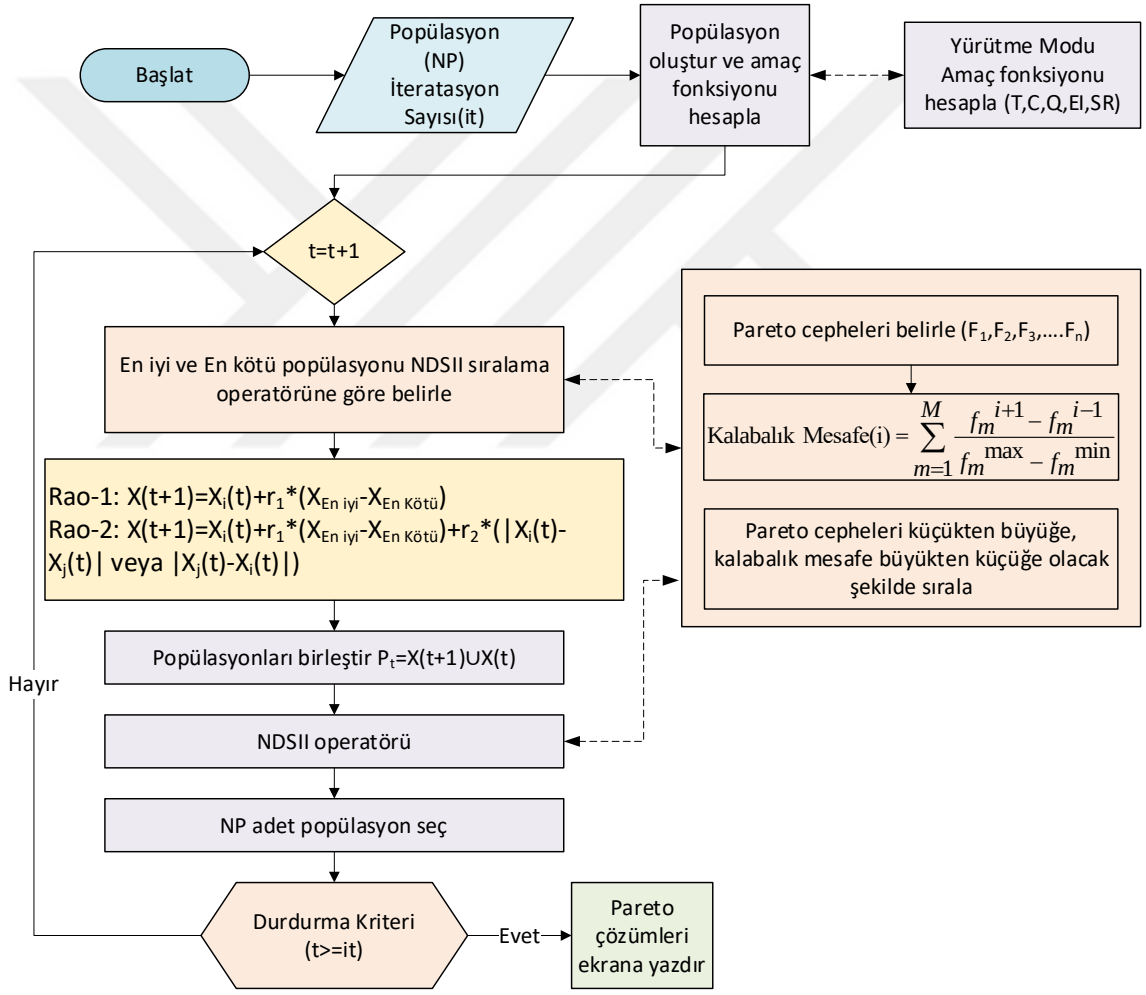
Adım 3: NDSII operatörünün uygulanması: Her çözüm için Rank değerleri belirlenir ve her Rank seviyesindeki çözümler için kalabalık mesafe değerleri hesaplanır. Rao algoritması için en iyi çözüm Rank-1 içindeki en yüksek kalabalık mesafe değerine sahip çözüm, en kötü çözüm ise son Rank'ta yer alan en düşük kalabalık mesafe değerine sahip çözüm olarak belirlenir.

Adım 4: Yeni popülasyonun oluşturulması: Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarının temel denklemleri (Denklem 1 ve 2) kullanılarak yeni çözümler üretilir. Üretilen çözümler için alt ve üst sınır kontrolleri yapılır ve ayrık optimizasyon problemi olduğu için en yakın tamsayıya yuvarlanır. Sonrasında amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 5: Popülasyonların Birleştirilmesi: Mevcut iterasyonda üretilen popülasyon ile son popülasyon birleştirilir.

Adım 6: NDSII'ye göre seçim: Birleştirilmiş popülasyon öncelikle Rank değerlerine göre küçükten büyüğe sıralanır ve her Rank içindeki çözümler için kalabalık mesafe değerleri hesaplanarak büyükten küçüğe sıralanır. Sıralanmış çözümler, başlangıçta belirlenen popülasyon büyüklüğü (N) kadar en iyi çözüm seçilir.

Adım 7: Sonlandırma kontrolü: Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa optimizasyon süreci sonlandırılır ve elde edilen Pareto-optimal çözümler karar vericiye sunulur. Aksi halde Adım 3'e dönülerek optimizasyon işlemine devam edilir. NDSIIRao1 ve NDSIIRao2'ye ait akış diyagramı Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. NDSIIRao-1 ve NDSIIRao-2 algoritmaları akış diyagramı

2.5.2. NDSII Operatörünün GWO ve WOA Algoritmaları ile Entegrasyonu

Metasezgisel algoritmalar bölümünde detaylı olarak açıklandığı gibi, GWO algoritması sosyal hiyerarşide alfa, beta ve delta kurtların liderliğinde, WOA algoritması ise rastgele veya en iyi çözüm rehberliğinde optimizasyon sürecini yönlendirmektedir. Bu algoritmaların NDSII operatörü ile entegrasyonunda izlenen adımlar aşağıda detaylandırılmıştır:

Adım 1: Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi: Popülasyon büyüklüğü (N) ve maksimum iterasyon sayısı (it) belirlenir.

Adım 2: Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Proje planlama problemindeki aktivitelerin alternatif sayılarına bağlı olarak alt ve üst sınır koşulları dikkate alınarak tamsayı formunda rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her bir çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 3: NDSII operatörünün uygulanması: Her çözüm için cephe değerleri belirlenir ve her cephe seviyesindeki çözümler için kalabalık mesafe değerleri hesaplanır. GWO algoritması için Rank-1 içindeki en yüksek üç kalabalık mesafe değerine sahip çözümler sırasıyla alfa, beta ve delta konumları olarak belirlenir. WOA algoritması için ise Rank-1 içindeki en yüksek kalabalık mesafe değerine sahip çözüm en iyi konum olarak belirlenir.

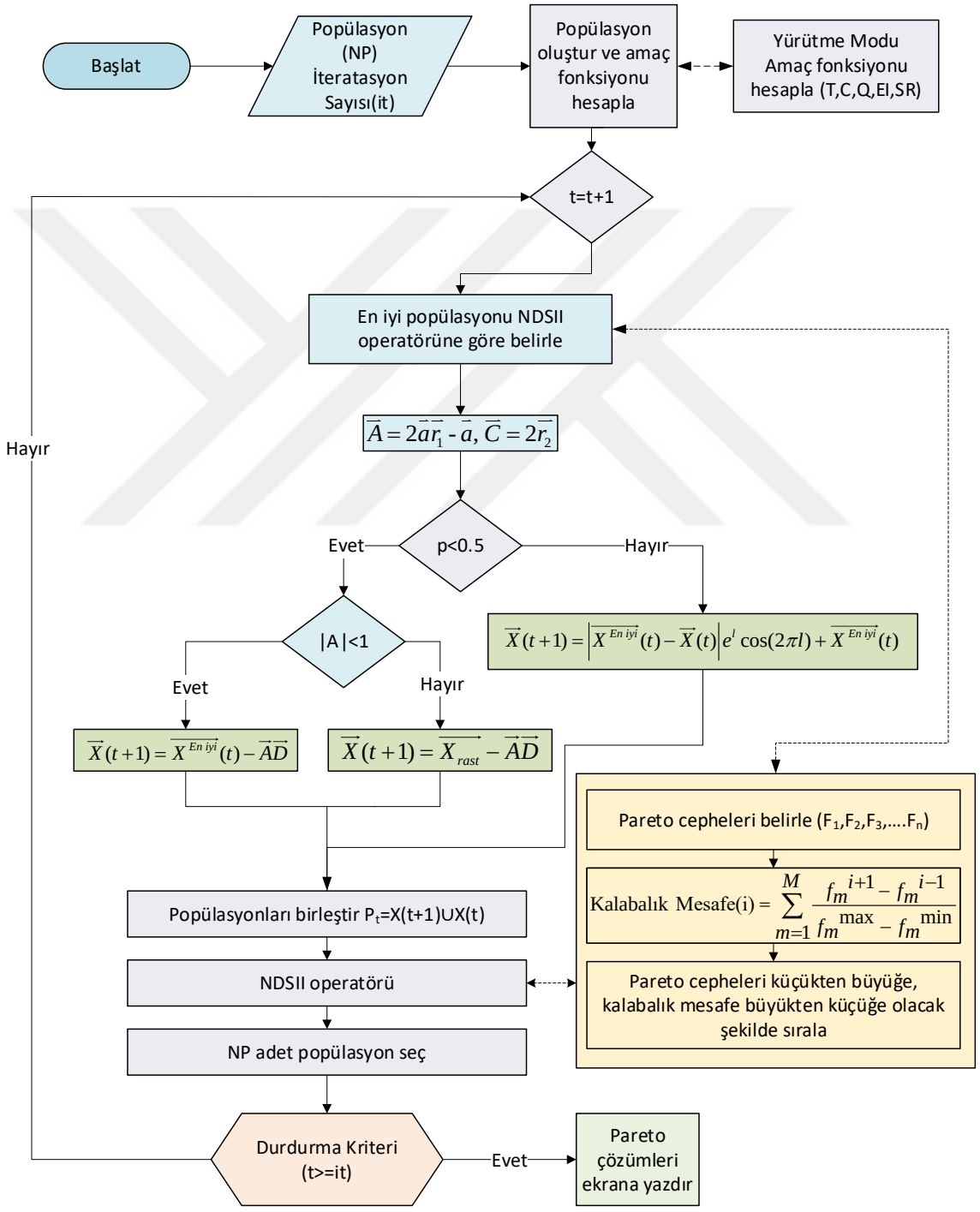
Adım 4: Yeni popülasyonun oluşturulması: GWO algoritması için denklem 4-7 kullanılarak alfa, beta ve delta kurtların konumlarına göre, WOA algoritması için ise denklem 8-14 kullanılarak yeni çözümler üretilir. Üretilen çözümler için alt ve üst sınır kontrolleri yapılır ve ayrık optimizasyon problemi olduğu için en yakın tamsayıya yuvarlanır. Sonrasında amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 5: Popülasyonların birleştirilmesi: Mevcut iterasyonda üretilen popülasyon ile bir önceki iterasyondaki popülasyon birleştirilir.

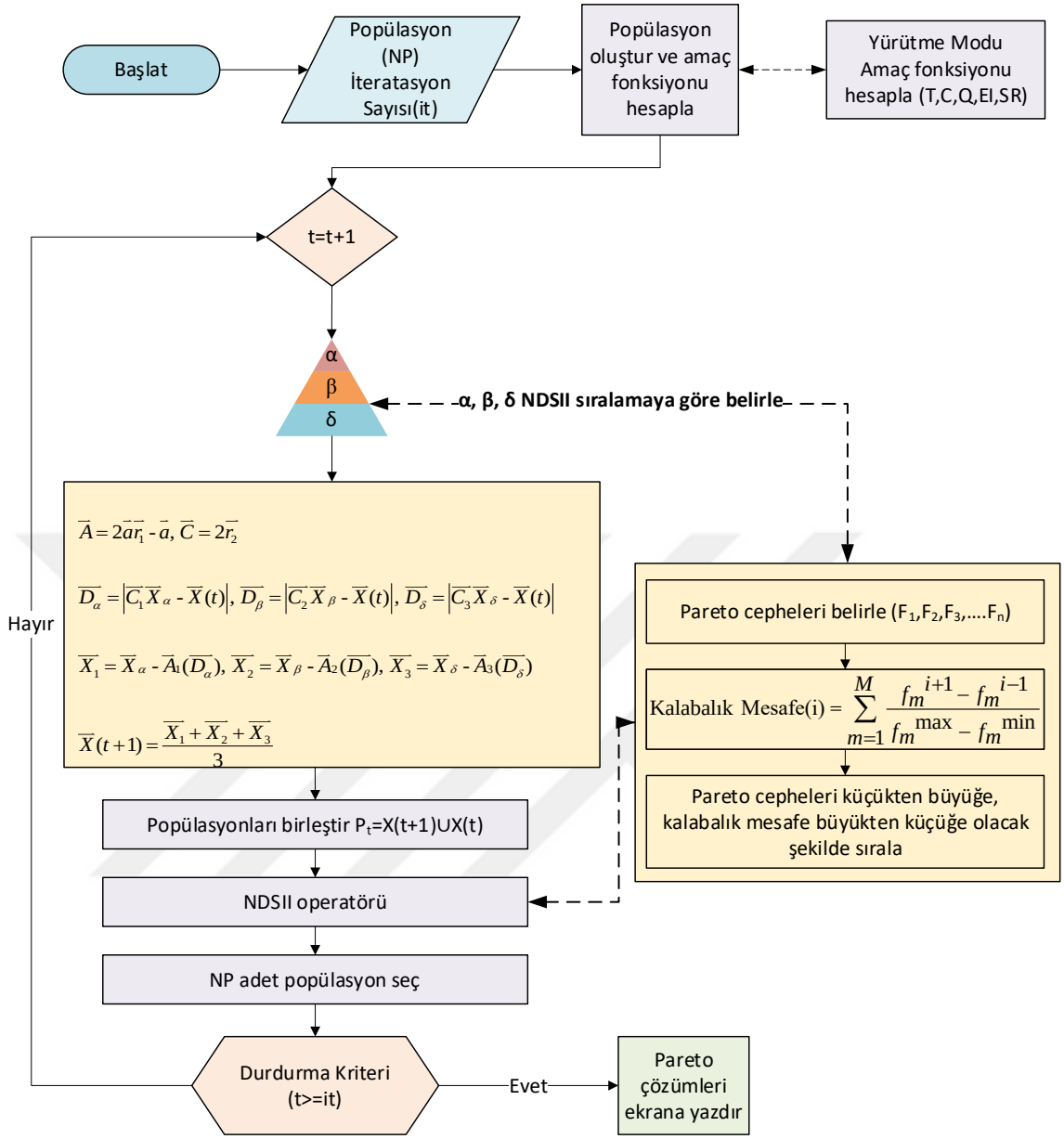
Adım 6: NDSII operatörü kullanılarak çözümler öncelikle cephe değerlerine göre küçükten büyüğe sıralanır ve her cephe içinde çözümler kalabalık mesafe değerlerine göre büyükten küçüğe sıralanır. Başlangıçta belirlenen popülasyon büyüklüğü (N) kadar en iyi çözüm seçilir.

Adım 7: Sonlandırma kontrolü: Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa optimizasyon süreci sonlandırılır ve elde edilen pareto-optimal çözümler karar vericiye sunulur. Aksi halde Adım 3'e dönülerek işlem devam eder.

NDSIIWOA ve NDSIIGWO algoritmalarının akış şeması sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir. Bir sonraki bölümde Jain ve Deb (2013) tarafından önerilen ve dört veya daha fazla amaçlı problemlerde daha başarılı sonuçlar veren NDSIII operatörünün metasezgisel algoritmalar ile entegrasyonu detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 5. NDSIIWOA algoritması akış diyagramı



Şekil 6. NDSIIGWO algoritması akış diyagramı

2.6. Referans Nokta Tabanlı Baskın Olmayan Sıralama Operatörü (NDSIII)

Referans nokta tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörü, çok fazla amaçlı optimizasyon problemlerinde NDSII operatörünün performansının düşmesi nedeniyle Deb ve Jain (2014) tarafından NSGA-III algoritması olarak geliştirilmiştir. NDSII operatöründe kullanılan kalabalık mesafe hesaplaması, dört ve daha fazla amaçlı problemlerde çözümlerin çeşitliliğini korumada yetersiz kalması sebebiyle NDSIII operatörü bu sorunu çözmek için,

amaç uzayında referans noktalar kullanarak çözümlerin daha iyi dağılmasını sağlamaktadır. NDSIII operatöründe belirli aşamalardan oluşmaktadır.

Baskın olmayan sıralama: Her iterasyonda, N boyutundaki mevcut ana popülasyon (P_{eski}) ile N boyutundaki yeni üretilen popülasyonun (P_{yeni}) birleştirililir. Bu birleştirme sonucunda 2N boyutunda R_t birleşik popülasyonu elde edilir. R_t popülasyonundaki tüm çözümler, baskınlık ilişkisine göre farklı seviyelere (F_1, F_2, ...) ayrılır. İlk seviye olan F_1'de hiçbir çözüm tarafından domine edilmeyen çözümler, F_2'de sadece F_1'deki çözümler tarafından domine edilen çözümler yer alır ve bu şekilde diğer seviyeler oluşturulur. Bir sonraki iterasyona aktarılacak N boyutunda S_t popülasyonu oluşturmak için F_1'den başlayarak sırayla seviyeler S_t'ye eklenir. Bu ekleme işlemi, S_t'nin boyutu N'ye ulaşana kadar veya St'nin boyutunun N'yi aştığı ilk seviye olan *l* seviyesine kadar devam eder, *l*+1 ve sonraki seviyelerdeki tüm çözümler elenir. *l* seviyesindeki çözümler arasından seçim yapılırken, NDSIII operatörünün referans nokta yaklaşımı kullanılır.

Referans noktaların oluşturulması: Referans noktaların sayısı (H), bölüm sayısı (p) ve amaç fonksiyonu sayısına (M) bağlı olarak aşağıdaki kombinasyon formülü ile hesaplanmaktadır:

$$H = \left(\frac{M + p - 1}{p}\right) \tag{26}$$

NDSIII operatöründe uniform dağılan referans noktaları kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda referans noktalar, her bir amaç için birbirini baskılayamayan 0 ile 1 arasında değişen noktalardan oluşmaktadır. Deb ve Jain (2014), popülasyon büyüklüğünü (N), H'den büyük en küçük dördün katı olarak belirlemişlerdir.

Normalizasyon işlemi için öncelikle her bir amaç fonksiyonunda ideal nokta (Z_{min}) belirlenmesi gerekmektedir. İdeal nokta, başlangıç popülasyonundan itibaren her bir amaç fonksiyonu için bulunan en iyi değerlerdir. Sonrasında, her bir amaç fonksiyonu değerinden ideal nokta çıkarılarak dönüştürülmüş amaç fonksiyonu değerleri elde edilir.

$$f'(x) = f(X) - Z_{min} \tag{27}$$

Her bir amaç fonksiyonu i için uç noktalar (Z^{max}_i) başarım ölçekleme fonksiyonu (ASF) kullanılarak belirlenir.

$$ASF(f', w) = max\left\{\frac{f'_i}{w}\right\}, i = 1, \ldots\ldots, M \quad (28)$$

Burada w, i. amaç fonksiyonu için 1, diğerleri için çok küçük bir değer (ε) olan ağırlık vektörüdür. Bu uç noktalar kullanılarak bir hiper düzlem oluşturulur ve bu hiper düzlemin her bir amaç ekseni ile kesişim noktaları (a_i değerleri) belirlenir. Son olarak normalize edilmiş amaç fonksiyonu değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$f_i^n(x) = \frac{f'_i(x)}{a_i} \quad (29)$$

Çözümlerin referans noktalarla ilişkilendirilmesi: Normalize edilmiş amaç uzayında, her bir referans noktayı orijin ile birleştiren bir referans doğru oluşturulur. Ardından, her bir popülasyon üyesinin her bir referans çizgisine göre dikey mesafesini hesaplanır. Normalleştirilmiş amaç uzayında, popülasyon üyeleri en yakın referans çizgisi ile ilişkilendirilir. Her bir bireye ait olan en yakın mesafe (d) ve ilişkilendirildiği referans noktası (π) bulunur. Bu ilişkilendirme işlemi şu adımlarla gerçekleştirilir:

1. Her bir referans noktası z ∈ Zr için:
   - Referans doğru w = z olacak şekilde belirlenir
2. S_t'deki her bir s çözümü için:
   - Her bir referans doğru w ∈ Zr için:
     - ✓ Dikey mesafe $d\perp(s, w) = ||(s - w^T sw/||w^2||)||$ hesaplanır.
   - Çözüm s, minimum dikey mesafeye sahip referans noktaya atanır:
     - ✓ $\pi(s) = w : \textit{argmin}\ w \in Zr\ d\perp(s, w)$
   - Çözümün referans noktaya olan mesafesi kaydedilir: $d(s) = d\perp(s, \pi(s))$

Bu işlem sonucunda belirlenen ilişkilendirme bilgileri (π ve d değerleri), bir sonraki aşama olan niş koruma operasyonunda kullanılacaktır. Niş korumanın amacı, son kabul edilen F_l cephesinden hangi çözümlerin seçileceğini belirlemektir. Bu seçim, referans noktaların niş sayılarına göre yapılır. Her bir referans noktanın niş sayısı (ρj), o referans noktaya F_1'den F_{l-1}'e kadar olan cephelerde atanan çözüm sayısını gösterir. Eğer tüm çözümler F_1'den oluşuyorsa bu sefer tamamı sıfır kabul edilerek başlar. Niş koruma prosedürü şu şekilde uygulanır:

1. İlk olarak minimum niş sayısına sahip referans noktalar belirlenir:
   - $J_{min} = \{j : \arg\min_j \rho_j\}$
   - Eğer birden fazla referans nokta minimum niş sayısına sahipse, bunlar arasından rastgele biri ($\bar{j}$) seçilir.
2. Seçilen $\bar{j}$ referans noktası için iki durum incelenir:
   - Eğer $\rho_{\bar{j}} = 0$ ise (yani referans noktaya henüz hiç çözüm atanmamışsa):
     - ✓ Fl cephesinde bu referans noktaya atanmış çözümler arasından en küçük dikey mesafeye sahip olan çözüm Pt+1'e eklenir.
     - ✓ Eğer Fl'de bu referans noktaya atanmış çözüm yoksa, referans nokta sonraki değerlendirmelerden çıkarılır.
   - Eğer $\rho_{\bar{j}} \geq 1$ ise (yani referans noktaya en az bir çözüm atanmışsa):
     - ✓ F_l cephesinde bu referans noktaya atanmış çözümler arasından rastgele bir çözüm Pt+1'e eklenir.
3. Seçilen çözüm için:
   - İlgili referans noktanın niş sayısı bir artırılır: $\rho_{\bar{j}} = \rho_{\bar{j}} + 1$
   - Seçilen çözüm Fl'den çıkarılır.
   - Seçim sayısı bir artırılır.

Bu işlem, gerekli K adet çözüm seçilene kadar tekrarlanır. Bu yaklaşımla:

- ✓ Henüz hiç çözüm atanmamış referans noktalara öncelik verilir.
- ✓ Her referans noktanın mümkün olduğunca benzer sayıda çözüme sahip olması sağlanır.
- ✓ Çözümlerin amaç uzayında daha homojen dağılması hedeflenmektedir.

2.6.1. NDSIII Operatörünün Rao-1 ve Rao-2 Algoritmaları ile Entegrasyonu

Rao serileri, optimizasyon sürecini en iyi ve en kötü çözümlere göre yönlendiren algoritmalar olup, NDSIII operatörü ile entegrasyonunda özel bir yaklaşım gerektirmektedir. Deb ve Jain (2014) genetik algoritmalarda aile seçimini pareto cephelerinden bağımsız olarak rastgele yaparken, bu çalışma kapsamında pareto cepheleri rastgeleliğinden ziyade Rao serilerinde en iyi çözüm ilk pareto cephesinden (F_1), en kötü çözüm ise son pareto cephesinden seçilmektedir. Bu farklı yaklaşım, Rao serilerinin yönlendirme mekanizmasının etkinliğini korurken NDSIII operatörünün çok amaçlı optimizasyon kabiliyetlerinden faydalanmayı sağlamaktadır. Bu algoritmaların NDSIII operatörü ile entegrasyonu

sonucunda geliştirilen NDSIIIRao-1 ve NDSIIIRao-2 algoritmalarının işlem adımları aşağıda detaylandırılmıştır:

Adım 1: Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi: Popülasyon büyüklüğü (N) ve maksimum iterasyon sayısı (it) belirlenir. Referans noktaları oluşturulur (Z^r).

Adım 2: Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Proje planlama problemindeki aktivitelerin alternatif sayılarına bağlı olarak alt ve üst sınır koşulları dikkate alınarak tamsayı formunda rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her bir çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 3: En iyi ve en kötü çözümlerin belirlenmesi: En iyi çözüm ilk pareto cephesi içinden rastgele seçilir. En kötü çözüm ise en son pareto cephesinden rastgele seçilir.

Adım 4: Yeni popülasyonun oluşturulması: Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarının temel denklemleri (Denklem 1 veya 2) kullanılarak yeni çözümler üretilir. Üretilen çözümler için alt ve üst sınır kontrolleri yapılır ve ayrık optimizasyon problemi olduğu için en yakın tamsayıya yuvarlanır. Sonrasında amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 5: Popülasyonların Birleştirilmesi: Mevcut iterasyonda üretilen popülasyon ile bir önceki iterasyondaki popülasyon birleştirilir.

Adım 6: Pareto Cephelerinin Belirlenmesi

- Birleştirilen popülasyona ait ideal nokta belirlenir.
- Pareto cepheleri (F_1, F_2,...) oluşturulur.
- Her bir cephe başlangıçta belirtilen popülasyon sayısı aşılana kadar cepheler S_t popülasyonuna eklenir.
- Son eklenen cepheye NDSIII seçme işlemi uygulanır. Eğer son cephenin tamamı F_1'den oluşuyorsa bu cepheye NDSIII işlemi uygulanır.

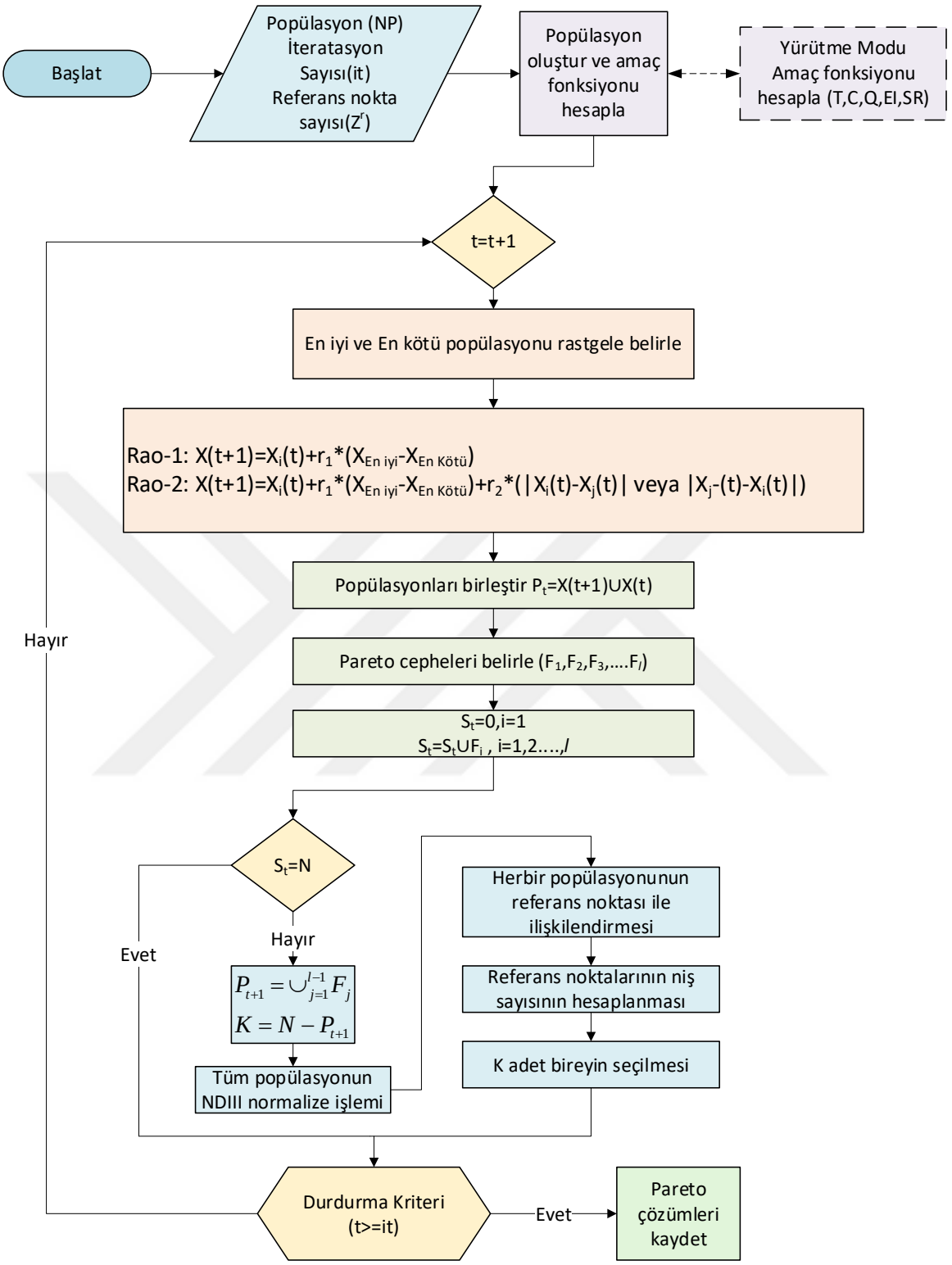
Adım 7: S_t popülasyonu normalize edilir.

Adım 8: Referans noktaları ile ilişkilendirmesi yapılır.

Adım 9: Niş koruması yapılarak S_t için N adet popülasyon seçilerek sonraki iterasyona aktarılır.

Adım 10: Sonlandırma kontrolü: Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa optimizasyon süreci sonlandırılır ve elde edilen Pareto-optimal çözümler karar vericiye sunulur. Aksi halde Adım 3'e dönülerek optimizasyon sürecine devam edilir.

NDSIIRao1 ve NDSIIRao2'ye ait akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. NDSIIIRao-1 ve NDSIIIRao-2 algoritmalarının akış diyagramı

2.6.2. NDSIII Operatörünün GWO ve WOA Algoritmaları ile Entegrasyonu

GWO algoritmasında alfa, beta ve delta kurtların, WOA algoritmasında ise en iyi balinanın rehberliğinde optimizasyon süreci yönlendirilmektedir. Ancak NDSIII operatörü ile entegrasyonda, genetik algoritmalarda olduğu gibi rastgele seçim yapılması yerine, GWO algoritması için alfa, beta ve delta kurtlar ilk pareto cephesinden (F_1) rastgele seçilmiştir. Benzer şekilde, WOA algoritması için en iyi balina da ilk pareto cephesinden rastgele seçilmiştir. Bu yaklaşım, algoritmaların arama kabiliyetlerini korumasını sağlarken NDSIII operatörünün çok amaçlı optimizasyon yeteneklerinden faydalanmayı mümkün kılmaktadır. Bu algoritmaların NDSIII operatörü ile entegrasyonu sonucunda geliştirilen NDSIIIGWO ve NDSIIIWOA algoritmalarının işlem adımları aşağıda detaylandırılmıştır. Ayrıca Şekil 8 ve 9'da akış diyagramları verilmektedir.

Adım 1: Başlangıç Parametrelerinin Belirlenmesi

- Popülasyon büyüklüğü (N) ve maksimum iterasyon sayısı (it) belirlenir.
- Amaç sayısı (M) ve bölüm sayısına (p) göre referans noktaları oluşturulur.

Adım 2: Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

- Proje planlama problemindeki aktivitelerin alternatif sayılarına bağlı olarak alt ve üst sınır koşulları dikkate alınarak tamsayı formunda rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her bir çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 3: Lider Çözümlerin Belirlenmesi GWO algoritması için:

- İlk pareto cephesinden (F1) rastgele üç çözüm seçilerek alfa, beta ve delta kurtlar belirlenir.

  WOA algoritması için:

- İlk pareto cephesinden (F1) rastgele bir çözüm seçilerek en iyi balina belirlenir.

Adım 4: Yeni Popülasyonun Oluşturulması GWO algoritması için:

- Denklem 4-7 kullanılarak alfa, beta ve delta kurtların rehberliğinde yeni çözümler üretilir.
- WOA algoritması için:
- Denklem 8-14 kullanılarak en iyi balinanın rehberliğinde yeni çözümler üretilir Her iki algoritma için:
- Üretilen çözümler için alt ve üst sınır kontrolleri yapılır.

- Ayrık optimizasyon problemi olduğu için çözümler en yakın tamsayıya yuvarlanır. Her yeni çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 5: Popülasyonların Birleştirilmesi

- Mevcut iterasyonda üretilen popülasyon ile bir önceki iterasyondaki popülasyon birleştirilir.
- 2N boyutunda birleşik popülasyon elde edilir.

Adım 6: Pareto Cephelerinin Belirlenmesi

- Birleşik popülasyona ait ideal nokta (Zmin) belirlenir.
- Baskınlık ilişkisine göre pareto cepheleri (F1, F2,...) oluşturulur.
- F1'den başlayarak cepheler St popülasyonuna eklenir.
- Popülasyon sayısı N'yi aşan ilk cephede (l) durulur. l+1 ve sonraki cephelerdeki çözümler elenir.

Adım 7: Normalizasyon İşlemi

- Her bir amaç fonksiyonu için ideal nokta çıkarılarak dönüştürülmüş değerler elde edilir. ASF fonksiyonu kullanılarak uç noktalar belirlenir.
- Hiper düzlem oluşturulur ve kesişim noktaları (ai) hesaplanır.
- Normalize edilmiş amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 8: Referans Noktalarıyla İlişkilendirme

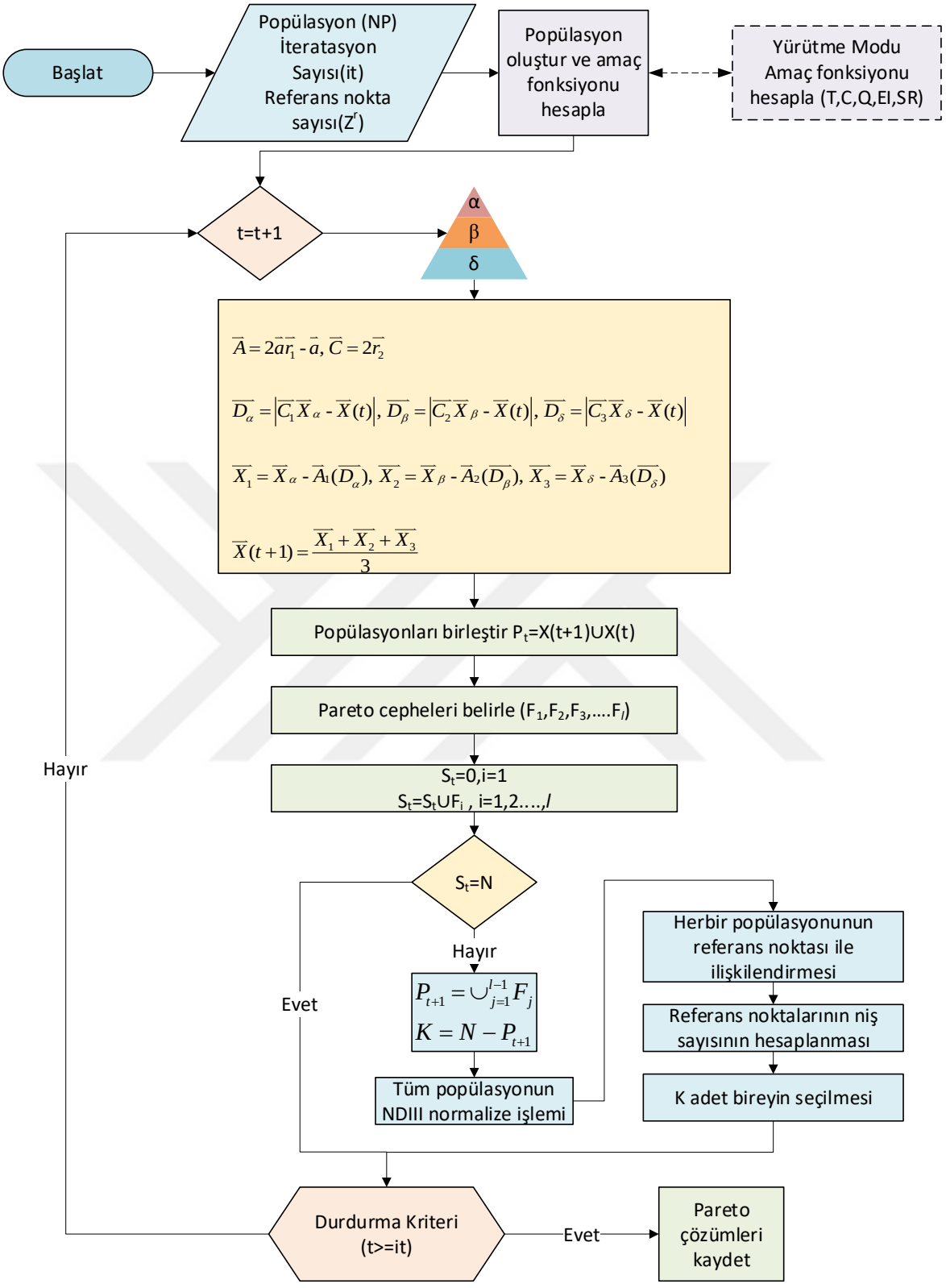
- Her referans nokta için referans doğrular oluşturulur.
- Her çözümün referans doğrulara olan dikey mesafeleri hesaplanır.
- Her çözüm en yakın referans noktayla ilişkilendirilir.

Adım 9: Niş Koruma ve Seçim

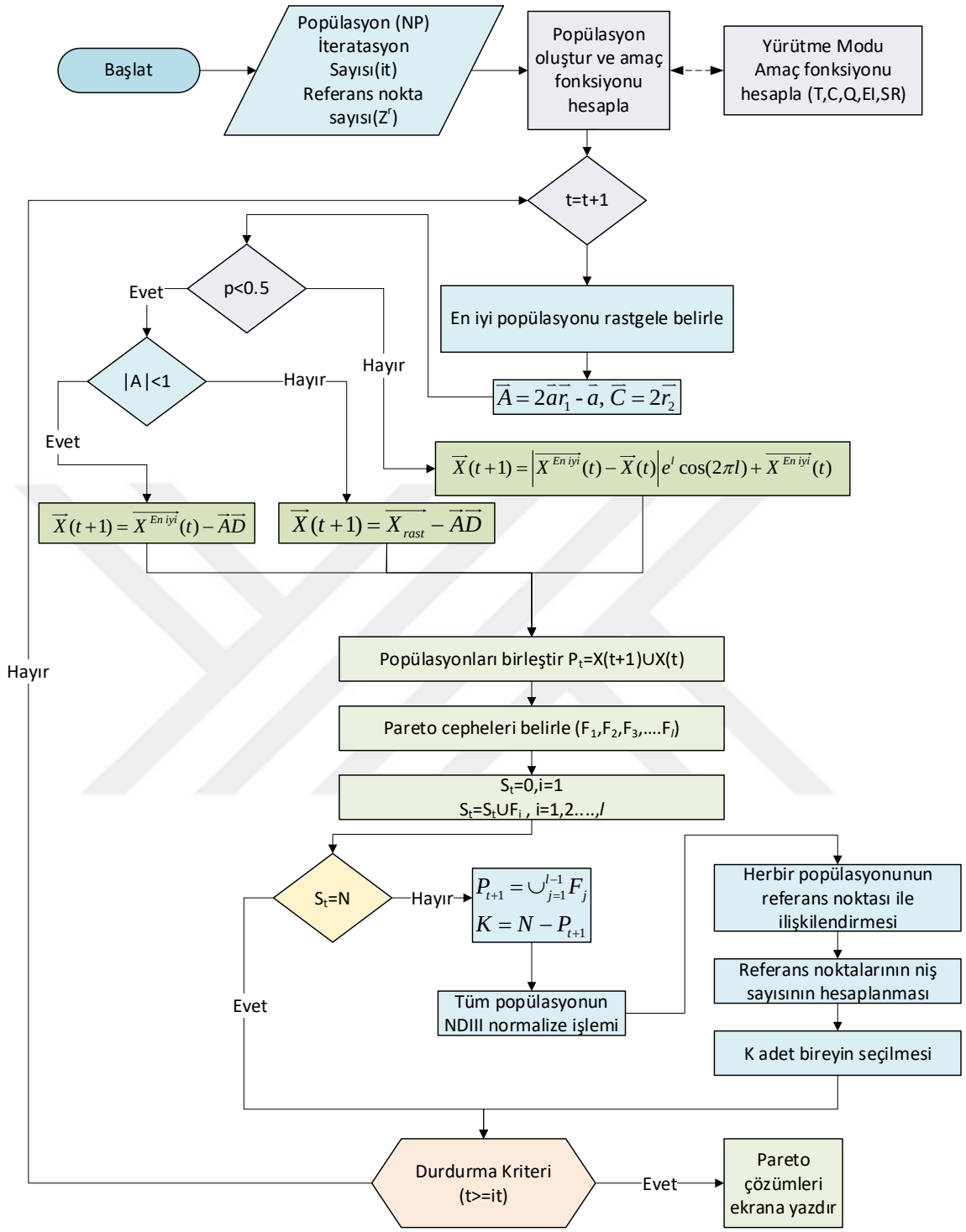
- Her referans noktanın niş sayısı belirlenir.
- Minimum niş sayılı referans noktalardan başlayarak seçim yapılır.
- Niş sayısı sıfır olan referans noktalara öncelik verilir.
- N adet popülasyon seçilene kadar işlem devam eder.

Adım 10: Sonlandırma Kontrolü

- Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa:
  - ✓ Optimizasyon süreci sonlandırılır
  - ✓ Elde edilen Pareto-optimal çözümler karar vericiye sunulur
- Ulaşılmadıysa:
  - ✓ Adım 3'e dönülerek işlem devam eder.



Şekil 8. NDSIIIGWO algoritması akış diyagramı



Şekil 9. NDSIIIWOA algoritması akış diyagramı

2.7. Güçlendirilmiş Pareto Yöntemi

Güçlendirilmiş pareto (SP) operatörü, ilk olarak Zitzler vd. (2001) tarafından SPEA2 algoritmasında önerilen bir seçme ve eleme operatörüdür. Bu operatör, her çözümün

uygunluk değerini belirlerken hem o çözümü baskılayan çözümlerin güçlerini hem de çözümün yakın komşuluğundaki yoğunluk bilgisini dikkate almaktadır. SP operatörü sadece baskınlık sayısını değil, baskılayan çözümlerin ne kadar güçlü olduklarını da değerlendirmektedir. Böylece çözümlerin kalitesi daha detaylı bir şekilde ölçülebilmektedir. SP operatörünün temel çalışma prensibi belirli bileşenden oluşmaktadır:

Güç değeri hesaplama (S), bir çözümün diğer çözümler üzerindeki baskınlığını ölçen önemli bir değerdir. Bu formülasyonda, i çözümünün güç değeri, o çözüm tarafından baskılanan tüm çözümlerin sayısını ifade eder. Burada P mevcut popülasyonu, ∈ ait olma işlemini, ∧ ve mantıksal operatörünü, ≻ baskınlık ilişkisini göstermektedir. Aşağıda matematiksel olarak gösterilmektedir.

$$S(i) = \left|\{j \mid j \in P_{yeni} + P \wedge i \succ j\}\right| \tag{30}$$

Ham uygunluk değeri hesaplaması (R), i çözümünü baskılayan tüm çözümlerin güç değerlerinin toplamını ifade eder. Böylece, güçlü çözümler tarafından baskılanan bir çözümün ham uygunluk değeri, zayıf çözümler tarafından baskılanan bir çözüme göre daha yüksek olacaktır. Ham uygunluk değeri ne kadar düşükse, çözümün o kadar iyi olduğu kabul edilir. Eğer bir çözümü baskılayan hiçbir çözüm yoksa (yani pareto optimal ise), o çözümün ham uygunluk değeri sıfır olur.

$$R(i) = \sum_{j \in P_{yeni} + P, j \succ i} S(j) \tag{31}$$

Yoğunluk Hesaplama: Her çözüm için k-en yakın komşu yöntemi kullanılarak yoğunluk değeri (D) hesaplanır. Yoğunluk değeri (D), çözümlerin amaç uzayındaki dağılımını ve çeşitliliğini korumak için kullanılan bir metriktir. Bu formülde σ_i^k, i çözümünün k. ($k=\sqrt{N+N}$) en yakın komşusuna olan Öklid mesafesini göstermektedir. Paydaya eklenen 2 değeri, mesafenin sıfır olması durumunda tanımsızlığı önlemek ve 0 ile 1 arasında normalize edilmiş bir değer elde etmek için kullanılır. Bir çözümün yakın komşuluğunda ne kadar çok çözüm varsa (yani σ_i^k değeri ne kadar küçükse), o çözümün yoğunluk değeri o kadar yüksek olacaktır. Yüksek yoğunluk değeri, çözümün kalabalık bir bölgede olduğunu gösterir ve bu çözümün elenmesi çeşitliliğin korunması açısından daha uygun olmaktadır.

$$R(i) = \frac{1}{\sigma_i^{(k)} + 2} \tag{32}$$

Final uygunluk değeri (F), ham uygunluk değeri (R) ile yoğunluk değerinin (D) toplamından oluşur. Bu değer, bir çözümün hem kalitesini hem de çeşitliliğini tek bir sayı ile ifade eder. Final uygunluk değeri düşük olan çözümler daha iyi kabul edilir.

$$F(i) = R(i) + D(i) \tag{33}$$

SP operatöründe kesme mekanizması, bir sonraki iterasyona aktarılacak çözümlerin seçiminde kullanılan önemli bir bileşendir. Bu mekanizma iki farklı durumda devreye girer:

1. F değeri 1'den büyük çözümler için:
   - Çözümler F değerlerine göre küçükten büyüğe sıralanır.
   - İlk N adet çözüm bir sonraki nesle aktarılır.
   - Bu durum, domine edilmiş çözümlerin olduğu popülasyonlar için geçerlidir.
2. Domine edilmemiş çözüm sayısı (F(i)<1) N'den büyük olduğunda:
   - Her çözüm için en yakın komşuya olan Öklid mesafesi hesaplanır.
   - En küçük mesafeye sahip çözüm (en kalabalık bölgedeki) elenir.
   - Kalan çözümler için mesafeler tekrar hesaplanır.
   - Bu işlem popülasyon boyutu N'ye ulaşana kadar devam eder.

Bu iteratif eleme süreci, popülasyondaki çözümlerin amaç uzayında mümkün olduğunca homojen dağılmasını sağlamayı amaçlar. Küçük mesafeye sahip çözümlerin elenmesi, kalabalık bölgelerdeki yığılmayı önlerken, çözüm çeşitliliğinin korunmasına yardımcı olur.

2.7.1. SP Operatörünün Rao-1 ve Rao-2 Algoritmaları ile Entegrasyonu

Rao serileri bölümünde detaylı olarak açıklandığı gibi, Rao-1 ve Rao-2 algoritmaları optimizasyon sürecini en iyi ve en kötü çözümlere göre yönlendirmektedir. SP operatörü ile entegrasyonda, en iyi çözüm en düşük final uygunluk değerine sahip çözüm, en kötü çözüm ise en yüksek final uygunluk değerine sahip çözüm olarak belirlenmiştir. Bu algoritmaların SP operatörü ile entegrasyonu sonucunda geliştirilen SPRao-1 ve SPRao-2 algoritmalarının işlem adımları aşağıda detaylandırılmıştır:

Adım 1: Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi: Popülasyon büyüklüğü (N) ve maksimum iterasyon sayısı (it) belirlenir.

Adım 2: Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Proje planlama problemindeki aktivitelerin alternatif sayılarına bağlı olarak alt ve üst sınır koşulları dikkate alınarak tamsayı formunda rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her bir çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 3: En iyi ve en kötü çözümlerin belirlenmesi: Her çözüm için sırasıyla güç değeri (S), ham uygunluk değeri (R), yoğunluk değeri (D) ve final uygunluk değerleri (F) hesaplanır. En düşük F değerine sahip çözüm en iyi çözüm, en yüksek F değerine sahip çözüm en kötü çözüm olarak belirlenir.

Adım 4: Yeni popülasyonun oluşturulması: Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarının temel denklemleri (Denklem 1 veya 2) kullanılarak yeni çözümler üretilir. Üretilen çözümler için alt ve üst sınır kontrolleri yapılır ve ayrık optimizasyon problemi olduğu için en yakın tamsayıya yuvarlanır. Sonrasında amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

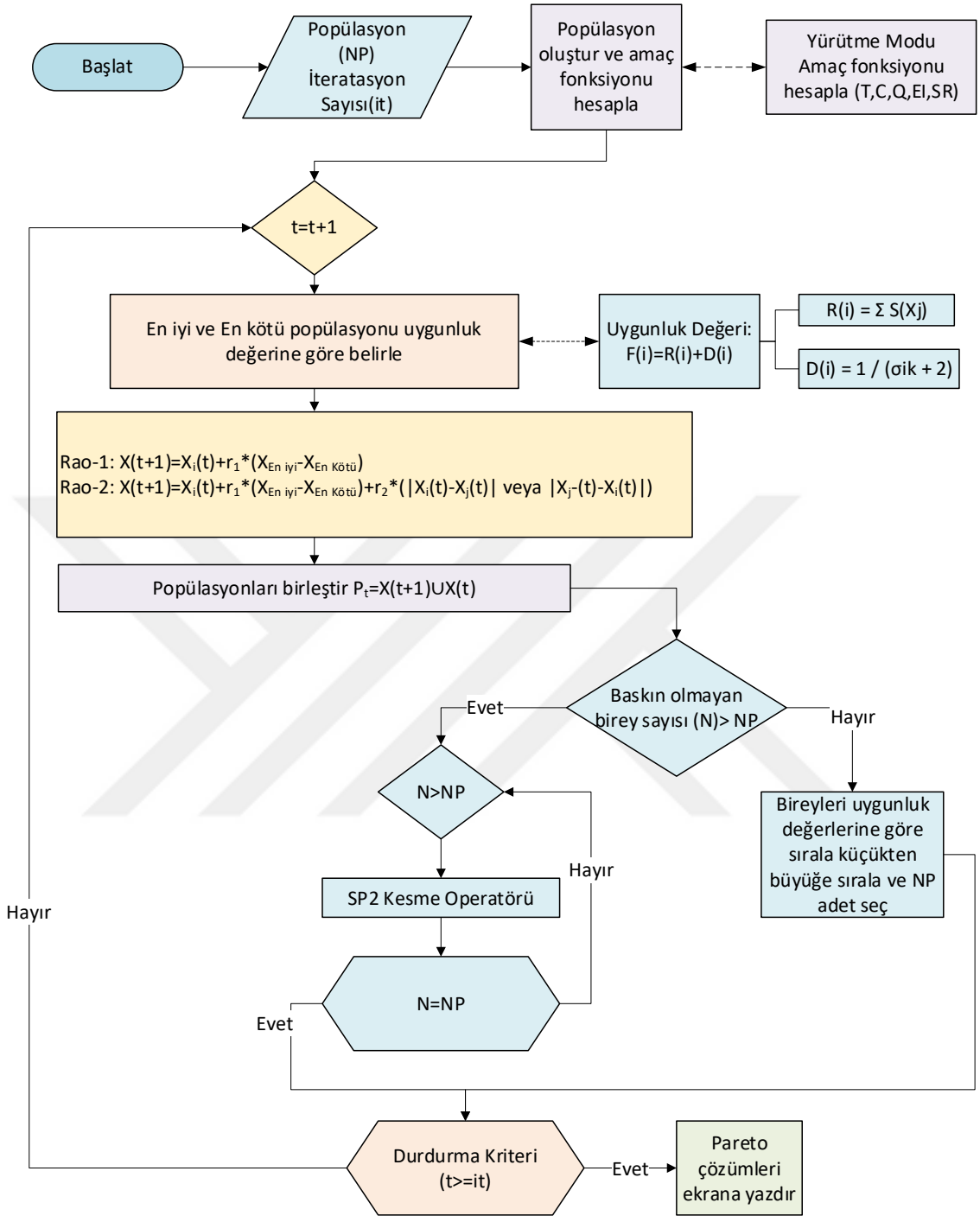
Adım 5: Mevcut iterasyonda üretilen popülasyon ile bir önceki iterasyondaki popülasyon birleştirilerek havuz oluşturulur.

Adım 6: SP tabanlı seçim ve arşivleme:

- Toplam havuzdaki her çözüm için güç, ham uygunluk ve yoğunluk değerleri hesaplanır.
- Final uygunluk değerlerine göre çözümler sıralanır.
- En düşük uygunluk değerine sahip çözümler arşive eklenir.
- Arşiv boyutu aşılırsa kesme operatörü uygulanır.

Adım 7: Sonlandırma kontrolü: Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa optimizasyon süreci sonlandırılır ve elde edilen Pareto-optimal çözümler karar vericiye sunulur. Aksi halde Adım 3'e dönülerek optimizasyon sürecine devam edilir.

SPRao1 ve SPRao2'ye ait akış diyagramı Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. SPRao-1 ve SPRao-2 algoritmalarının akış diyagramı

2.7.2. SP Operatörünün GWO ve WOA Algoritmaları ile Entegrasyonu

GWO algoritmasında alfa, beta ve delta kurtların, WOA algoritmasında ise en iyi balinanın rehberliğinde optimizasyon süreci yönlendirilmektedir. SP operatörü ile entegrasyonda, final uygunluk değerleri kullanılarak GWO algoritması için en düşük üç F

değerine sahip çözümler sırasıyla alfa, beta ve delta kurtlar olarak, WOA algoritması için en düşük F değerine sahip çözüm en iyi balina olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, SP operatörünün çözüm kalitesi ve çeşitliliği koruma özellikleri ile GWO ve WOA algoritmalarının arama kabiliyetleri birleştirilmiştir. Bu algoritmaların SP operatörü ile entegrasyonu sonucunda geliştirilen SPGWO ve SPWOA algoritmalarının işlem adımları aşağıda detaylandırılmıştır:

Adım 1: Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi: Popülasyon büyüklüğü (N) ve maksimum iterasyon sayısı (it) belirlenir.

Adım 2: Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Proje planlama problemindeki aktivitelerin alternatif sayılarına bağlı olarak alt ve üst sınır koşulları dikkate alınarak tamsayı formunda rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her bir çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 3: En iyi ve en kötü çözümlerin belirlenmesi: Her çözüm için sırasıyla güç değeri (S), ham uygunluk değeri (R), yoğunluk değeri (D) ve final uygunluk değerleri (F) hesaplanır. GWO algoritması için en düşük üç F değerine sahip çözümler sırasıyla alfa, beta ve delta kurtlar olarak belirlenir. WOA algoritması için en düşük F değerine sahip çözüm en iyi balina olarak belirlenir

Adım 4: Yeni popülasyonun oluşturulması: GWO algoritması için denklem 4-7 kullanılarak alfa, beta ve delta kurtların konumlarına göre, WOA algoritması için ise denklem 8-14 kullanılarak en iyi balinanın konumuna göre yeni çözümler üretilir. Üretilen çözümler için alt ve üst sınır kontrolleri yapılır ve ayrık optimizasyon problemi olduğu için en yakın tamsayıya yuvarlanır. Sonrasında amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

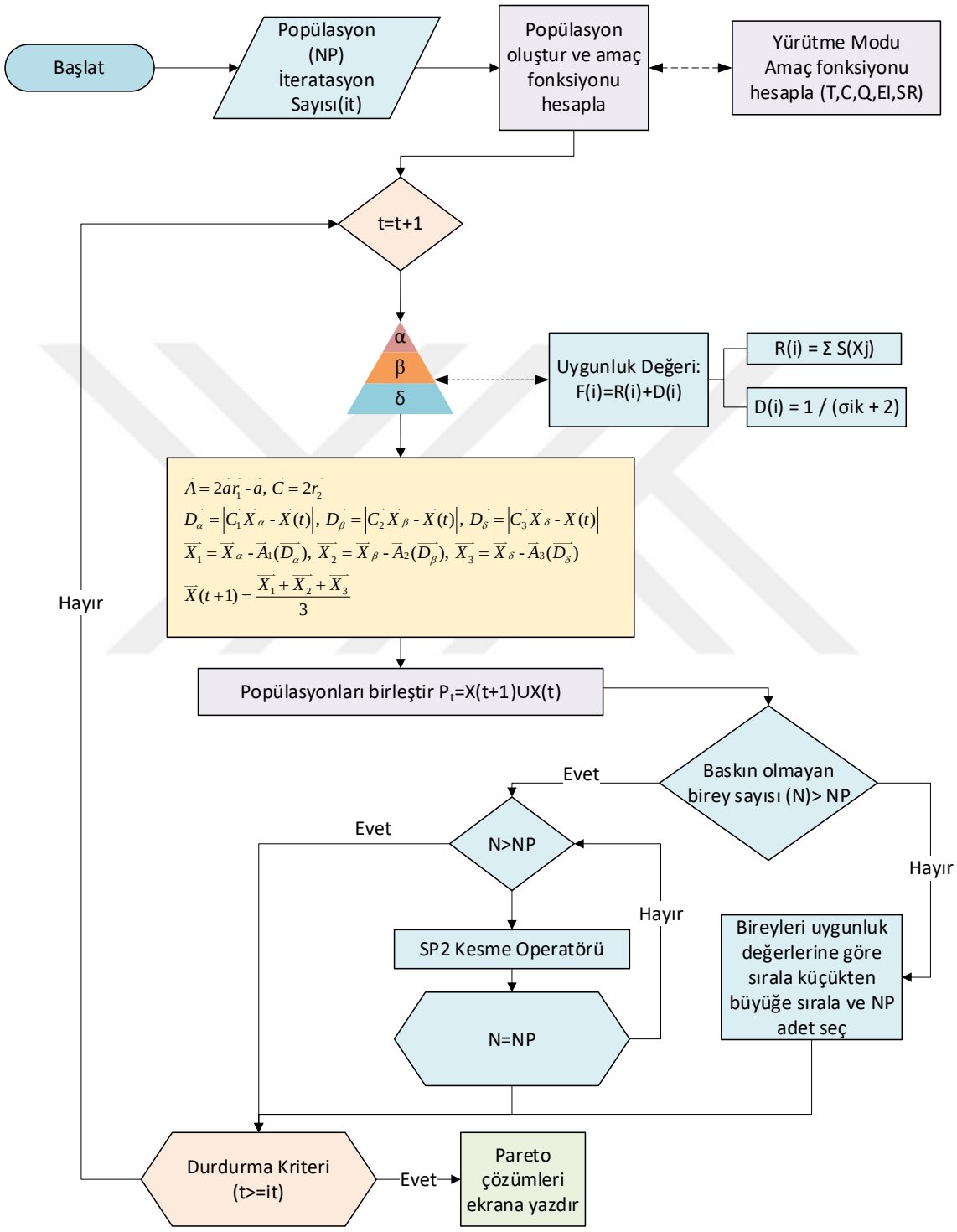
Adım 5: Mevcut iterasyonda üretilen popülasyon ile bir önceki iterasyondaki popülasyon birleştirilerek havuz oluşturulur.

Adım 6: SP tabanlı seçim ve arşivleme

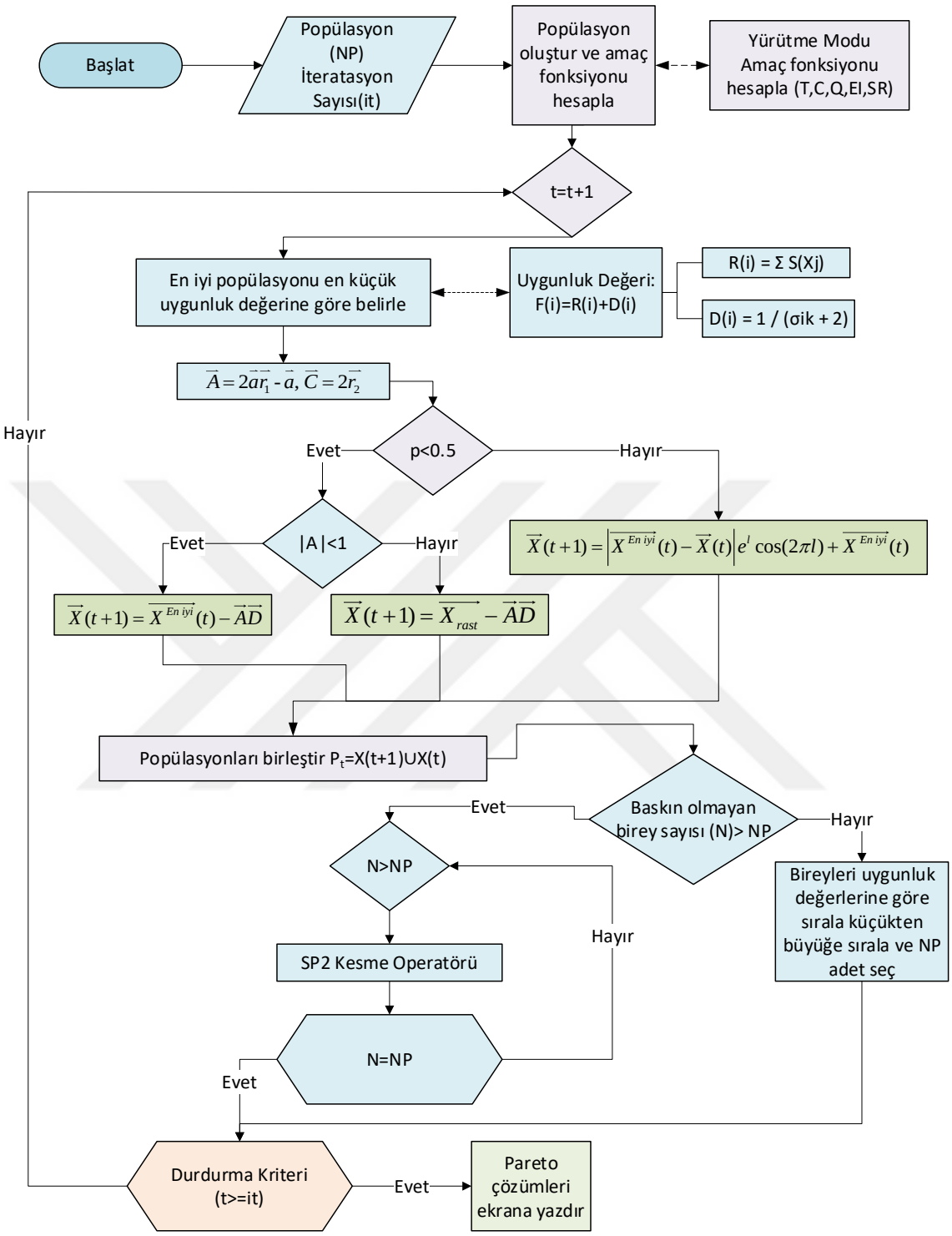
- Toplam havuzdaki her çözüm için güç, ham uygunluk ve yoğunluk değerleri hesaplanır.
- Final uygunluk değerlerine göre çözümler sıralanır.
- En düşük uygunluk değerine sahip çözümler arşive eklenir.
- Arşiv boyutu aşılırsa kesme operatörü uygulanır.

Adım 7: Sonlandırma kontrolü: Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa optimizasyon süreci sonlandırılır ve elde edilen Pareto-optimal çözümler karar vericiye sunulur. Aksi halde Adım 3'e dönülerek optimizasyon sürecine devam edilir.

SPGWO ve SPWOA algoritmalarına ait akış diyagramları sırasıyla Şekil 11 ve 12'de gösterilmektedir.



Şekil 11. SPGWO algoritmasının akış diyagramı



Şekil 12. SPWOA algoritmasının akış diyagramı

2.8. Operatöleri Değiştirilmiş Güçlendirilmiş Pareto Operatörü (MSP)

SP operatörünün dört ve daha fazla amaçlı optimizasyon problemlerinde yetersiz kalması sebebiyle MSP operatörü bu çalışma kapsamında geliştirilmiştir. SP operatöründe kullanılan Öklid mesafesi, amaç fonksiyonları arasındaki ilişkileri ve değişkenlerin dağılımını dikkate almadığı için çok boyutlu uzayda yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, Mahalanobis uzaklığının çok amaçlı optimizasyon problemlerinde sağladığı avantajları ortaya koymuştur. Shir vd. (2007), Mahalanobis mesafesini niş mekanizmasına entegre ederek yüksek boyutlu ve anizotropik problemlerde önemli performans artışları elde etmişlerdir. Wang vd. (2018), su kalitesi modellerinin kalibrasyonunda Mahalanobis uzaklığını entegre eden çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu kullanarak daha iyi çözümler sunmuşlardır. Ge vd. (2024) Mahalanobis uzaklığı ve küme içi birey korelasyon düzeltmesine dayalı dinamik çok amaçlı bir evrimsel algoritma geliştirerek performans iyileştirmeleri sağlamışlardır. Benzer şekilde, Hu vd. (2024), dinamik çok amaçlı optimizasyonda Mahalanobis mesafesi kullanarak stokastik değişimlere karşı daha güçlü bir algoritma geliştirmiştir. Bu çalışmalar, Mahalanobis uzaklığının çok amaçlı optimizasyon problemlerinde etkinliğini göstermektedir. Bu kapsamda, SP operatörünün dört ve daha fazla amaçlı problemlerde karşılaştığı iki önemli sınırlılık ele alınmıştır.

SP operatöründe kullanılan Öklid mesafesi, çok boyutlu uzayda amaç fonksiyonları arasındaki korelasyonları ve ölçek farklılıklarını dikkate almamaktadır. Bu durum özellikle amaç fonksiyonlarının farklı ölçeklerde olduğu ve aralarında güçlü korelasyonların bulunduğu durumlarda, mesafe hesaplamalarının yanıltıcı sonuçlar vermesine neden olmaktadır. Diğer önemli husus ise SP operatöründe kullanılan iteratif eleme yaklaşımı, dört ve daha fazla boyutlu uzayda çözümlerin çeşitliliğini sağlamakta zorlanmaktadır. Özellikle yüksek boyutlu problemlerde, en yakın komşuya olan Öklid mesafesine dayalı iteratif eleme süreci, çözümlerin bazı bölgelerde kümelenmesine ve diğer bölgelerin yeterince keşfedilememesine neden olmaktadır. Bu sınırlılıkları gidermek için MSP operatöründe iki temel iyileştirme önerilmiştir.

Mahalanobis mesafe metriğinin kullanılması: Öklid mesafesi yerine Mahalanobis mesafesinin kullanılması, amaç fonksiyonları arasındaki korelasyonların ve ölçek farklılıklarının dikkate alınmasını sağlamaktadır. Bu metrik, çok boyutlu uzayda daha anlamlı mesafe ölçümleri yapılmasına olanak tanımakta ve özellikle birbiriyle ilişkili amaç

fonksiyonlarının bulunduğu durumlarda daha doğru sonuçlar vermektedir. Mahalanobis mesafesi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$d(x,y) = \sqrt{(x-y)^T S^{-1}(x-y)} \tag{34}$$

Burada, x ve y karşılaştırılan iki çözümün amaç fonksiyon değerleri, S, amaç fonksiyonu değerlerinin kovaryans matrisini ifade etmektedir.

k-ortalamalar kümeleme yönteminin kullanılması: Çözümlerin amaç uzayında daha dengeli dağılmasını sağlamak için, iteratif eleme süreci yerine k-ortalamalar kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşım, çözüm uzayını belirli sayıda kümeye ayırarak her kümeden temsili çözümlerin seçilmesini sağlamaktadır. Küme sayısı popülasyon büyüklüğüne (N) eşit alınarak, her kümenin bir temsilci çözüm içermesi sağlanmaktadır.

MSP operatörünün çalışma prensibi şu adımlarla gerçekleştirilmektedir.

1. Güç değeri (S) hesaplaması (Denklem 30):
   - Her çözümün diğer çözümler üzerindeki baskınlığı belirlenir.
   - Baskınlık sayısı güç değeri olarak kaydedilir.
2. Ham uygunluk değeri (R) hesaplaması (Denklem 31):
   - Her çözüm için, onu baskılayan çözümlerin güç değerleri toplanır. Toplam değer ham uygunluk değeri olarak kaydedilir.
3. Yoğunluk hesaplaması (Denklem 32):
   - Her çözüm için k en yakın komşuya olan Mahalanobis uzaklıkları belirlenir
   - Yoğunluk değeri (D) hesaplanır.
4. Final uygunluk değeri (Denklem 33):
   - Ham uygunluk ve yoğunluk değerlerinin toplamı olarak hesaplanır.
5. k-Ortalamalar tabanlı kesme mekanizması:
   - Domine edilmemiş çözüm sayısı popülasyon büyüklüğünden fazla olduğunda uygulanır.
   - N adet küme merkezi belirlenir.
   - Her kümeden bir temsilci çözüm seçilir.

2.8.1. MSP Operatörünün Algoritmalara Entegrasyonu

MSP operatörünün algoritmalara entegrasyonu, SP operatörünün değiştirilmiş bir versiyonu olması nedeniyle temel akış yapısı benzerlik göstermektedir. Ancak yoğunluk hesaplamasında Mahalanobis mesafesinin kullanılması ve kesme mekanizmasında k-ortalamalar kümeleme yönteminin uygulanması gibi önemli farklılıklar içermektedir. MSP operatörünün Rao serileri, GWO ve WOA algoritmalarına entegrasyonunda izlenen adımlar aşağıda detaylandırılmıştır:

Adım 1: Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi: Popülasyon büyüklüğü (N) ve maksimum iterasyon sayısı (it) belirlenir.

Adım 2: Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Proje planlama problemindeki aktivitelerin alternatif sayılarına bağlı olarak alt ve üst sınır koşulları dikkate alınarak tamsayı formunda rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her bir çözüm için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Adım 3: En iyi ve en kötü çözümlerin belirlenmesi: Her çözüm için sırasıyla güç değeri (S), ham uygunluk değeri (R), yoğunluk değeri (D) ve final uygunluk değerleri (F) hesaplanır. Rao serileri için, en düşük F değerine sahip çözüm en iyi, en yüksek F değerine sahip çözüm en kötü çözüm, GWO algoritmasında en düşük üç F değerine sahip çözümler alfa, beta ve delta kurtlar ve WOA algoritmasına en düşük F değerine sahip çözüm en iyi çözüm olarak belirlenir.

Adım 4: Yeni popülasyonun oluşturulması: İlgili algoritmanın güncelleme denklemleri kullanılarak yeni çözümler üretilir. Üretilen çözümler için alt ve üst sınır kontrolleri yapılır ve ayrık optimizasyon problemi olduğu için en yakın tamsayıya yuvarlanır. Sonrasında amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

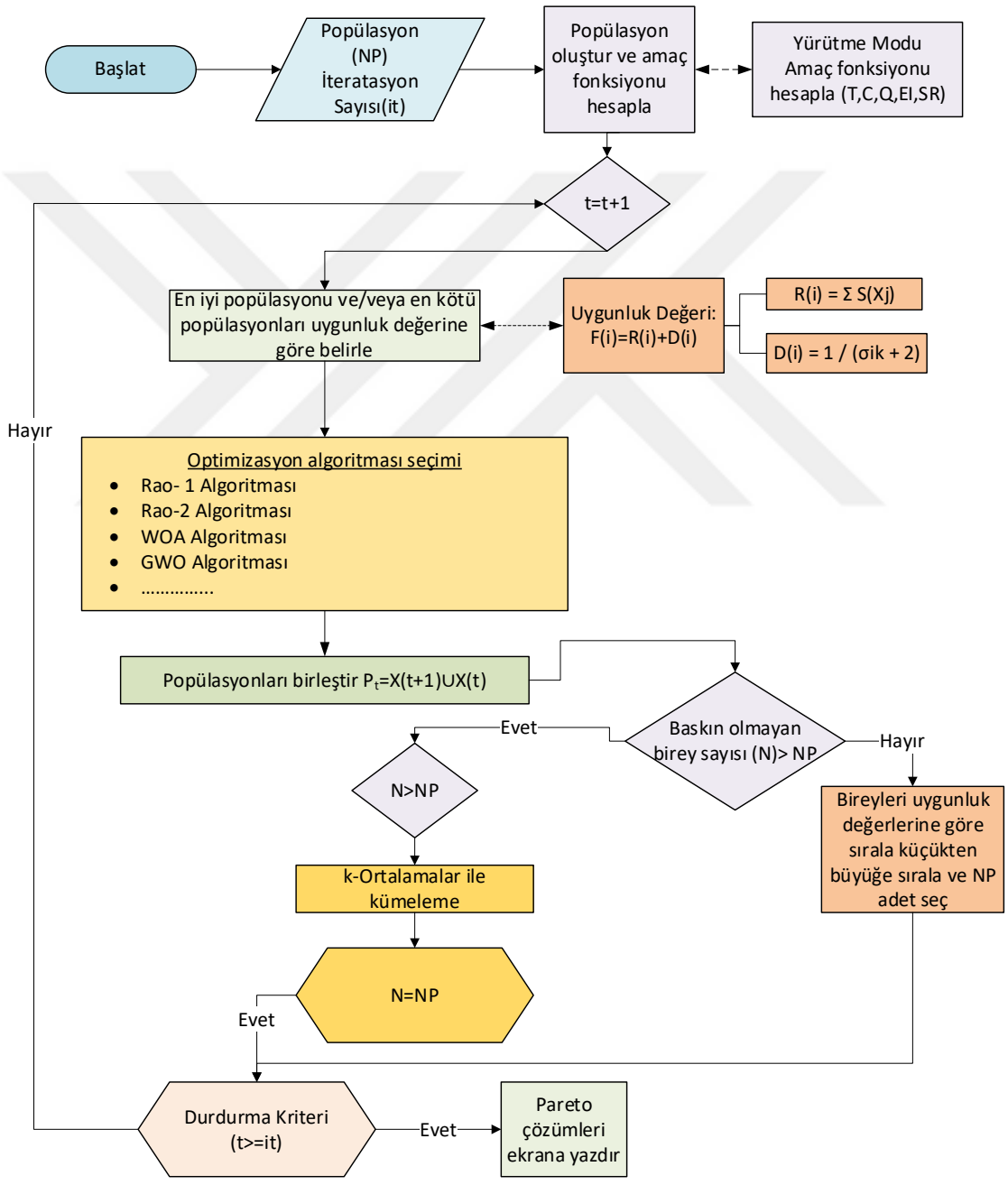
Adım 5: Mevcut iterasyonda üretilen popülasyon ile bir önceki iterasyondaki popülasyon birleştirilerek havuz oluşturulur.

Adım 6: MSP Tabanlı Seçim ve Arşivleme

- Toplam havuzdaki her çözüm için güç, ham uygunluk ve yoğunluk değerleri hesaplanır.
- Final uygunluk değerlerine göre çözümler sıralanır.
- En düşük uygunluk değerine sahip çözümler arşive eklenir.
- Arşiv boyutu aşılırsa k-ortalamalar kümeleme uygulanır. Her kümeden bir temsilci seçilir.

Adım 7: Sonlandırma kontrolü: Eğer maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa optimizasyon süreci sonlandırılır ve elde edilen pareto optimal çözümler karar vericiye sunulur. Aksi halde Adım 3'e dönülerek optimizasyon sürecine devam edilir.

Bu entegrasyon yaklaşımı, SP operatörünün temel yapısını korurken çok boyutlu uzayda daha etkili mesafe hesaplaması ve çözüm seçimi sağlamaktadır. MSP operatörünün tüm algoritmalara entegrasyonuna ait genel akış şeması Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. MSP ile entegre edilen algoritmalara ait akış diyagramı

2.9. BHARAT Yöntemi ile Karar Verme Süreci

Birbiriyle çelişen çeşitli kriterlerin arasından hangisinin seçileceğine karar vermek, çok kriterli karar verme (ÇKKV) olarak adlandırılmaktadır. ÇKKV problemleri, çok amaçlı karar verme ve çok kriterli (nitelikli) karar verme yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır. İnşaat projelerinde ödünleşim problemleri sonucunda elde edilen pareto çözümleri, çok amaçlı karar verme problemlerine örnek gösterilebilir. Bu pareto çözümleri içinden hangisinin seçileceğine karar vermek için çok nitelikli karar verme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla literatürde TOPSIS, GRA, WPM, PROMETHEE, R-yöntem gibi birçok yöntem önerilmiştir.

İnşaat projelerinin çok amaçlı optimizasyonunda, farklı ÇKKV yöntemlerinin kullanılması mümkündür ve seçilecek yöntem karar vericinin tercihlerine göre değişebilir. Bu çalışmada geliştirilen algoritmaların ürettiği pareto çözümleri arasından en iyi uzlaşık çözümün belirlenmesinde örnek olması amacıyla Rao (2024) tarafından önerilen en iyi bütünsel uyarlanabilir özellik sıralama tekniği (BHARAT) yöntemi tercih edilmiştir.

BHARAT yöntemi, literatürde yaygın olarak kullanılan ağırlıklı toplam yöntemi (WSM) ile benzer bir matematiksel yapıya sahiptir. Her iki yöntem de normalize edilmiş değerlerin ağırlıklandırılmış toplamını kullanmaktadır. Ancak temel farklılık ağırlıkların belirlenmesindedir. WSM'de karar verici her kriter için doğrudan ağırlık belirlerken, BHARAT yönteminde kriterler önem sırasına göre sıralanmakta ve ağırlıklar R-metodunda (Rao ve Lakshmi, 2021) önerilen ağırlık yöntemine göre otomatik olarak hesaplanmaktadır. BHARAT yöntemi temel olarak şu adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: Çok amaçlı karar verme probleminin ve ilgili amaçların ($i = 1,2,...,m$) tanımlanması. Amaçlar faydalı (daha yüksek değer istenen) veya faydalı olmayan (daha düşük değer istenen) olabilir. Herhangi bir çok amaçlı optimizasyon algoritması kullanılarak elde edilen pareto optimal çözümleri (B_j, $j = 1,2,...,n$) içeren karar matrisinin oluşturulması.

Adım 2: Karar vericinin amaçların önem değerlendirmesine göre 1,2,3,... şeklinde sıralama yapması ve bu sıralamaya göre ağırlıkların (w_i, $i=1,2,...,m$) belirlenmesi. İki veya daha fazla amaç eşit önemde görüldüğünde ortalama sıralama değeri verilir. Amaçların ağırlıkları R-metodunda önerilen yöntem kullanılarak hesaplanır. Örneğin üç amaçlı zaman-maliyet-kalite probleminde, karar verici için önem sırası [3 1 2] şeklinde belirlendiğinde, ağırlıklar [0.2466 0.4521 0.3014] olarak R-yönteminde belirtilmiştir.

Adım 3: Her bir amaç için farklı çözümlere ait değerlerin en iyi değere göre normalize edilmesi. En iyi değer, faydalı amaçlar için en yüksek, faydasız amaçlar için en düşük değerdir. Normalizasyon işlemi şu şekilde yapılır:

$$\hat{x}_{ij} = \begin{cases} \dfrac{x_{ij}}{En\ iyi}\ Faydalı\ Olmayan\ Kriter \\ \dfrac{En\ iyi}{x_{ij}}\ Faydalı\ Kriter \end{cases} \tag{35}$$

Adım 4: Her bir alternatifin toplam puanının hesaplanması:

$$Toplam\ Puan = \sum w_i x_{ij} \tag{36}$$

Adım 5: Alternatiflerin toplam puanlarına göre azalan sırada sıralanması. En yüksek toplam puana sahip alternatif, en uygun çözüm olarak belirlenir.

Bu çalışma kapsamında, tüm problemler için örnek olması amacıyla ağırlıklar eşit kabul edilmiş ve en iyi sonucu veren algoritmanın bağımsız çözümüne BHARAT yöntemi uygulanmıştır.

2.10. Çok Amaçlı Optimizasyon Performans Ölçütleri

İnşaat planlama problemlerindeki ödünleşimlerin incelendiği çalışmalar çok amaçlı optimizasyon kapsamında ele alındığından, kullanılan algoritmaların performanslarını değerlendirmek için literatürde çeşitli metrikler önerilmiştir (Audet vd., 2021; Knowles ve Corne, 2002; Riquelme vd., 2015; Zitzler vd., 2003; Zitzler ve Thiele, 1999). Tek amaçlı optimizasyon problemlerinden farklı olarak, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde algoritmaların performans değerlendirmesi daha karmaşık bir süreçtir. Tek amaçlı optimizasyonda sadece elde edilen en iyi değer üzerinden bir değerlendirme yapılabilirken, çok amaçlı optimizasyonda birden fazla amaç fonksiyonunun optimize edilmesi ve bu hedefler arasındaki ödünleşimlerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, algoritmaların ürettiği pareto çözüm setlerinin kalitesini farklı açılardan değerlendiren metriklere ihtiyaç duyulmaktadır (Audet vd., 2021). Bu çalışma kapsamında, çözüm uzayının karmaşıklığı ve boyutu göz önüne alınarak, algoritmaların performanslarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için dört temel metrik kullanılmıştır:

Hiper hacim (HV): Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, pareto çözümlerinin hem yakınsama hem de çeşitlilik özelliklerini eş zamanlı değerlendirebilen tek metrik olması nedeniyle literatürde en yaygın kullanılan performans kriteridir (Audet vd., 2021; Knowles ve Corne, 2002). HV metriği, Pareto cephesinin referans noktaya göre kapladığı hacmi hesaplamaktadır. Bu hacim değerinin büyüklüğü, algoritmanın performans kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Matematiksel olarak, HV metriği;

$$HV = \bigcup_{i=1}^{|\Omega|} \vartheta_i \tag{37}$$

Burada Ω Pareto çözüm kümesini, vi ise her bir Pareto çözümünün referans noktaya göre oluşturduğu hiper hacim katkısını ifade etmektedir. HV metriği kapsamlı bir değerlendirme sağlamak için çözüm kümesinin gerçek Pareto cephesine olan yakınlığını, çözümlerin amaç uzayında dağılımını ve çözüm kümesinin amaç uzayında kapladığı alanın büyüklüğünü birlikte değerlendirmektedir.

Bu çalışmada HV değerleri 0-1 aralığında normalize edilmiş oranlar şeklinde hesaplanmıştır. Her problem için farklı algoritmalarla 10 bağımsız çözüm gerçekleştirilmiştir. Toplam çözüm kümesi, popülasyon sayısı, iterasyon sayısı, bağımsız çözüm sayısı ve algoritma sayısının çarpımı kadar çözüm içermektedir. Bu geniş çözüm kümesi içinden baskın olmayan benzersiz çözümler belirlenerek gerçek pareto cephesi kabulü yapılmıştır. Her algoritmanın bağımsız çözümlerinden elde edilen pareto cephesinin HV değeri, gerçek kabul edilen pareto cephesinin HV değerine oranlanarak normalize edilmiş hiper hacim değerleri elde edilmiştir.

C-metrik, iki farklı pareto çözüm kümesinin birbirine göre üstünlüğünü karşılaştırmak için kullanılan bir performans kriteridir (Zitzler vd., 2003). Bu metrik, bir algoritmanın ürettiği çözüm kümesinin diğer bir algoritmanın çözüm kümesini ne ölçüde domine ettiğini göstermektedir. Matematiksel olarak, A ve B olmak üzere iki farklı Pareto çözüm kümesi için C-metrik şu şekilde hesaplanır:

$$C(S_1, S_2) = \frac{|\{a_2 \epsilon S_2; \exists a_1 \epsilon S_1 : a_1 \leq a_2\}|}{|S_2|} \tag{38}$$

Bu formülde C(A,B) değeri [0,1] aralığında değişmekte olup, C(A,B) = 1 değeri A kümesinin B kümesini tamamen domine ettiğini, C(A,B) = 0 değeri ise A kümesindeki hiçbir çözümün B kümesindeki çözümleri domine edemediğini göstermektedir.

Yayılım (SP) metriği, Pareto çözüm kümesinin amaç uzayındaki dağılımını değerlendirmek için kullanılan bir performans kriteridir (Deb vd., 2002; Y.-N. Wang vd., 2010). Bu metrik, çözümlerin amaç uzayında ne kadar homojen dağıldığını ölçmektedir. Matematiksel olarak spread metriği iki amaçlı problemler için denklem 39'da, üç ve daha fazla amaçlı problemler için denklem 40-42'de şu şekilde hesaplanır:

$$\Delta = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} \left| d_i - \bar{d} \right|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \tag{39}$$

$$SP = \frac{\sum_{i=1}^{m} d(E_i, \Omega) + \sum_{x \in \Omega} \left| d(X, \Omega) - \bar{d} \right|}{\sum_{i=1}^{m} d(E_i, \Omega) + (|\Omega| - m)\bar{d}} \tag{40}$$

$$d(X, \Omega) = min_{Y \in \Omega, Y \neq X} \| F(X) - F(Y) \| \tag{41}$$

$$\bar{d} = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{X \in \Omega} d(X, \Omega) \tag{42}$$

Burada Ω çözümler kümesini temsil etmekte olup, (E_1,…,E_m) m adet Pareto optimal çözümler kümesindeki uç noktaları, m amaç fonksiyonlarının sayısını göstermektedir. d(X,Ω) ardışık çözümler arasındaki minimum Öklid mesafesini, |Ω| Pareto çözümler kümesindeki toplam çözüm sayısını ve d ise çözümler arasındaki mesafelerin ortalamasını ifade etmektedir. Spread değerinin 0'a yakın olması çözümlerin paretonun düzgün bir şekilde yayıldığını, yüksek yayılım değerleri çözümlerin düzensiz bir dağılım gösterdiğini ifade etmektedir.

Ortalama İdeal Mesafe (MID), Pareto çözüm kümesindeki çözümlerin ideal çözüme olan uzaklığını ölçen bir performans metriğidir (Maghsoudlou vd., 2017). Bu metrik, bulunan çözümlerin ideal noktaya ne kadar yakınsadığını değerlendirmek için kullanılır. Matematiksel olarak MID metriği şu şekilde hesaplanır:

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{i=1}^{m}\sqrt{\left(\frac{f^{i,m} - f^{En\ iyi,m}}{f^{max,m} - f^{min,m}}\right)^2}}{N} \quad (43)$$

Burada N baskın olmayan çözümlerin sayısını, $f^{i,m}$ elde edilen baskın olmayan çözüm kümesindeki amaç fonksiyonlarının değerlerini ifade etmektedir. MID değeri ne kadar küçük olursa, algoritmanın performansı o kadar iyi kabul edilir.

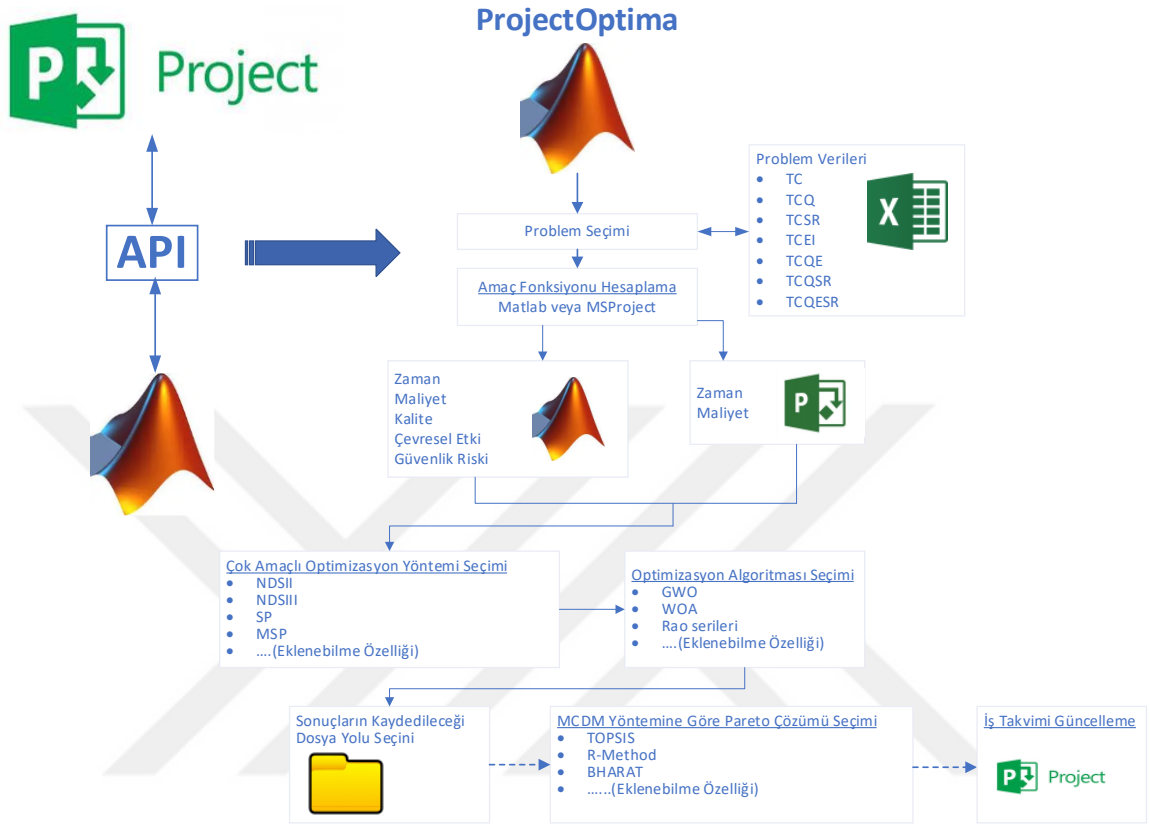
Bu metrikler arasında özellikle hiper hacim metriği, diğer metriklere göre literatürde en çok kabul gören ve kullanılan metriktir (Audet vd., 2021; Knowles ve Corne, 2002; Riquelme vd., 2015; Zitzler vd., 2003; Zitzler ve Thiele, 1999). Bunun en önemli nedeni, HV metriğinin tek başına hem yakınsama hem çeşitlilik hem de kapsama özelliklerini aynı anda değerlendirebilen tek metrik olmasıdır.

Bu sebeple, çalışma kapsamında üretilen pareto çözümleri karşılaştırması yapılırken en yüksek HV değerine sahip bağımsız çözümler seçilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan ÇKKV yöntemi her problem için en yüksek HV değerine sahip algoritmanın en yüksek HV değerine sahip bağımsız çözümüne uygulanmıştır.

2.11. Geliştirilen Yazılım Programı

İnşaat planlama projelerinin çok amaçlı optimizasyonu için MATLAB (The MathWorks Inc., 2022) programında kapsamlı bir yazılım programı (ProjectOptima) geliştirilmiştir. Programın temel özelliği, metasezgisel algoritmaları ve çok amaçlı seçme-eleme operatörlerini kolaylıkla entegre edebilecek modüler bir yapıya sahip olmasıdır. Bu modüler yapı sayesinde program sürdürülebilir bir şekilde geliştirilebilmekte, yeni algoritmaların ve operatörlerin eklenmesi kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bu program, proje yöneticilerine esnek bir arayüz sunarak, farklı amaç fonksiyonları arasındaki ödünleşimleri değerlendirebilmelerine ve pareto çözümlerini elde etmelerine olanak sağlamaktadır. Kullanıcılar, elde edilen pareto çözümleri arasından tercihlerine göre en uygun çözümü seçebilmekte veya çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanarak en iyi uzlaşık çözümü belirleyebilmektedir. Ayrıca, MS Project ile entegrasyon sayesinde proje verilerinin otomatik aktarımı ve seçilen pareto çözümüne göre proje takviminin güncellenmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 14'te programa ait çalışma mantığı

gösterilmektedir. Bu bölümde, geliştirilen programın temel özellikleri ve kullanıcı arayüzü detaylı olarak açıklanmaktadır.

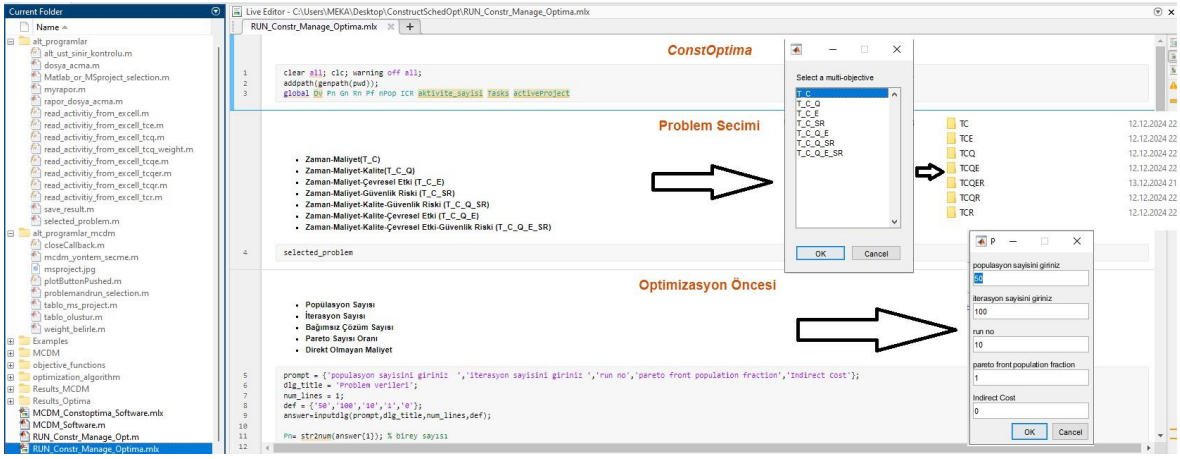


Şekil 14. Geliştirilen yazılıma ait çalışma döngüsü

2.11.1. ProjectOptima Programının Temel Özellikleri ve Kullanımı

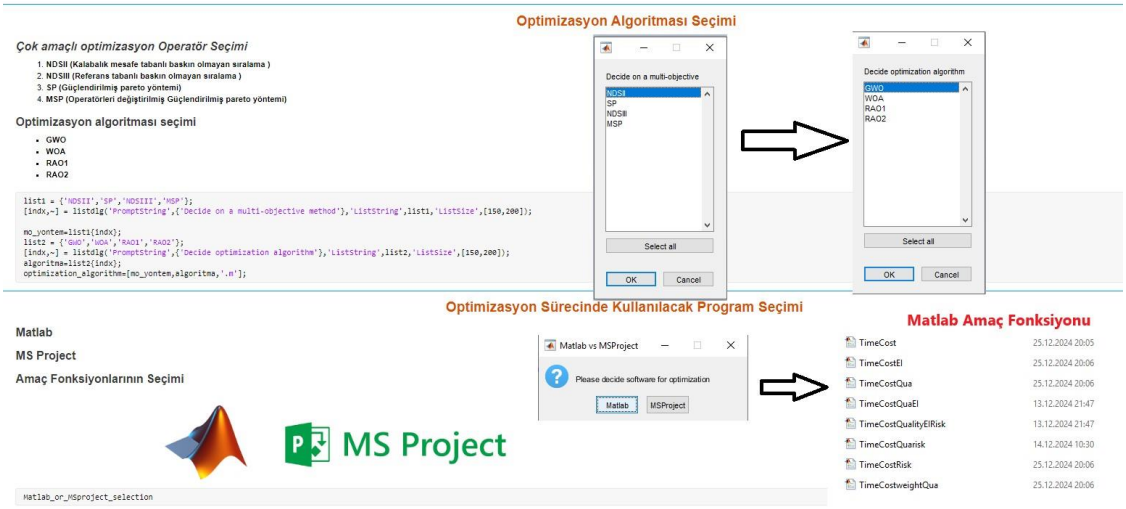
Şekil 15'te geliştirilen ProjectOptima programına ait ana giriş sayfası gösterilmektedir. Program, modüler bir yapıya sahip olup optimizasyon ve çok kriterli karar verme (MCDM) modülleri ayrı alt programlar şeklinde tasarlanmıştır. Ayrıca örnek problemler, amaç fonksiyonları ve sonuçların kaydedilmesi için gerekli alt dosyalar organize bir şekilde yapılandırılmıştır.

ProjectOptima programı çalıştırıldığında kullanıcıdan öncelikle çok amaçlı optimizasyonun uygulanacağı inşaat planlama probleminin seçimi istenmektedir. Bu seçimin ardından, belirlenen probleme ait aktivite opsiyonlarının bulunduğu Excel dosyası kullanıcıdan istenir. Son olarak optimizasyon sürecinin temel parametreleri olan popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve bağımsız çalıştırma sayısı kullanıcı tarafından belirlenir.

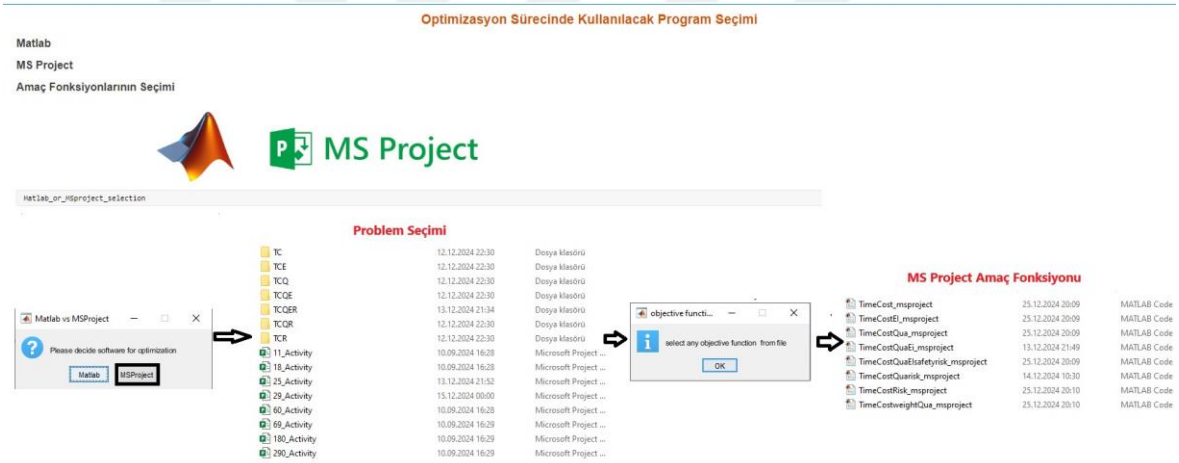


Şekil 15. ProjectOptima programı başlatmaya ait görsel

Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesinden sonra optimizasyon sürecinde kullanılacak algoritmalar ve program seçimi istenmektedir. İlk olarak çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinden NDSII (kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama), SP (güçlendirilmiş pareto), MSP (modifiye edilmiş güçlendirilmiş pareto) ve NDSIII (referans nokta tabanlı baskın olmayan sıralama) seçenekleri arasından tercih yapılır. Ardından optimizasyon algoritması olarak GWO (Gri kurt optimizasyonu), WOA (Balina optimizasyon algoritması), RAO1 (Rao-1 algoritması) ve RAO2 (Rao-2 algoritması) seçeneklerinden biri belirlenir. Algoritmaların belirlenme sürecinden sonra optimizasyon sürecinde kullanılacak programların seçimi için iki seçenek sunulmaktadır. MATLAB seçeneğinde tüm amaç fonksiyonları MATLAB ortamında gömülü fonksiyonlar kullanılarak hesaplanırken, MS Project seçeneğinde zaman ve maliyet değerleri MS Project'ten otomatik olarak çekilmekte, diğer amaç fonksiyonları (kalite, çevresel etki, güvenlik riski) MATLAB ortamında hesaplanmaktadır. MATLAB seçeneğinin tercih edilmesi durumunda, kullanıcıdan seçtiği probleme uygun amaç fonksiyonlarını belirlemesi istenmektedir. MS Project seçeneğinin tercih edilmesi durumunda ise kullanıcıdan öncelikle probleme ait MS Project dosyası seçmesi, ardından MS Project için hazırlanmış amaç fonksiyonlarının bulunduğu ".m" dosyaları arasından probleme uygun olanı belirlemesi istenmektedir. Bu süreçler Şekil 16 ve 17'de gösterilmektedir.



Şekil 16. ProjectOptima programı algoritma ve optimizasyonda kullanılacak amaç fonksiyonu seçimi

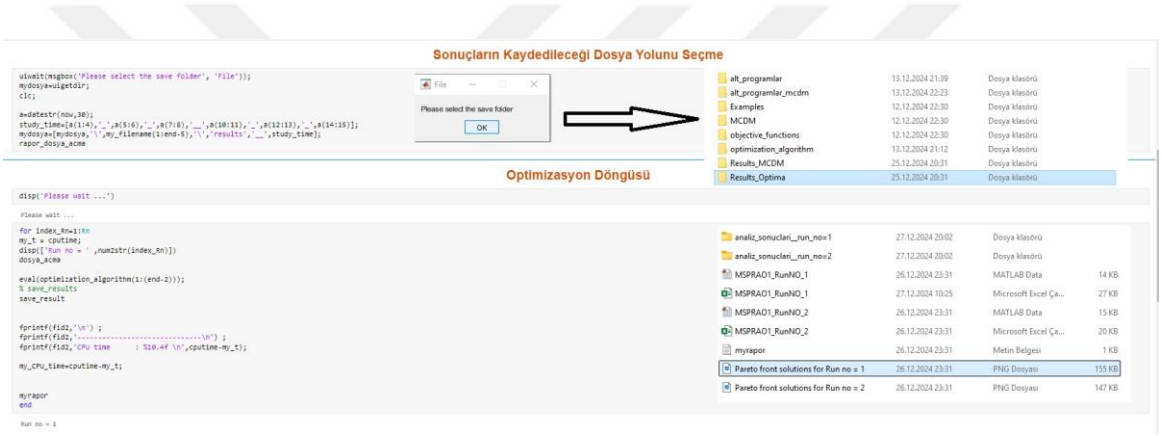


Şekil 17. ProjectOptima programı optimizasyonda kullanılacak MS Project programı seçimi

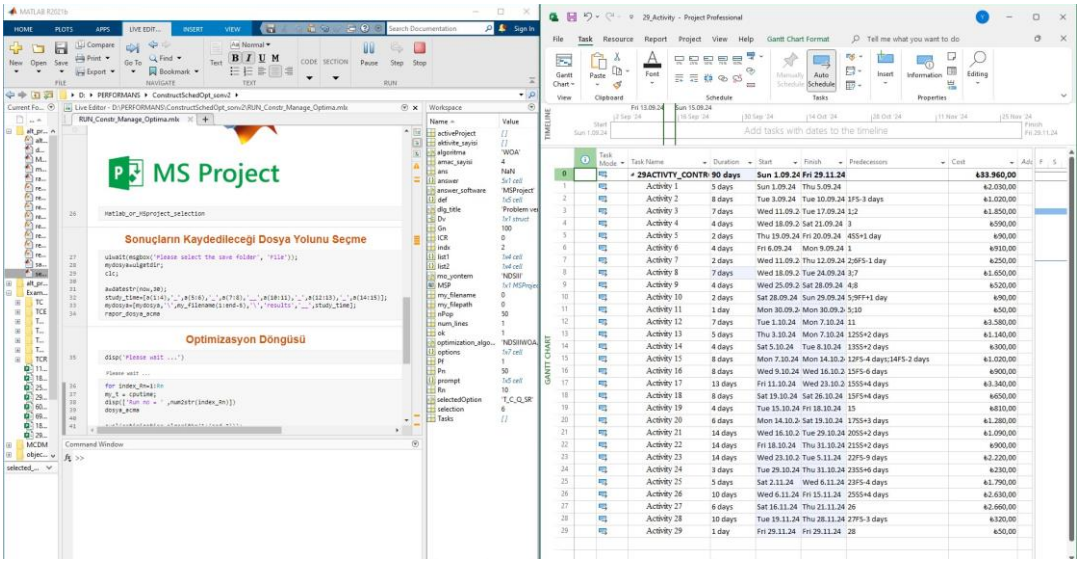
Seçim aşamalarının tamamlanmasının ardından program, kullanıcıdan optimizasyon sonuçlarının kaydedileceği dosya yolunu belirlemesini istemekte ve sonrasında optimizasyon işlemini başlatmaktadır. Bu süreç Şekil 18'de gösterilmektedir. Optimizasyon sürecinde seçilen programa göre farklılar oluşmaktadır. MS Project seçeneğinde, aktiviteler için belirlenen opsiyonlar MS Project'e aktarılmakta ve optimizasyon eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir. Böylece MS Project ekranında optimizasyon süreci ve iş takvimi izlenebilmektedir (Şekil 19). MATLAB seçeneğinde ise tüm işlemler MATLAB ortamında yürütülmektedir. Her iki program içinde kayıt klasöründe optimizasyon sonucu elde edilen

pareto sonuçları, opsiyonların ve bu opsiyonlar sonucunda elde edilen amaç değerlerinin yer aldığı bir Excel dosyasına kaydetmektedir. Ayrıca oluşturulan pareto sonucu iki amaçlı problemlerde iki boyutlu grafik olarak, üç amaçlı problemlerde üç boyutlu olarak dört ve daha fazla amaçlı problemlerde ise paralel grafik olarak kaydedilmektedir.

Yapılan performans analizleri sonucunda, MATLAB ile gerçekleştirilen optimizasyonun, MS Project entegrasyonuna göre ortalama 20 kat daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Bu önemli performans farkı nedeniyle, kullanıcıların MS Project entegrasyonu yerine MATLAB ortamında optimizasyon yapmaları önerilmektedir. Optimizasyon neticesinde elde edilen pareto sonuçlarına göre ProjectOptimaMCDM programı kullanarak iş takvimlerini güncellemeleri önerilmektedir.



Şekil 18. ProjectOptima programı optimizasyon süreci ve kayıt dosyası

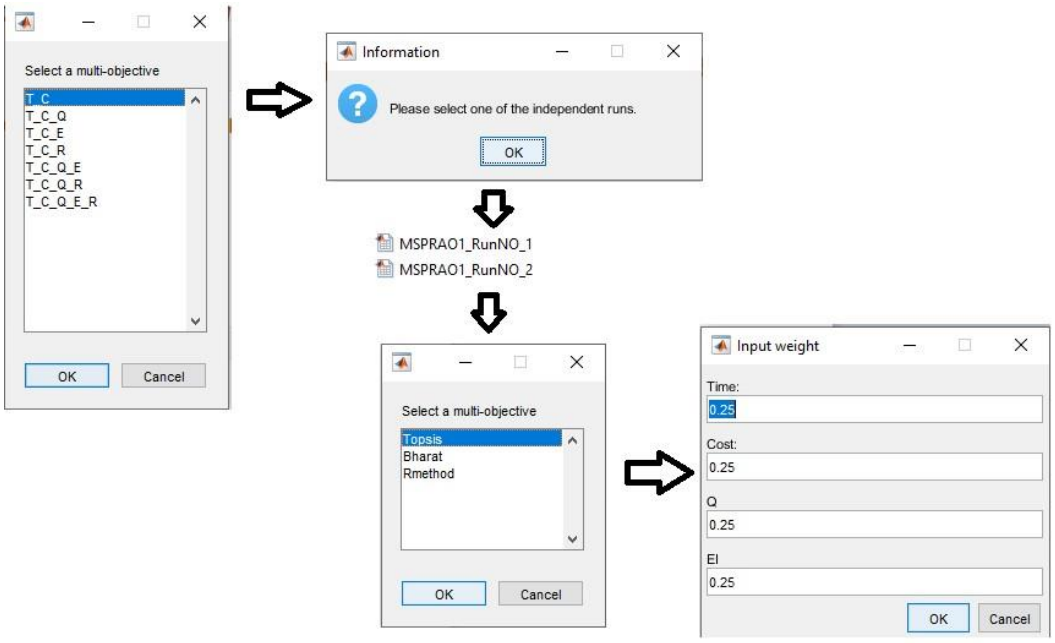


Şekil 19. ProjectOptima programında optimizasyonda MS Project'in kullanımı

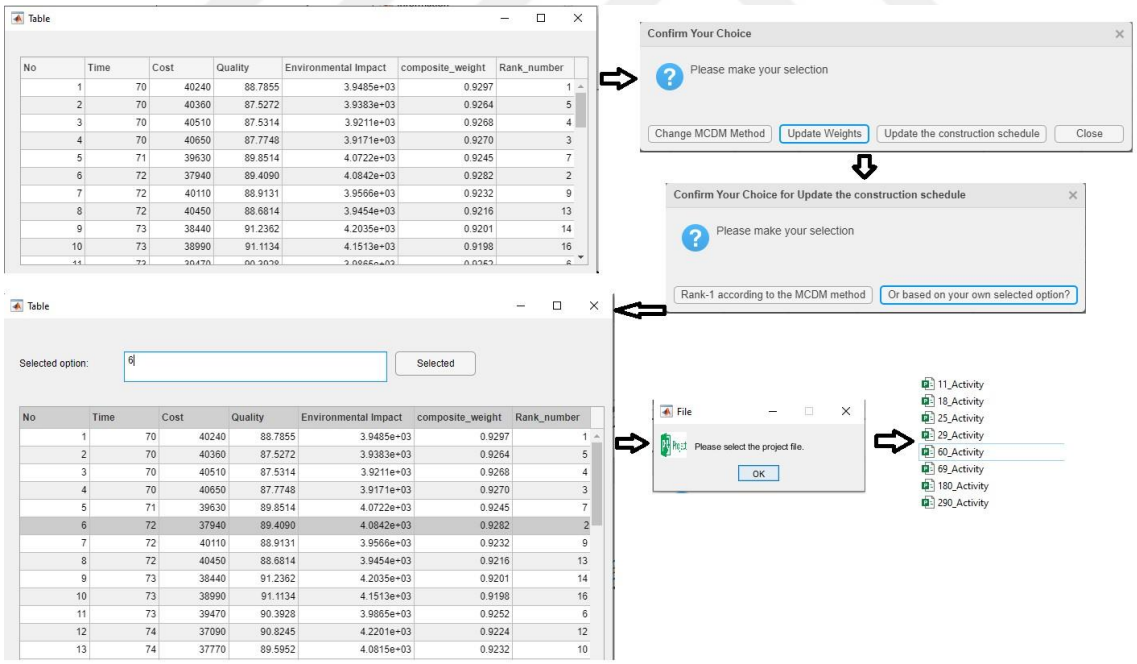
2.11.2. ProjectOptimaMCDM Programının Temel Özellikleri ve Kullanımı

Optimizasyon sonrasında elde edilen pareto sonuçlarından hangisine göre proje takviminin güncelleneceğini belirlemek için çok kriterli karar verme (MCDM) yöntemlerine dayalı ProjectOptimaMCDM programı geliştirilmiştir. Program çalıştırıldığında kullanıcıdan öncelikle problem türünün belirlenmesi istenmektedir. Ardından, bu probleme ait çözülen bağımsız çözümler içinden optimizasyon sonuçlarının bulunduğu ".mat" dosyasının seçilmesi beklenmektedir. Sonraki aşamada kullanıcıdan, çok kriterli karar verme (MCDM) yöntemini belirlemesi istenir. Seçilen yönteme göre kullanıcıdan, toplamı 1 olacak şekilde amaçlara ağırlık ataması yapması istenir ve bu ağırlıklar doğrultusunda pareto sonuçlarına ait tablo kullanıcıya sunulur. Bu süreçler Şekil 20'de gösterilmektedir.

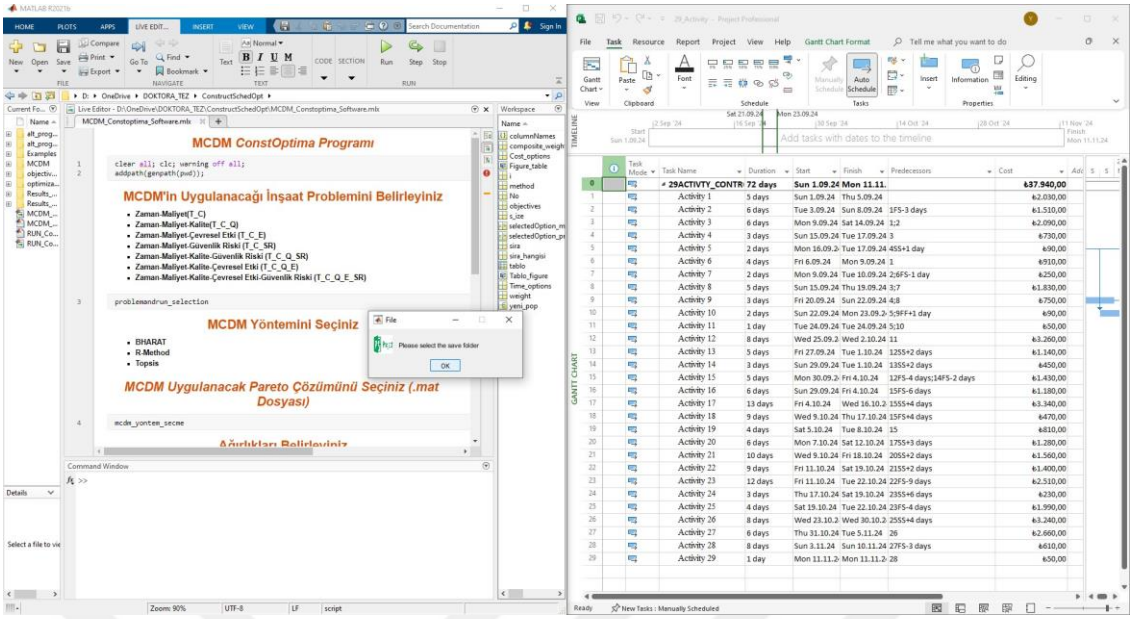
Tabloda her bir amacın değeri, çok kriterli karar verme yöntemine göre sıralama ve toplam ağırlıklandırma skorları gösterilmektedir. Bu aşamada kullanıcı tabloyu kapatmak istediğinde; MCDM yöntem değiştirme, ağırlıkları güncelleme, iş takvimini düzenleme ve programdan çıkma seçenekleri sunulmaktadır. Kullanıcı MCDM yöntemini değiştirmeyi seçerse yeni yönteme göre sıralama yapılır, ağırlıkları güncellemeyi seçerse pareto çözümleri yeni ağırlıklara göre sıralanır. Kullanıcı iş takvimini düzenleme seçeneğini seçtiğinde program, MCDM sonuçlarına göre en iyi pareto çözümünü veya kullanıcının tercih edeceği farklı bir pareto çözümünü seçmesi istenir. Bu işlemlerden sonra, kullanıcının seçtiği alternatife göre program, güncellenecek MS Project dosyasının konumunu belirlemesini ister. Bu süreçler Şekil 21'de gösterilmektedir. İş takviminin MS Project'te güncellenmesinin ardından program, yeni dosya için kayıt konumu belirlenmesini isteyerek süreci tamamlar. Şekil 22'de, Şekil 21'de verilen altıncı sıradaki pareto çözümüne göre güncellenmiş iş takvimi gösterilmektedir.



Şekil 20. ProjectOptimaMCDM programında çok kriterli karar verme süreci



Şekil 21. ProjectOptimaMCDM programında MS Project iş takvimi güncellemesi



Şekil 22. Seçilen pareto çözümüne göre güncellenen iş takvimi

Geliştirilen yazılım programı ile inşaat projelerinin çok amaçlı optimizasyonu için güçlü bir karar destek sistemi oluşturulmuştur. Yazılım, farklı seçme-eleme operatörlerinin (NDSII, NDSIII, SP, MSP) metasezgisel algoritmalarla entegrasyonunu sağlarken, MATLAB ve MS Project entegrasyonu sayesinde optimizasyon sürecini bütünleşik olarak yönetebilmektedir. ProjectOptima yazılımının modüler yapısı yeni algoritmaların ve çok amaçlı operatörlerin kolayca eklenmesine olanak tanırken, ProjectOptimaMCDM programı aracılığıyla optimizasyon sonucunda elde edilen pareto çözümleri mevcut ve yeni eklenebilecek MCDM yöntemleriyle (BHARAT, R-metodu, TOPSIS) değerlendirilebilmektedir. Karar vericiler, optimizasyon sonucunda elde edilen pareto çözümlerini kendi tercihlerine göre atadıkları ağırlıklarla sıralayabilmekte, sıralamada en iyi skoru elde eden çözümü veya tercih ettikleri herhangi bir çözümü seçebilmektedirler. Seçilen pareto çözümüne göre MS Project'teki iş takvimi otomatik olarak güncellenmekte, böylece teorik optimizasyon sonuçları pratiğe aktarılmaktadır. Bu entegre yaklaşımla geliştirilen algoritmaların performansları, bir sonraki bölümde farklı vaka çalışmaları üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak irdelenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

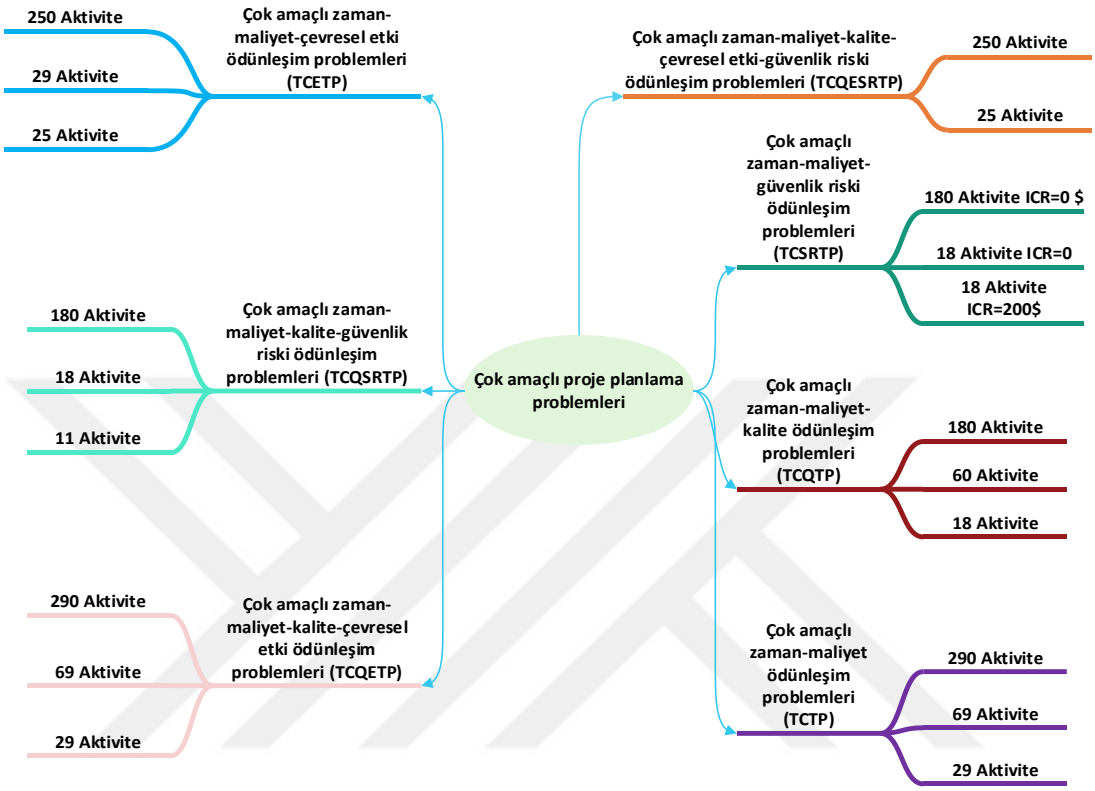
3.1. Çok Amaçlı İnşaat Proje Problemleri İçin Sayısal Örnekler

Bu bölümde çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının, farklı proje planlama problemlerinde performansları detaylı olarak incelenmektedir. İncelenen problemler, proje yönetiminin farklı gereksinimlerini karşılamak amacıyla zaman-maliyet, zaman-maliyet-kalite, zaman-maliyet-çevresel etki, zaman-maliyet-güvenlik riski, zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski, zaman-maliyet-kalite-çevresel etki ve zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski olmak üzere toplamda yedi ana kategoriye ayrılmıştır. Problem boyutları Şekil 23'te gösterilmiştir. Rao serileri, gri kurt algoritması ve balina algoritması sırasıyla çok amaçlı seçme ve eleme yöntemleri birleştirilmiştir. Her bir algoritma, kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII), güçlendirilmiş pareto yöntemi (SP) ve güçlendirilmiş pareto yönteminin parametrelerinin değiştirilmiş hali (MSP) yöntemi ile geliştirilmiştir. Çok amaçlı yöntemlerin her biri, dört farklı algoritma ile kullanılmış ve seçilen çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin pareto çözümlerini elde etmedeki performansları karşılaştırılmıştır.

Kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), çok amaçlı seçme ve eleme operatörünü kullanan algoritmalar; iki ve üç amaçlı inşaat proje planlama problemlerinde değerlendirilmesi yapılmıştır. Güçlendirilmiş pareto (SP) çok amaçlı optimizasyon operatörünü kullanan algoritmaların, iki, üç ve dört amaçlı proje planlama problemlerinde performansı incelenmiştir. NDSIII ile geliştirilen algoritmalar üç ve daha fazla amaçlı problemlerde performans incelemesine tabi tutulmuştur. Son olarak, güçlendirilmiş pareto tabanlı yöntemin dört ve daha fazla amaçlı problemlerde performansının düşmesi sebebiyle MSP yöntemi geliştirilmiş bu operatörü kullanan algoritmalarda dört ve daha fazla amaçlı problemlerde incelenmiştir.

Tüm algoritmalar, belirtilen problem kategorilerinde on bağımsız çözüm seti üzerinden test edilmiştir ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Algoritmaların çözüm kalitesi; C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe performans ölçümleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, her problem kategorisinde, en iyi çözümleri üreten algoritmanın Pareto çözümleri arasından en uygun alternatifleri belirlemek amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır.

Bu süreçte, her bir amacın eşit öneme sahip olduğu varsayılmış ve her problem için elde edilen pareto çözümlerinin yalnızca ilk üç tanesi gösterilmiştir.



Şekil 23. Çok amaçlı proje planlama problemleri

3.2. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemleri

Çok amaçlı zaman-maliyet ödünleşim problemleri kapsamında, 29, 69 ve 290 aktiviteli problemler üzerinde algoritmaların performans incelemeleri yapılmaktadır. İlk olarak Sakellaropoulos ve Chassiakos (2004) tarafından incelenen 29 aktiviteli zaman-maliyet ödünleşim problemi, daha sonra Tran (2020) tarafından çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. 69 aktiviteli problem ise Tran (2020) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Hem 29 hem de 69 aktiviteli problemler için, Tran (2020) çok amaçlı Sosyal grup optimizasyon algoritmasını (MOSGO) kullanmıştır.

Çalışma kapsamında, çok amaçlı zaman-maliyet ödünleşim problemlerine çözüm sunmak amacıyla, Rao serileri, Gri kurt optimizasyonu (GWO) ve Balina optimizasyonu algoritması (WOA), NDSII ve SP çok amaçlı seçim ve eleme operatörleriyle ayrı ayrı

entegre edilerek geliştirilmiştir. Algoritmaların yapıları sabit tutularak, çok amaçlı optimizasyon sürecinde kullanılan operatörlerin pareto çözümleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Böylece, operatörlerin, Pareto çözümlerinin kalitesine ve optimizasyon sürecine olan etkisi derinlemesine araştırılmıştır.

Ayrıca, geliştirilen bu algoritmaların 29 ve 69 aktiviteli problemler üzerindeki performansını, literatürde kullanılan algoritmalarla doğru bir şekilde karşılaştırabilmek için, MOSGO algoritması bu çalışma kapsamında yeniden kodlanmış ve test edilmiştir. Sosyal grup algoritması, çok amaçlı seçim ve eleme operatörü olarak entropi kalabalık mesafesi tabanlı (Wang vd., 2010) baskın olmayan sıralama yöntemini kullanmaktadır. MOSGO algoritması hakkında daha fazla bilgi için Tran (2020) çalışmasına başvurulabilir.

Bu çalışmada geliştirilen algoritmaların, büyük ölçekli projelerdeki performansını değerlendirmek amacıyla, 29 aktiviteli proje on kat artırılarak 290 aktiviteye çıkarılmıştır. Bu sayede çok amaçlı optimizasyon operatörlerinin büyük ölçekli problemlerdeki performans değişiklikleri de incelenmiştir. Algoritmaların performansı, C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

3.2.1. 29 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemi

29 aktiviteye sahip zaman-maliyet ödünleşim problemi, ilk olarak Sakellaropoulos ve Chassiakos (2004) tarafından incelenmiştir. Çalışma, bir karayolu genişletme projesini ele almakta olup, mevcut iki şeritli karayolunun dört şeritli bölünmüş bir otoyola dönüştürülmesini kapsamaktadır. Sakellaropoulos ve Chassiakos (2004), bu mühendislik problemini zaman kısıtlamalarıyla değerlendirilmiştir.

Daha sonra aynı problem Tran (2020) tarafından yeniden ele alınmış ve çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak incelenmiştir. Tran (2020), bu problemi çözmek için 100 popülasyon ve 200 iterasyona sayısına sahip çok amaçlı sosyal grup optimizasyonu (MOSGO) algoritmasını kullanmıştır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen SPRao-1, SPRao-2, SPGWO, SPWOA, NDSIIRao-1, NDSIIRao-2, NDSIIGWO ve NDSIIWOA algoritmalarının popülasyon sayısı 100 iterasyon sayısı 100 olacak şekilde belirlenmiştir. Popülasyon ve iterasyon sayıları, literatürde kullanılan MOSGO algoritmasına kıyasla %75 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile analiz edilmiştir. Böylece, literatürde önerilen algoritmaya kıyasla daha az fonksiyon değerlendirmesi ile performansın artırılması hedeflenmiş ve her bir

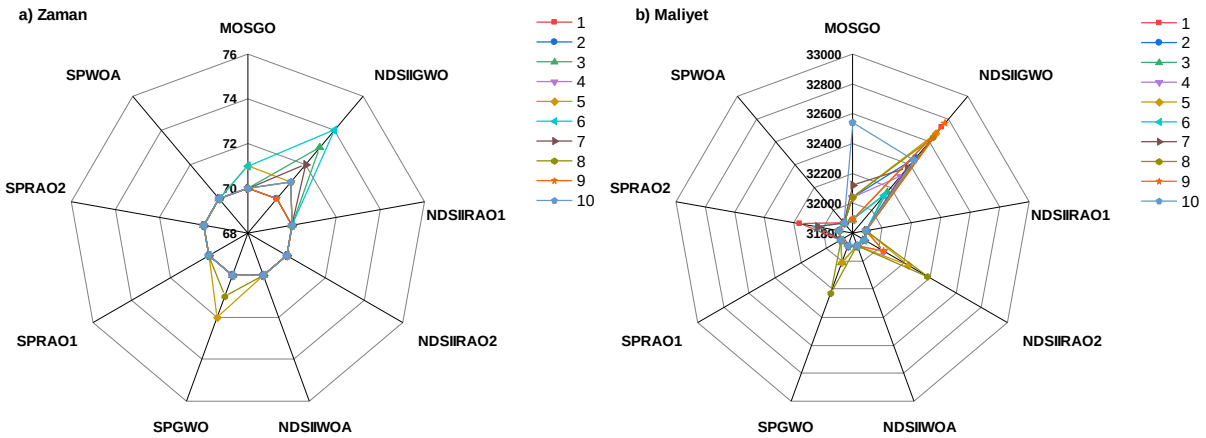
algoritmada kullanılan çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında, MOSGO algoritması orijinal çalışmadaki gibi 100 popülasyon 200 iterasyon kullanılarak yeniden test edilmiştir. Sosyal grup algoritması hem iyileştirme hem de kazanım aşaması olmak üzere her iterasyonda iki defa geliştirilmektedir.

29 aktiviteli problem, her bir faaliyetin belirli süre ve maliyet opsiyonlarının bulunduğu ve toplamda 8,26E+09 farklı proje tamamlanma opsiyonu bulunmaktadır. Probleme ait zaman-maliyet opsiyonları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. 29 Aktivite zaman-maliyet opsiyonları

No	Öncülük ilişkileri	Zaman opsiyonları			Maliyet Opsiyonları		
		T1	T2	T3	C1	C2	C3
1		5	4		2030	2300	
2	1FS-3	8	7	6	1020	1280	1510
3	1;2	8	7	6	1700	1850	2090
4	3	4	3		590	730	
5	4SS+1	2			90		
6	1	4	3		910	1100	
7	2;6FS-1	2			250		
8	3;7	7	6	5	1490	1650	1830
9	4;8	4	3		520	750	
10	5;9FF+1	2			90		
11	5;10	1			50		
12	11	8	7	6	3260	3580	3710
13	12SS+2	5	4	3	1140	1400	1720
14	13SS+2	4	3		300	450	
15	12FS-4 ;14FS-2	8	6	5	1020	1300	1430
16	15FS-6	9	8	6	790	900	1180
17	15SS+4	13	12	11	3340	3750	4060
18	15FS+4	9	8	7	470	650	830
19	15	6	5	4	460	600	810
20	17SS+3	6	5		1280	1430	
21	20SS+2	14	12	10	1090	1320	1560
22	21SS+2	14	11	9	900	1140	1400
23	22FS-9	14	12	11	2220	2510	2690
24	23SS+6	3			230		
25	23FS-4	6	5	4	1590	1790	1990
26	25SS+4	10	9	8	2630	2930	3240
27	26	8	7	6	2060	2450	2660
28	27FS-3	10	9	8	320	440	610
29	28	1			50		

Şekil 24'te on bağımsız çözüm neticesinde elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri sırasıyla gösterilmektedir. NDSIIGWO algoritması, zaman ve maliyet açısından on bağımsız çözümde hem zaman hem de maliyet değerlerinde belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, algoritmanın optimizasyon sürecinde daha fazla belirsizlik yaşadığını ve istikrarlı sonuçlar üretemediğini göstermektedir. SPGWO algoritması ise, zaman ve maliyet açısından daha istikrarlı bir performans sergilemiştir. Zaman açısından 70-72 arasında sabit sonuçlar elde etmiş ve maliyet değerleri NDSII ile geliştirilen Gri kurt algoritmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Rao-2 algoritması incelendiğinde, güçlendirilmiş pareto yöntemi (SP) ile geliştirilen algoritmanın, NDSIIRAO2 algoritmasına göre maliyet değeri açısından tüm bağımsız çözümlerde daha istikrarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Rao-2 algoritmasının her iki çok amaçlı optimizasyon yönteminde de minimum zaman elde edilmesinde benzer sonuçlar elde ederek istikrarlı bir çözüm sundukları görülmektedir. WOA ve Rao-1 algoritmalarında hem SP hem de NDSII geliştirildiklerinde tüm bağımsız çözümlerde minimum maliyet ve zamanı buldukları Şekil 24'te görülebilmektedir. Literatürde, Tran (2020) tarafından önerilen MOSGO algoritması, bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmalara göre %300 daha fazla fonksiyon değerlendirilmesi kullanmasına rağmen minimum maliyeti ve zamanı bulma konusundan RAO1 ve WOA algoritmalarına göre daha rastgele bir davranış göstermektedir.



Şekil 24. 29 aktiviteli TCTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri

Her bir bağımsız çözüm neticesinde, algoritmaların ürettiği pareto çözümlerinin en iyi zaman, maliyet ve dengeli çözümler açısından kıyaslanabilmesi için bir sonraki bölümde

tartışılacak olan performans ölçütlerinden yararlanılmıştır. Bu kıyaslamada, en yüksek hiper hacim (HV) değerine sahip bağımsız çözümün pareto çözümleri kullanılmıştır. HV ölçütünün tercih edilme nedeni, Pareto cephesinin çeşitliliğine ve kalitesine (kapsama, yakınsama ve çeşitlilik) odaklanarak çözüm setinin ne kadar geniş bir alanı kapsadığını değerlendirmesidir. Diğer performans ölçütleri genellikle pareto cephesinin sadece dağılımına veya ideal çözüme olan ortalama uzaklığına odaklanırken, hiper hacim (HV) çözüm setinin genel kalitesini daha bütüncül bir şekilde değerlendirmektedir. Bu nedenle, HV ölçütü bu çalışmada pareto çözümlerinin kıyaslanabilmesi için en uygun performans göstergesi olarak seçilmiştir.

Tablo 3'te gri kurt ve balina algoritmalarının, SP ve NDSII yöntemleri ile elde edilen pareto çözümleri gösterilmiştir. GWO algoritması incelendiğinde, minimum maliyeti ve zamanı bulma konusunda SPGWO algoritmasının, NDSIIGWO algoritmasına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Dengeli çözümler (orta bölge) açısından, SPGWO algoritmasının ürettiği çözümlerin, NDSIIGWO algoritması çözümlerine göre daha baskın olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, kullanılan algoritma aynı olsa da, optimizasyon sürecinde tercih edilen çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin etkisini ortaya koymaktadır. Aynı durum balina optimizasyon algoritmasına bakıldığında da görülebilmektedir. SPWOA ve NDSIIWOA algoritmalarının buldukları minimum süreler aynı olmasına rağmen, SPWOA algoritması tarafından üretilen 1., 2. ve 3. pareto çözümleri NDSIIWOA algoritması tarafından üretilen pareto çözümlerine göre maliyet açısından daha baskın olduğu görülebilmektedir. Minimum maliyete göre elde edilen çözümler her iki algoritmada da aynı olmakla birlikte, dengeli çözümler açısından SPWOA algoritması NDSIIWOA'ya göre daha baskın sonuçlar vermektedir.

Tablo 3. 29 aktiviteli problem için GWO ve WOA algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	NDSIIGWO		SPGWO		NDSIIWOA		SPWOA	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Min. Zaman	74	35020	70	36230	70	37280	70	36230
2		75	34780	71	35920	71	36580	71	35920
3		76	34550	72	35620	72	36200	72	35620
4	Min. Maliyet	90	32130	93	31890	93	31890	93	31890
5		89	32250	92	32010	92	32010	92	32010
6		88	32390	90	32130	90	32130	90	32130
7	Dengeli	81	33540	81	33430	81	33540	81	33430
8		82	33350	82	33260	82	33280	82	33260
9		83	33180	83	33100	83	33150	83	33110

Tablo 4'te, NDSIIRAO1, SPRAO1, NDSIIRAO2 ve SPRAO2 algoritmaları tarafından üretilen zaman, maliyet ve dengeli çözümlere ait karşılaştırmalı pareto çözümleri sunulmaktadır. Zaman öncelikli çözümler incelendiğinde, her iki algoritma da benzer süreler üretmiş olsa da SPRAO1 algoritması maliyet açısından daha avantajlı sonuçlar sunmuştur. Dengeli çözümlere bakıldığında da SPRAO1 algoritmasının, NDSIIRAO1 algoritmasının çözümlerine göre daha baskın olduğu görülmektedir. Bu durum, aynı algoritma kullanılmasına rağmen, çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisini göstermektedir. Benzer şekilde, Rao-2 algoritmalarında da SPRAO2, dengeli çözümler üretmede NDSIIRAO2'ye kıyasla daha baskın sonuçlar sağlamıştır.

Tablo 4. 29 aktiviteli problem için RAO1 ve RAO2 algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	NDSIIRAO1		SPRAO1		NDSIIRAO2		SPRAO2	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Min. Zaman	70	36630	70	36230	70	36230	70	36230
2		71	36340	71	35920	71	35920	71	35920
3		72	36050	72	35620	72	35620	72	35620
4	Min. Maliyet	93	31890	93	31890	93	31890	93	31890
5		92	32010	92	32010	92	32010	92	32010
6		90	32130	90	32130	90	32130	90	32130
7	Dengeli	81	33520	81	33430	81	33460	81	33430
8		82	33290	82	33260	82	33290	82	33260
9		83	33110	83	33100	83	33110	83	33100

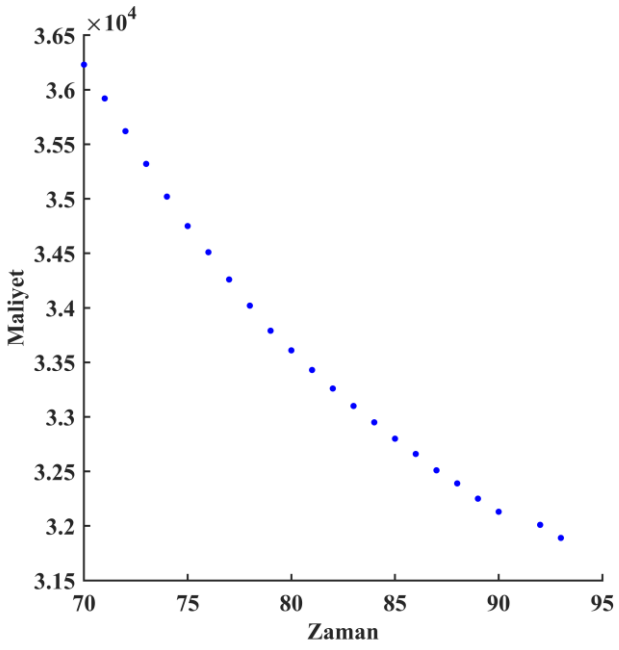
Tablo 5'te, SPWOA ve SPRAO1 algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümlerinin, MOSGO algoritması tarafından üretilen pareto çözümleri ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Tran (2020) yaptığı çalışmada minimum zamanı 64 olarak belirtmesine rağmen, 29 aktiviteli problemdeki opsiyonlarda yer alan minimum zamanlar alınarak MS Project ve Matlab'da ayrı ayrı test edilmiş, ancak yapılan kontroller sonucunda elde edilen minimum süre 70 olarak bulunmuştur. Ayrıca problemi ilk olarak inceleyen Sakellaropoulos ve Chassiakos (2004)'de üretilen pareto çözümlerinin 70 ile 93 zamanları arasında olduğu görülebilmektedir. İncelenen problem ödül ceza gibi kısıtların yer alması sebebiyle bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Tran (2020) çalışmasında önerilen opsiyonlara bakıldığında maliyet değerleri ile tutarlı olmasına rağmen zaman değerlerinde yanlışlık bulunmaktadır. Tran (2020) önerdiği opsiyon değerlerine göre üretilen pareto çözümleri tekrar hesaplanılarak Tablo 5'te gösterilmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmaların ürettiği pareto cepheleri, yeniden üretilen MOSGO algoritması ile

karşılaştırılmıştır. MOSGO algoritması tarafından üretilen çözümlerden 5. ve 6. pareto çözümleri SPWOA ve SPRAO1 algoritmaları tarafından domine edildiği görülmektedir.

Tablo 5. 29 aktiviteli problem için MOSGO ve en iyi algoritmaların pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	MOSGO (2020)		MOSGO		SPWOA		SPRAO1	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Zamana göre	73	35660	70	36230	70	36230	70	36230
2		74	35350	71	35920	71	35920	71	35920
3		-	-	72	35620	72	35620	72	35620
4	Maliyete göre	93	31890	93	31890	93	31890	93	31890
5		92	32010	92	32040	92	32010	92	32010
6		-	-	91	32160	90	32130	90	32130
7	Dengeli	82	33270	81	33430	81	33430	81	33430
8		84	32950	82	33260	82	33260	82	33260
9		-	-	83	33100	83	33110	83	33100

Bir sonraki bölümde performans incelemelerinde görülebileceği gibi, SPRAO1 algoritması hiper hacim açısından en iyi sonucu verdiği için, bu çalışma kapsamında elde ettiği minimum zaman ve maliyet çözümlerine ait kullanılan modlar Tablo 6'da gösterilmiştir. Ayrıca SPRAO1 algoritması tarafından elde edilen pareto çözümleri Şekil 25'te gösterilmiştir.



Şekil 25. SPRAO1 tarafından üretilmiş 29 aktivite zaman-maliyet pareto grafiği

Tablo 6. 29 aktivite için SPRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet
Minimum Zaman	1	2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,3,3,3,1	70	36230
	2	2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,2,3,3,1	71	35920
	3	2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,3,3,1	72	35620
Minimum Maliyet	4	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	93	31890
	5	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1	92	32010
	6	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1	90	32130

3.2.2. 29 Aktivite TCTP Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

29 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet problemlerinin performans değerlendirilmesi, C-metrik, hiper hacim, dağılım ve ortalama ideal mesafe gibi performans ölçütleri kullanılarak yapılmıştır. Tablo 7'de her bir algoritmaya ait on bağımsız çözümle elde edilen Pareto çözümlerinin, MOSGO algoritması ile baskınlık performanslarının (C-metrik) karşılaştırılması gösterilmektedir. Örneğin, C(MOSGO, NDSIIGWO) ifadesi, MOSGO algoritmasının ürettiği 10 bağımsız çözümün, NDSIIGWO algoritması tarafından üretilen 10 bağımsız çözüme karşı baskınlık oranını göstermektedir. Bu değerler en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri olarak gösterilmiştir.

Tablo 7'ye bakıldığında, MOSGO algoritması, NDSIIGWO algoritmasının çözümlerinin ortalama %83'ünü baskıladığı, buna karşılık NDSIIGWO algoritmasının ise MOSGO'nun ürettiği çözümlerinin yalnızca %3'ünü baskılayabildiği görülmektedir. Ancak, gri kurt algoritması (GWO) güçlendirilmiş pareto yöntemi ile geliştirildiğinde ortalama olarak MOSGO algoritmasının ürettiği çözümlerin %31'ini baskılarken, %15'i MOSGO tarafından baskılanmıştır. WOA algoritması incelendiğinde, NDSIIWOA algoritmasının MOSGO çözümlerinin %25'ini baskıladığı ancak %67 oranında baskılandığı görülmektedir. Öte yandan, WOA algoritması SP yöntemiyle geliştirildiğinde baskılama oranı %34'e yükselmiş, baskılanma oranı ise %67'den %16'ya düşmüştür.

Rao-1 ve Rao-2 algoritmaları incelendiğinde, NDSII yöntemiyle geliştirilen serilerin MOSGO algoritması çözümlerini sırasıyla %27 ve %22'sini baskıladıkları, ancak MOSGO tarafından %51 ve %36 oranında baskılandıkları görülmektedir. Öte yandan, SP yöntemiyle geliştirilen Rao algoritmaları NDSIIRAO serilerine göre çok daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. SP yöntemiyle güçlendirilen Rao-1 algoritması, MOSGO çözümlerinin %36'sını baskılayarak NDSII yöntemine göre belirgin bir üstünlük sağlamış ve hiçbir çözümü MOSGO tarafından baskılanmamıştır. Benzer şekilde, SP ile geliştirilen Rao-2 algoritması,

MOSGO çözümlerinin %29'unu baskılarken yalnızca %10 oranında baskılanmıştır. Bu sonuçlar, SP yöntemiyle geliştirilen algoritmaların, NDSII ile geliştirilen versiyonlara kıyasla çok daha baskın olduğunu ve MOSGO algoritmasına karşı büyük bir avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

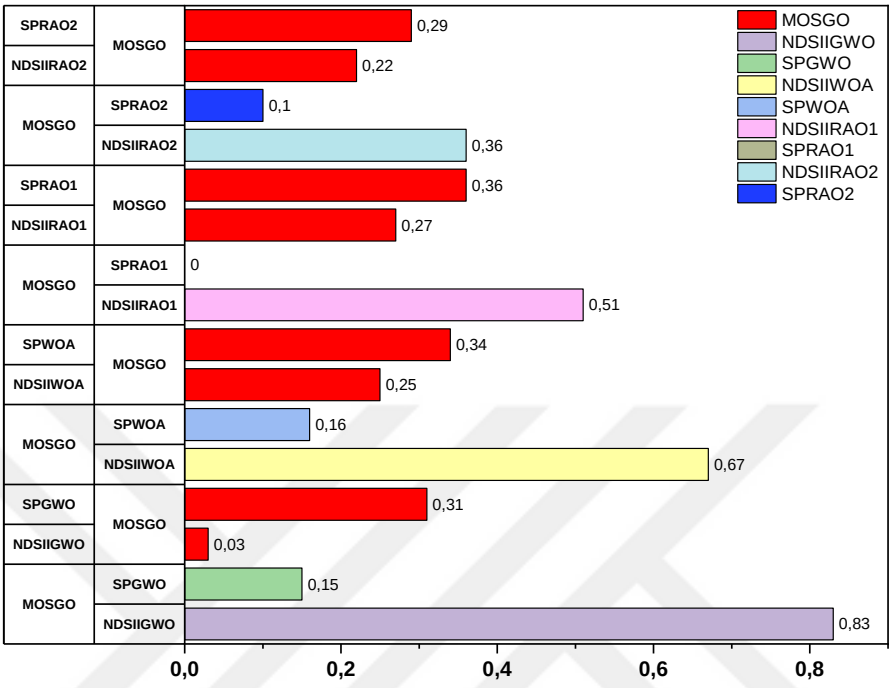
Tablo 7. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MOSGO, NDSIIGWO)	1	0,13	0,83	0,25
C(NDSIIGWO, MOSGO)	0,43	0	0,03	0,10
C(MOSGO,SPGWO)	0,85	0	0,15	0,27
C(SPGWO, MOSGO)	0,89	0	0,31	0,27
C(MOSGO, NDSIIWOA)	0,79	0,35	0,67	0,10
C(NDSIIWOA, MOSGO)	0,51	0	0,25	0,22
C(MOSGO, SPWOA)	0,30	0	0,16	0,08
C(SPWOA, MOSGO)	0,89	0	0,34	0,26
C(MOSGO, NDSIIRAO1)	0,63	0,08	0,51	0,09
C(NDSIIRAO1, MOSGO)	0,86	0	0,27	0,24
C(MOSGO, SPRAO1)	0	0	0	0
C(SPRAO1, MOSGO)	0,89	0	0,36	0,27
C(MOSGO, NDSIIRAO2)	1	0	0,36	0,3
C(NDSIIRAO2, MOSGO)	0,89	0	0,22	0,26
C(MOSGO, SPRAO2)	0,75	0	0,10	0,22
C(SPRAO2, MOSGO)	0,89	0	0,29	0,28

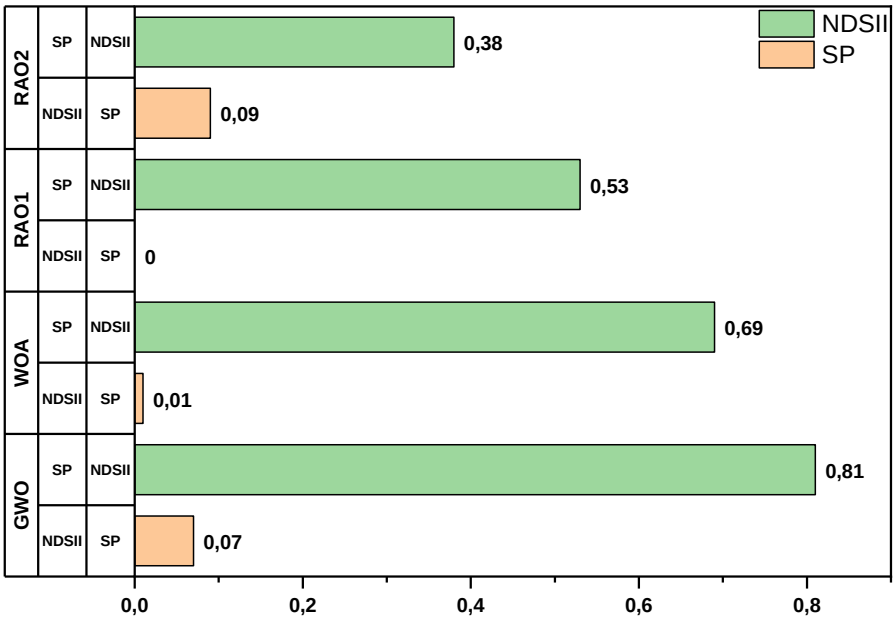
Şekil 26, Tablo 7'de gösterilen ortalama C-metrik değerlerinin grafiksel olarak gösterimini sunmaktadır. Şekilde, her bir satırda yer alan algoritma çiftleri ve karşılarında yer alan sütunlar, ilgili algoritmalar arasındaki karşılaştırmayı ifade etmektedir. Örneğin, Şekil 26'te, MOSGO algoritmasının, NDSIIGWO algoritması üzerindeki çözümlerini baskılama düzeyi 0.83 (%83) olarak gösterilmektedir.

Şekil 27'de, SP ve NDSII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak geliştirilen algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin karşılaştırması gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, NDSII ile geliştirilen GWO algoritması, SP ile geliştirilen versiyonun yalnızca %7'sini baskılarken, SPGWO algoritması, NDSIIGWO'nun ürettiği çözümlerin ortalama %81'ini baskılamaktadır. Benzer şekilde, NDSII ile geliştirilen WOA algoritması, SP versiyonunun yalnızca %1'ini baskılarken, SPWOA algoritması NDSIIWOA çözümlerinin %69'unu baskılamaktadır. Diğer algoritmalar gibi Rao

serilerinde de SP ile geliştirilen algoritmaların, NDSII ile geliştirilen versiyonlara kıyasla daha baskın olduğu açıkça görülmektedir.

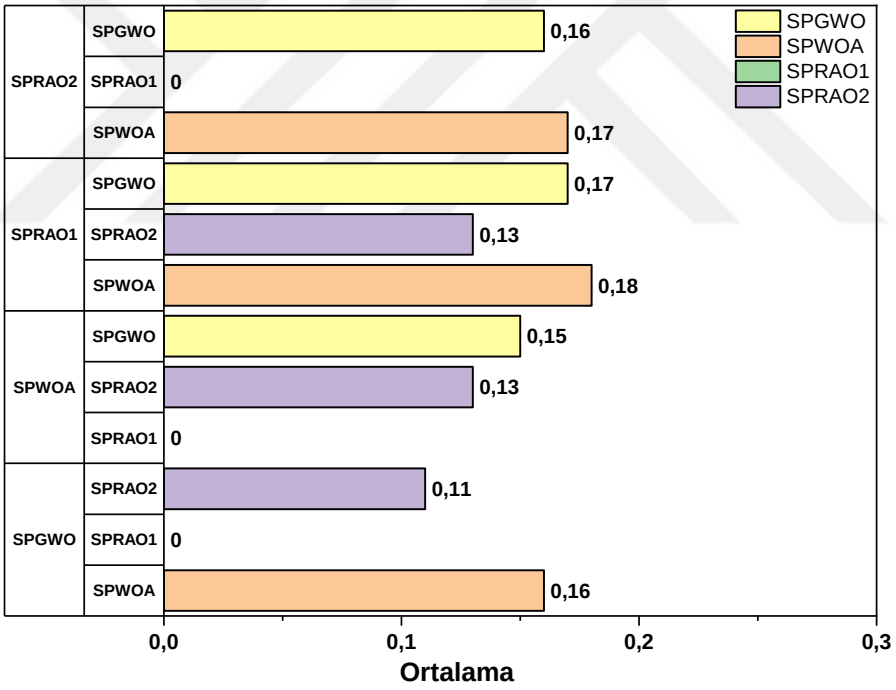


Şekil 26. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için geliştirilen algoritmaların C-metrik kullanılarak MOSGO algoritması ile performans karşılaştırması



Şekil 27. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için, her algoritmanın kendi içinde ortalama C-metrik performans karşılaştırması

Şekil 27'ten görüldüğü gibi, her bir algoritma için C-metrik kıyaslaması yapıldığında, güçlendirilmiş Pareto yöntemi ile geliştirilen algoritmaların, NDSII ile geliştirilen algoritmalara göre üstün sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu nedenle, Şekil 28'da her bir algoritmaya ait en iyi Pareto sonuçlarını veren versiyonların birbiriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 28'e bakıldığında, SPGWO algoritmasının SPWOA algoritmasının %16'sını baskıladığı, SPWOA algoritmasının ise SPGWO algoritmasının %15'ini baskıladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, iki algoritmanın benzer performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, SPRAO1 algoritmasının diğer algoritmalar tarafından baskılanmadığı, aksine, ortalama olarak SPGWO'nun %17'sini, SPRAO2'nin %13'ünü ve SPWOA'nın %18'ini baskıladığı saptanmıştır. Sonuç olarak, C-metrik değerleri açısından, 29 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet ödünleşim problemi için en iyi çözümün SPRAO1 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 28. 29 aktivite zaman-maliyet problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların ortalama C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 8'de hiper hacim ve yayılım değerleri gösterilmektedir. Her bir algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen bu değerler; en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma olarak sunulmuştur.

Tablo 8. 29 aktiviteli zaman-maliyet ödünleşim problemi için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütlerinin karşılaştırılması

	Hiper hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOSGO	1,000	0,969	0,992	0,011	0,3062	0,3742	0,3359	0,0257
NDSIIGWO	0,965	0,844	0,914	0,040	0,4847	0,9646	0,8464	0,1408
NDSIIRAO1	0,983	0,887	0,958	0,030	0,2786	0,5328	0,3785	0,0758
NDSIIRAO2	0,999	0,906	0,979	0,032	0,3062	0,3905	0,3288	0,0326
NDSIIWOA	0,986	0,851	0,930	0,041	0,3552	0,9277	0,6655	0,1971
SPGWO	1,000	0,965	0,994	0,012	0,3062	0,4652	0,3330	0,0554
SPRAO1	1,000	1,000	1,000	0,000	0,3062	0,3062	0,3062	0,0000
SPRAO2	1,000	0,966	0,996	0,011	0,3062	0,3477	0,3154	0,0154
SPWOA	1,000	0,996	0,998	0,001	0,2924	0,3062	0,3048	0,0044

Tablo 9'da ortalama ideal mesafe (MID) ve çeşitlendirme ölçütü (DM) değerleri sunulmaktadır. Her bir algoritma için, on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen değerler en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma olarak sunulmuştur.

İkinci bölümde anlatılan performans ölçütlerine (C-metrik, HV, SP ve MID) ek olarak DM ölçütünün sunulmasının nedeni, Tran (2020) tarafından yapılan çalışmada çeşitlendirme performans ölçütünü de kullanılmış olmasıdır.

Tablo 9. 29 aktiviteli zaman-maliyet ödünleşim problemi için MID ve DM performans ölçütleri karşılaştırması

	Ortalama ideal mesafe (MID)				Çeşitlendirme ölçütü (DM)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOSGO	0,9419	0,8466	0,9196	0,0285	1,4142	1,1266	1,3416	0,0858
NDSIIGWO	0,7506	0,7029	0,7390	0,0156	1,3251	0,9630	1,1666	0,1134
NDSIIRAO1	0,8262	0,7579	0,7771	0,0201	1,6053	1,4142	1,4639	0,0595
NDSIIRAO2	0,7849	0,7349	0,7532	0,0137	1,4306	1,2730	1,3845	0,0559
NDSIIWOA	0,8136	0,7474	0,7826	0,0224	1,9529	1,4372	1,6714	0,1903
SPGWO	0,7586	0,6755	0,7163	0,0285	1,4142	1,2145	1,3710	0,0795
SPRAO1	0,7509	0,7490	0,7504	0,0006	1,4142	1,4142	1,4142	0,0000
SPRAO2	0,7507	0,7362	0,7469	0,0062	1,4142	1,3395	1,3957	0,0303
SPWOA	0,7521	0,7485	0,7507	0,0010	1,4142	1,4142	1,4142	0,0000

DM (çeşitlendirme ölçütü) değerinin daha yüksek çıkması, daha iyi bir performans göstergesi olarak kabul edilmektedir. DM performans ölçümü denklem 44'te gösterilmektedir.

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (Minf_i - Maxf_i)^2} \quad (44)$$

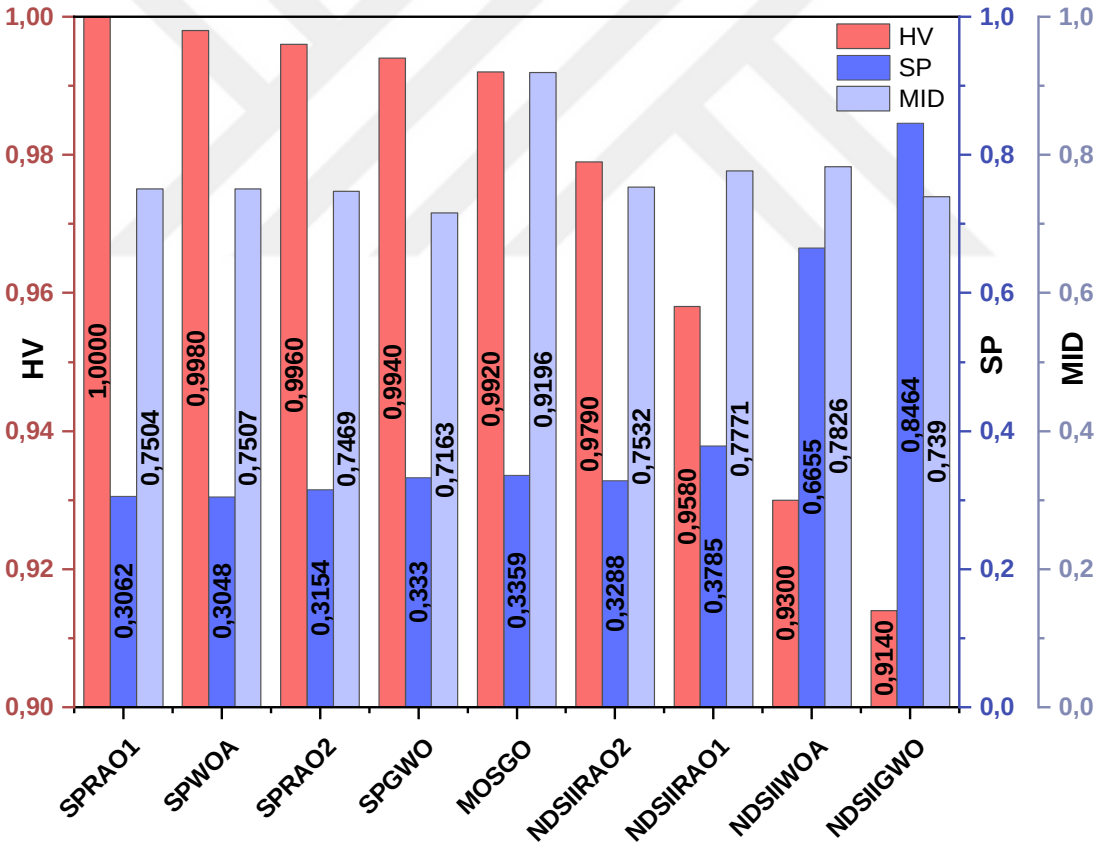
Tablo 9 incelendiğinde DM ölçüsü bakımından ortalama değerler açısından en iyi değer NDSIIWOA algoritmasına aittir. Bunun nedeni, Tablo 3'de NDSIIWOA algoritması tarafından elde edilen pareto cephesinde bulunan çözümlerin [37280, 93] ve [31890, 70] gibi uç noktalar arasında daha geniş bir çeşitlilik göstermesidir. Ancak, SPWOA veya SPRAO1 algoritmaları tarafından üretilen 93 güne karşılık gelen 36230$'lık maliyet değeri NDSIIWOA tarafından üretilen [93,37280] değerini domine etmektedir. Bu durum, NDSIIWOA algoritmasının DM değerinin yüksek olmasına rağmen, çözüm kalitesini tam olarak yansıtmadığını göstermektedir. Bu nedenle, DM metriği bu tür çok amaçlı optimizasyon problemleri için her zaman doğru bir ölçüm aracı değildir ve bu yüzden sonraki problemlerde kullanılmamıştır.

Tablo 10'da performans ölçütlerinin ortalama değerleri gösterilmekte ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en küçüğü olacak şekilde sıralanmıştır. Tablo 10'da performans ölçümlerine ait ortalama değerler, grafiksel olarak Şekil 29'da gösterilmektedir. SPRAO1 algoritması HV performans ölçütü değerinde diğer çözümlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise SPWOA algoritmasının SPRAO1 algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu fark, yayılım metriğinin optimizasyon başarısını değil, yalnızca çözümlerin dağılım düzenini ölçmesiyle ilgilidir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, en iyi pareto çözümünün SPGWO algoritması tarafından elde edildiği görülmektedir. Bu bulgular, her algoritmanın belirli açılardan diğerlerine üstünlük sağladığını göstermektedir. Literatürde genellikle çok amaçlı optimizasyon problemlerinin performans değerlendirmelerinde, HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümünün hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi nedeniyle, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi performans ölçütlerine göre daha öncelikli olarak tercih edilmektedir (Riquelme vd., 2015). Dağılım (SP), sadece çözüm setinin pareto cephesi üzerindeki homojen dağılımını değerlendirir. HV ise hem optimal çözüme yakınlık hem de çeşitlilik hakkında bilgi verir yani çözüm setinin ne kadar geniş bir alanı kapladığını gösterir. Ortalama ideal mesafe ise sadece çözümlerin ideal noktaya olan ortalama uzaklığına odaklanır. Yani çözümler ideal noktaya ne kadar yakınsa MID o kadar düşük olur, çeşitlilik veya yayılım bu metriği etkilemez. Sonuçlar incelendiğinde, güçlendirilmiş pareto

yöntemi ile geliştirilen tüm algoritmalar %75 daha az fonksiyon değerlendirmesine rağmen tüm metriklerde MOSGO algoritmasına göre daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Tablo 10. 29 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

Algoritmalar	NFE	HV	SP	MID
SPRAO1	10000	1,000	0,3062	0,7504
SPWOA	10000	0,998	0,3048	0,7507
SPRAO2	10000	0,996	0,3154	0,7469
SPGWO	10000	0,994	0,3330	0,7163
MOSGO	40000	0,992	0,3359	0,9196
NDSIIRAO2	10000	0,979	0,3288	0,7532
NDSIIRAO1	10000	0,958	0,3785	0,7771
NDSIIWOA	10000	0,930	0,6655	0,7826
NDSIIGWO	10000	0,914	0,8464	0,7390



Şekil 29. 29 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.2.3. 69 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemi

Ofis binası inşaatında 69 aktivite içeren zaman-maliyet ödünleşim problemi ilk olarak Tran (2020) tarafından incelenmiştir. Bu projede, bir bodrum katı ve altı katlı toplam 12.870 metrekarelik bir ofis binasının inşası ele alınmıştır. Projedeki aktiviteler, temel ve yapısal aşamalardan oluşmakta ve her bir aktivite için farklı süre ve maliyet seçenekleri sunulmaktadır. Tran (2020) çalışmasında bu problemi çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak ele almış ve bu amaçla 200 popülasyon ve 250 iterasyon kullanarak çok amaçlı sosyal grup optimizasyonu (MOSGO) algoritmasını geliştirmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen SPRao-1, SPRao-2, SPGWO, SPWOA, NDSIIRao-1, NDSIIRao-2, NDSIIGWO ve NDSIIWOA algoritmalarının popülasyon sayısı 100, iterasyon sayısı 500 olacak şekilde belirlenmiştir. Literatürde kullanılan MOSGO algoritması ile kıyaslandığında, %50 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile analiz yapılmış ve performans artırılması hedeflenmiştir. Orijinal çalışmada olduğu gibi, MOSGO algoritması 200 popülasyon ve 250 iterasyonla yeniden değerlendirilmiştir.

69 aktiviteli problem, her bir faaliyetin farklı süre ve maliyet opsiyonlarıyla birlikte toplamda 2,06755E+26 proje tamamlanma opsiyonu sunmaktadır. Probleme ait zaman-maliyet opsiyonları Tablo 11'de gösterilmektedir.

Tablo 11. 69 aktiviteye ait zaman-maliyet opsiyonları

No	Öncülük ilişkileri	Zaman opsiyonları			Maliyet Opsiyonları		
		T1	T2	T3	C1	C2	C3
1		1			96		
2	1	7			3022		
3	1	7	6	5	3140	3187	3266
4	1	7	6	5	3316	3366	3449
5	2FS+3	10			450		
6	5	3	2		564	578	
7	6	7	6	5	731	749	768
8	44FS+30	7			731		
9	46SS-15	10	8	7	401	411	421
10	44FS+45	8	7	6	401	411	421
11	34	80	73	72	800	820	840
12	44FS+30	14			800		
13	1	9	8	7	149	153	156
14	13	3	2		800	820	
15	14	4	3	2	37	38	39
16	15	7	6	5	11	11	12
17	16FS-2	7	6	5	1017	1042	1068
18	17FS-3	7	6	5	58	59	61
19	18FF+1	3	2		585	600	
20	19	2			19		

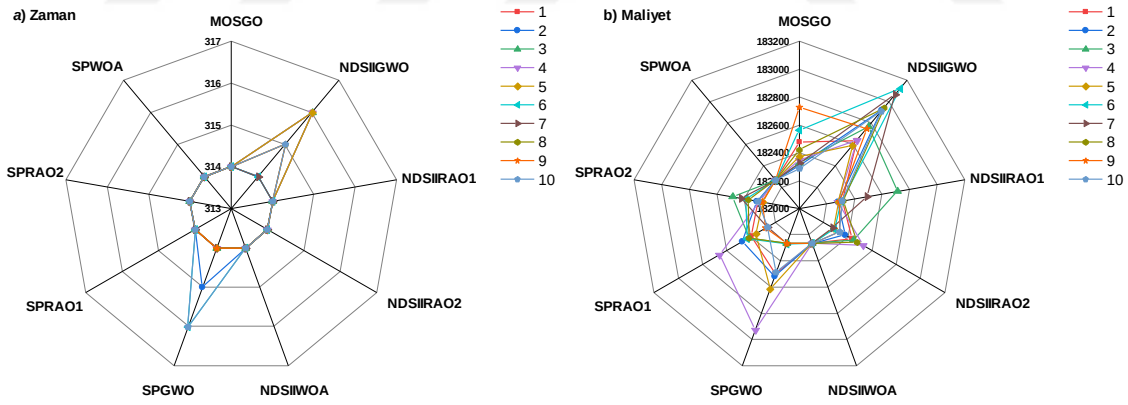
Tablo 11'in devamı

21	20	3			50		
22	26	2	1		290	297	
23	22	3			403		
24	22	3	2		130	133	
25	24	1			327		
26	14	36	32	30	1809	1863	1927
27	26FS+7	39	35	33	2010	2070	2141
28	26	33	29	27	1802	1856	1919
29	27	28	24	22	926	954	986
30	25;28	35	33	31	3087	3195	3303
31	27	35	33	31	3087	3195	3303
32	30	10	8	7	2657	2750	2843
33	31	10	8	7	2657	2750	2843
34	32	10	8	7	2657	2750	2843
35	33	10	8	7	2657	2750	2843
36	34	10	8	7	2657	2750	2843
37	35	10	8	7	2657	2750	2843
38	36	10	8	7	2657	2750	2843
39	37	10	8	7	2657	2750	2843
40	38	10	8	7	2657	2750	2843
41	39	10	8	7	2657	2750	2843
42	40	10	8	7	2657	2750	2843
43	41	10	9	8	2657	2750	2843
44	43FS-5	10	8	7	2608	2699	2791
45	44FS+5	70	67	65	200	205	210
46	37FF	14	11	10	395	405	415
47	46FS+10	10	8	7	549	563	576
48	37	153	146	143	7663	7855	8046
49	39	139	133	129	7932	8130	8329
50	41	132	126	123	8206	8411	8616
51	43	125	119	117	8206	8411	8616
52	44	118	111	108	8206	8411	8616
53	52SS+7	111	105	101	8206	8411	8616
54	53SS+7	91	86	84	2129	2182	2235
55	54	60			9779		
56	59SS	30	27	25	10779	10941	11210
57	56SS+15	20	17	15	4779	4851	4970
58	57	20	18	15	1779	1823	1868
59	8;12	57			200		
60	46FS+30	64	63	60	467	483	500
61	60	30	28	26	1817	1862	1908
62	30	50	46	44	16107	16349	16751
63	62FS-10	80	75	73	2883	2955	3027
64	63SS	50			1375		
65	63SS	60	56	54	713	731	749
66	65SS	100	96	94	11595	11769	12059
67	65FS-10	50	46	44	912	935	958
68	64SS	60	56	54	572	586	601
69	68SS+15	60	55	54	1275	1307	1339

Şekil 30'da on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri gösterilmektedir. NDSIIGWO ve SPGWO algoritmaları, minimum zamanı bulma

konusunda benzer sonuçlar elde etmiştir fakat her iki algoritmada da zaman değerlerinde belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, algoritmaların optimizasyon sürecinde istikrarlı sonuçlar üretemediğine işaret etmektedir. Maliyet açısından incelendiğinde, NDSIIGWO algoritmasına kıyasla, SPGWO'nun maliyet grafiğinde daha az dalgalanma olduğu ve maliyet değerlerinin daha sabit kaldığı görülmekte, bu da maliyet optimizasyonunda SPGWO'nun daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Rao-2 algoritmasına bakıldığında, güçlendirilmiş pareto yöntemi (SP) ile geliştirilen versiyonun, NDSIIRAO2 algoritmasına kıyasla maliyet açısından tüm bağımsız çözümlerde daha istikrarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Rao-1 algoritmasında ise her iki optimizasyon operatöründe de minimum maliyeti bulma konusunda belirgin dalgalanmalar gözlenmektedir. WOA algoritması hem SP hem de NDSII operatörleri ile geliştirildiğinde, tüm bağımsız çözümlerde minimum maliyet ve zamanı bulmada etkili olmuştur. Tran (2020) tarafından önerilen MOSGO algoritması ise bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmalara kıyasla %100 daha fazla fonksiyon değerlendirmesi kullanmasına rağmen, minimum maliyet bulma konusunda WOA algoritmalarına göre daha rastgele bir davranış sergilemiştir.



Şekil 30. 69 aktiviteli TCTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri

Her bir bağımsız çözüm neticesinde algoritmaların ürettiği Pareto çözümlerinin en iyi zaman, maliyet ve dengeli çözümler açısından kıyaslanabilmesi için bir önceki bölümde bahsedildiği gibi en yüksek HV değerlerine sahip bağımsız çözüm seçilmiştir. Tablo 12'de, gri kurt algoritması ve balina algoritmalarının 69 aktivite içeren çok amaçlı TCTP optimizasyon problemi için SP ve NDSII yöntemleriyle elde edilen Pareto çözümleri

gösterilmektedir. GWO algoritmasına bakıldığında, minimum maliyet ve zamanı bulmada SPGWO algoritmasının NDSIIGWO'ya kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Minimum maliyet ve zaman için elde edilen pareto çözümleri incelendiğinde birbirlerini göre baskınlık kuramazlarken, dengeli çözümler açısından incelendiğinde SPGWO algoritmasının ürettiği çözümlerin NDSIIGWO'nun çözümlerini domine ettiği gözlemlenmektedir. SPWOA ve NDSIIWOA algoritmalarının elde ettiği minimum süreler aynı olmasına karşın, SPWOA algoritması tarafından üretilen ilk üç Pareto çözümünün, NDSIIWOA'ya kıyasla maliyet açısından daha üstün olduğu görülmektedir. Minimum maliyet odaklı çözümler açısından her iki algoritmanın da aynı sonuçları ürettiği gözlemlenmiştir. Dengeli çözümler açısından bakıldığındaysa SPWOA algoritması tarafından üretilen çözümlerin NDSIIWOA'ya göre daha baskın olduğu Tablo 12'de görülmektedir. Bu sonuçlar, her ne kadar aynı algoritma kullanılsa da optimizasyon sürecinde çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin süreç üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

Tablo 12. 69 aktiviteli problem için GWO ve WOA algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	NDSIIGWO		SPGWO		NDSIIWOA		SPWOA	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Min. Zaman	316	184060	314	184162	314	184866	314	184162
2		317	183935	315	184069	315	184831	315	184069
3		318	183812	316	183976	316	184056	316	183976
4	Min. Maliyet	343	182590	360	182265	360	182265	360	182265
5		341	182641	359	182269	359	182269	359	182269
6		340	182686	358	182272	358	182272	358	182272
7	Dengeli	329	183132	329	183090	329	183205	329	183105
8		330	183053	330	183017	330	183122	330	183017
9		331	183045	331	182997	331	183049	331	182997

Tablo 13'te, NDSIIRAO1, SPRAO1, NDSIIRAO2 ve SPRAO2 algoritmalarının zaman ve maliyet açısından ürettikleri çözümlerin karşılaştırmalı sonuçları sunulmaktadır. Rao-1 algoritmasında zaman odaklı çözümler incelendiğinde, her iki algoritma benzer süreler elde etmiş olsa da SPRAO1 algoritması maliyet açısından daha baskın sonuçlar verdiği Tablo 13'te görülmektedir. Dengeli çözümlere bakıldığında, SPRAO1 algoritmasının, NDSIIRAO1 algoritmasının çözümlerine göre daha baskın olduğu görülmektedir. Benzer durum, NDSIIRAO2 ve SPRAO2 arasında da gözlemlenmiştir.

SPRAO2 algoritması tarafından üretilen çözümlere bakıldığında NDSIIRAO2 tarafından üretilen çözümlere göre neredeyse tüm çözümlerde daha baskın gelmiştir.

Tablo 13. 69 aktiviteli problem için Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	NDSIIRAO1		SPRAO1		NDSIIRAO2		SPRAO2	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Min. Zaman	314	184203	314	184167	314	184164	314	184162
2		315	184103	315	184074	315	184071	315	184069
3		316	184011	316	183981	316	183978	316	183976
4	Min. Maliyet	360	182279	358	182277	358	182274	358	182272
5		359	182283	357	182297	357	182294	357	182292
6		358	182286	353	182330	353	182327	353	182325
7	Dengeli	329	183127	329	183095	329	183093	329	183090
8		330	183076	330	183022	330	183022	330	183017
9		331	183041	331	183002	331	183000	331	182997

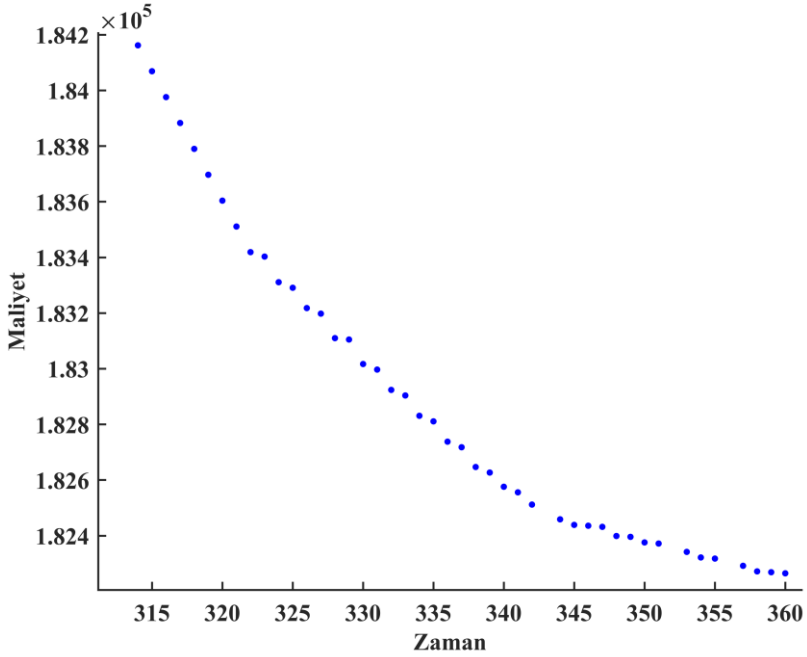
Tablo 14’te, SPWOA ve SPRAO2 algoritmaları tarafından üretilen Pareto çözümlerinin, MOSGO algoritması tarafından üretilen Pareto çözümleri ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Tran (2020) yaptığı çalışmada minimum zamanı 182 olarak belirtmesine rağmen, 69 aktiviteli problemdeki opsiyonlarda yer alan minimum zamanlar alınarak MS Project ve Matlab’da ayrı ayrı test edilmiş, ancak yapılan kontroller sonucunda elde edilen minimum süre 314 olarak bulunmuştur. Ayrıca problem daha sonra, Hunyh vd. (2021) tarafından zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi ve Pham vd. (2024) tarafından direkt olmayan maliyetler kullanılarak zaman-maliyet ödünleşim problemi olarak ele alınmış ve her iki çalışmada da minimum zaman 314 olarak bulunmuştur. Tran (2020)’a ait çalışmada önerilen opsiyonlara bakıldığında maliyet değerleri ile tutarlı olmasına rağmen zaman değerlerinde yanlışlık bulunmaktadır. Tran (2020) çalışmasında önerdiği opsiyon değerlerine göre üretilen pareto çözümleri tekrar hesaplanılarak Tablo 14’te gösterilmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmaların ürettiği pareto çözümleri, bu tez kapsamında yeniden üretilen MOSGO algoritması ile karşılaştırılmıştır. MOSGO algoritması tarafından üretilen çözümlerden tamamı, SPWOA veya SPRAO2 algoritmaları tarafından domine edildiği görülmektedir.

Tablo 14. 29 aktiviteli problem için MOSGO ve en iyi algoritmaların pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	MOSGO (2020)		MOSGO*		SPWOA		SPRAO2	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Zamana göre	345	182760	314	184164	314	184162	314	184162
2		347	182689	315	184071	315	184069	315	184069
3		-	-	316	183978	316	183976	316	183976
4	Maliyete göre	360	182265	359	182287	360	182265	358	182272
5		360	182293	358	182291	359	182269	357	182292
6		-	-	357	182294	358	182272	353	182325
7	Dengeli	354	182411	329	183109	329	183105	329	183090
8		354	182383	330	183019	330	183017	330	183017
9		-	-	331	183016	331	182997	331	182997

*Bu çalışma

Bir sonraki bölümde performans incelemelerinde görülebileceği gibi, SPWOA algoritması HV açısından en iyi sonucu verdiği için, bu çalışma kapsamında elde ettiği minimum zaman ve maliyet çözümlerine ait kullanılan modlar Tablo 15'te gösterilmiştir. Ayrıca SPWOA algoritması tarafından elde edilen pareto çözümleri Şekil 31'de sunulmaktadır.



Şekil 31. SPWOA tarafından üretilmiş 69 aktivite zaman-maliyet pareto grafiği

Tablo 15. 69 aktivite için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

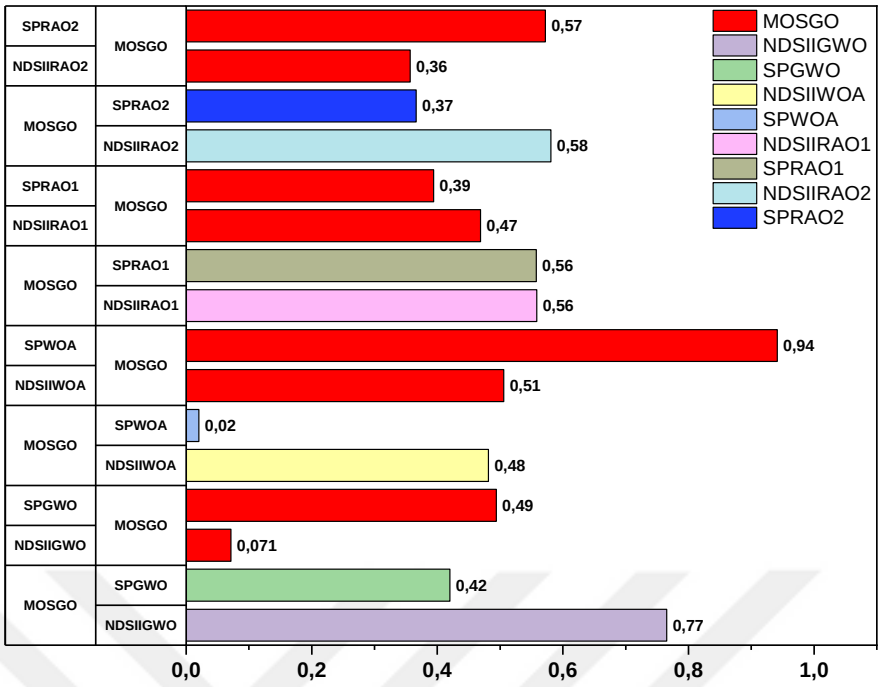
	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z.	M.
Min. Zaman	1	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,3,1,3,1,3 ,1,3,1,3,1,3,1,3,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	314	184162
	2	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,3,1,3,1,3 ,1,2,1,3,1,3,1,3,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	315	184069
	3	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,3,1,3,1,3 ,1,3,1,3,1,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	316	183976
Min. Maliyet	4	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,

Tablo 16. 69 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

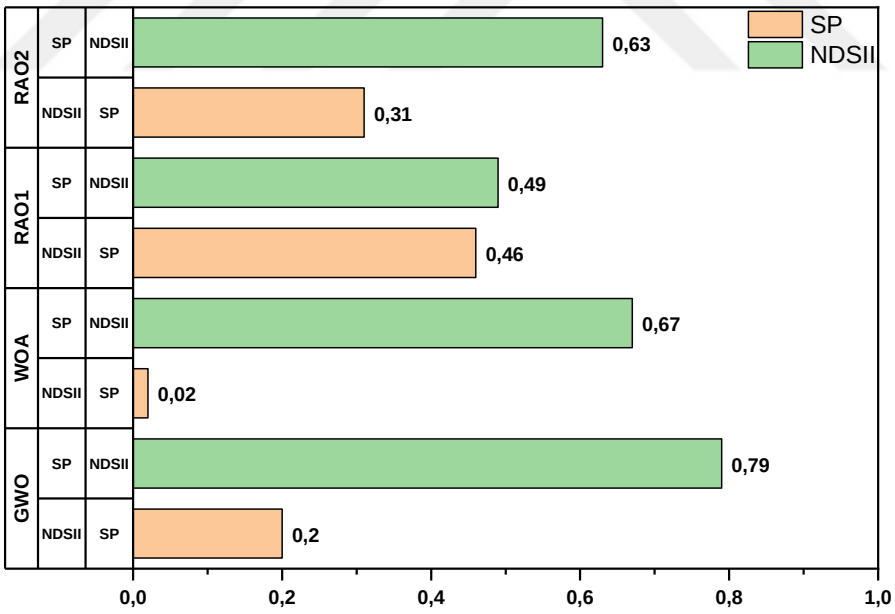
	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MOSGO, NDSIIGWO)	1,0000	0,0200	0,7653	0,3626
C(NDSIIGWO, MOSGO)	0,5400	0,0000	0,0711	0,1521
C(MOSGO,SPGWO)	1,0000	0,0000	0,4202	0,4512
C(SPGWO, MOSGO)	1,0000	0,0000	0,4939	0,4345
C(MOSGO, NDSIIWOA)	0,7300	0,2300	0,4815	0,1111
C(NDSIIWOA, MOSGO)	0,9350	0,4300	0,5059	0,1114
C(MOSGO, SPWOA)	0,1200	0,0000	0,0202	0,0288
C(SPWOA, MOSGO)	1,0000	0,4700	0,9415	0,1562
C(MOSGO, NDSIIRAO1)	1,0000	0,0000	0,5585	0,3128
C(NDSIIRAO1, MOSGO)	1,0000	0,0000	0,4689	0,3494
C(MOSGO, SPRAO1)	1,0000	0,0000	0,5578	0,4415
C(SPRAO1, MOSGO)	1,0000	0,0000	0,3942	0,4220
C(MOSGO, NDSIIRAO2)	1,0000	0,0000	0,5808	0,3616
C(NDSIIRAO2, MOSGO)	1,0000	0,0000	0,3567	0,3526
C(MOSGO, SPRAO2)	1,0000	0,0000	0,3663	0,4204
C(SPRAO2, MOSGO)	1,0000	0,0000	0,5720	0,4076

Tablo 16'da belirtilen ortalama C-metrik değerlerinin grafiksel olarak sunumu, Şekil 32'de gösterilmiştir. Şekilde, her bir satırda yer alan algoritma çiftleri ve karşılarında yer alan sütunlar, ilgili algoritmalar arasındaki karşılaştırmayı ifade etmektedir. Örneğin, Şekil 32'de SPRAO2 algoritmasının, MOSGO algoritması üzerindeki çözümlerini baskılama düzeyi 0.572 (%57) olarak gösterilmektedir.

Şekil 33'te, SP ve NDSII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak oluşturulan algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin karşılaştırması sunulmaktadır. Şekilde açıkça görüldüğü gibi, NDSII tabanlı GWO algoritması, SP ile geliştirilen versiyonuna göre ortalama %20'sini domine ederken, SPGWO algoritması NDSIIGWO'nun ürettiği çözümlerin %79'unu baskılamaktadır. Benzer şekilde, NDSII tabanlı WOA algoritması, SP ile geliştirilen versiyonun yalnızca %2'sini domine ederken, SPWOA algoritması NDSIIWOA çözümlerinin %67'sini baskılamaktadır. Rao-1 algoritmasında, NDSII ve SP ile üretilen çözümler birbirine yakın sonuçlar elde etmiştir. Ancak, Rao-2'de diğer algoritmalarda olduğu gibi, SP ile geliştirilen versiyonun, NDSII versiyonuna kıyasla daha baskın olduğu açıkça görülmektedir.



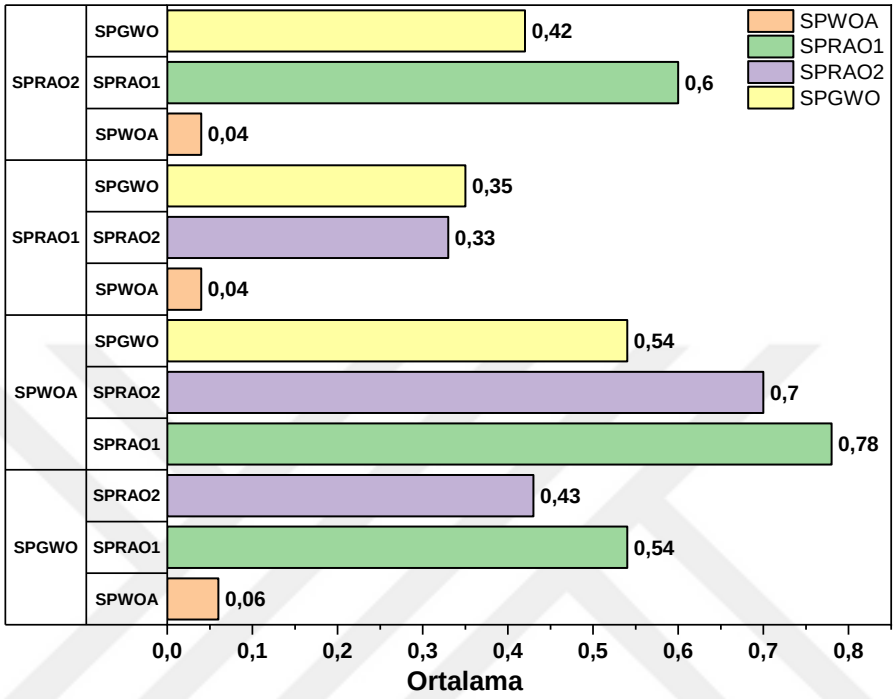
Şekil 32. 69 aktivite zaman-maliyet problemi için geliştirilen algoritmaların C-metrik kullanılarak MOSGO algoritması ile performans karşılaştırması



Şekil 33. 69 aktivite zaman-maliyet problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

Şekil 33'den görüldüğü gibi, her bir algoritma için C-metrik kıyaslaması yapıldığında, güçlendirilmiş Pareto yöntemi ile geliştirilen algoritmaların, NDSII ile geliştirilen algoritmalara göre üstün sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu nedenle, Şekil 34'te her bir

algoritmaya ait en iyi Pareto sonuçlarını veren versiyonların birbiriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Güçlendirilmiş pareto operatörü ile geliştirilen WOA algoritmasının diğer algoritmalara göre üstün sonuçlar verdiği Şekil 34'de görülebilmektedir.



Şekil 34. 69 aktivite zaman-maliyet problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi sadece C-metrik performans ölçütüne göre değerlendirmek, algoritmaların performanslarının ölçülmesi için doğru değildir. Çünkü üretilen çözümler belirli bir bölgeye toplanarak, diğer algoritma tarafından üretilen çözümlere karşı üstünlük sağlayabilir. Bunu daha detaylı anlayabilmek için üretilen çözümlerin pareto içinde dağılımına, çeşitliliğine ve daha fazla alan kapsayarak kalitesine bakılması gerektiği literatürde belirtilmektedir.

Tablo 17'de hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 17. 69 aktivite TCTP için algoritmalara ait HV,SP ve MID performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Değer Tipi	MOSGO	NDSIIGWO	NDSIIRAO1	NDSIIRAO2	NDSIIWOA	SPGWO	SPRAO1	SPRAO2	SPWOA
Hiper Hacim (HV)	En İyi	0,9921	0,8899	0,9843	0,9953	0,9654	0,9994	1	1	0,9989
	En Kötü	0,8553	0,6146	0,87	0,8637	0,8795	0,7075	0,8432	0,8324	0,9957
	Ort.	0,9468	0,7451	0,935	0,9353	0,9372	0,9087	0,9303	0,9606	0,9973
	Std.	0,0435	0,0885	0,0401	0,0441	0,0251	0,1075	0,0612	0,0499	0,0009
Yayılım (SP)	En İyi	0,4182	0,9225	0,4985	0,5442	0,6676	0,6758	0,593	0,6147	0,697
	En Kötü	0,8616	1,0844	0,8303	0,81	1,0394	1,0113	0,8791	0,8673	0,7333
	Ort.	0,6755	0,9869	0,6637	0,6883	0,7944	0,8164	0,7293	0,7210	0,7145
	Std.	0,1471	0,0552	0,0952	0,0755	0,1125	0,1428	0,0926	0,0899	0,012
Ortalama İdeal Mesafe (MID)	En İyi	0,9372	0,7982	0,7678	0,7428	0,7623	0,793	0,7633	0,7524	0,7142
	En Kötü	0,8123	0,6485	0,6708	0,6672	0,713	0,6639	0,6718	0,6583	0,6977
	Ort.	0,8961	0,7206	0,7231	0,7183	0,7342	0,7108	0,7159	0,7073	0,7071
	Std.	0,0463	0,0512	0,0292	0,0248	0,0167	0,0396	0,0317	0,0277	0,0042

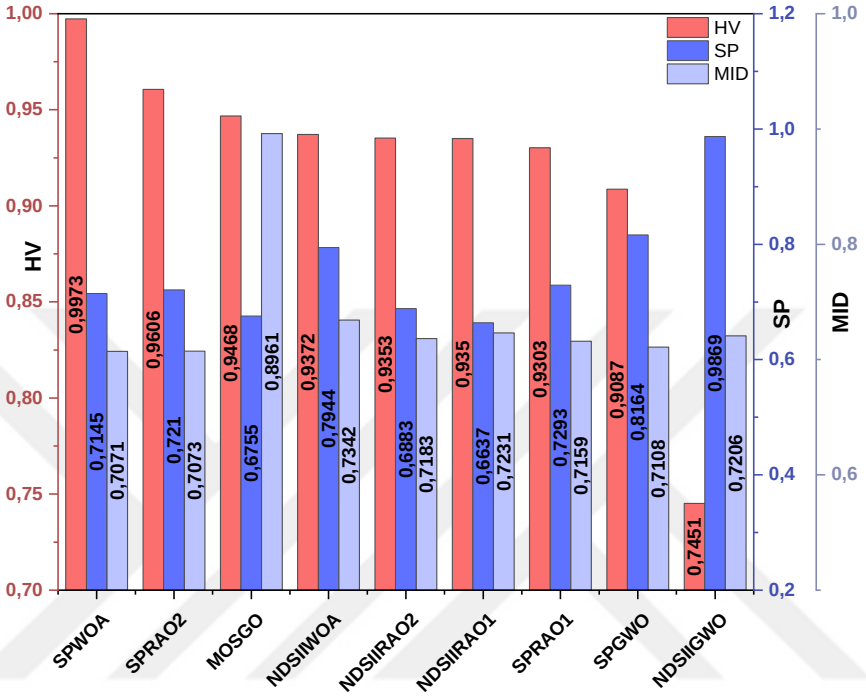
Tablo 18'de performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmaktadır. Tablo 18'de yer alan performans ölçümlerine ait ortalama değerler, Şekil 35'te grafiksel olarak sunulmaktadır. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında, en iyi sonucun NDSIIRAO1 algoritması tarafından elde edildiği görülmektedir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından ise SPWOA algoritmasının Pareto çözümlerinin daha iyi performans sergilediği anlaşılmaktadır. Bu bulgular, her algoritmanın belirli açılardan diğerlerine göre üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bir önceki bölümde de belirtildiği gibi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin performans değerlendirmelerinde HV ölçütü, üretilen Pareto çözümünün hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi nedeniyle yayılım (SP) ve MID gibi ölçütlere göre daha öncelikli olarak tercih edilmektedir. Güçlendirilmiş Pareto yöntemiyle geliştirilen WOA ve RAO2 algoritmaları, %50 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle HV ve MID performanslarında MOSGO algoritmasına kıyasla daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Tablo 18. 69 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

Algoritmalar	NFE	HV	SP	MID
SPWOA	50000	0,9973	0,7145	0,7071
SPRAO2	50000	0,9606	0,7210	0,7073
MOSGO	100000	0,9468	0,6755	0,8961
NDSIIWOA	50000	0,9372	0,7944	0,7342
NDSIIRAO2	50000	0,9353	0,6883	0,7183

Tablo 18'in devamı

NDSIIRAO1	50000	0,9350	0,6637	0,7231
SPRAO1	50000	0,9303	0,7293	0,7159
SPGWO	50000	0,9087	0,8164	0,7108
NDSIIGWO	50000	0,7451	0,9869	0,7206



Şekil 35. 69 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.2.5. 290 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Ödünleşim Problemi

Bu çalışma kapsamında, çok amaçlı optimizasyonda kullanılan operatörlerin küçük ve orta ölçekli zaman-maliyet problemlerinin yanı sıra büyük ölçekli inşaat projelerine olan etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla, 29 aktiviteli bir zaman-maliyet problemi, 10 kat artırılarak 290 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Problem kapsamında, 290 faaliyetin her biri için belirli süre ve maliyet alternatifleri sunulmaktadır. 290 aktiviteli zaman-maliyet problemi, toplamda 1,4873E+99 farklı proje tamamlanma kombinasyonu içermektedir. Zaman ve maliyet opsiyonları Tablo 19'de kısmi olacak şekilde gösterilmiştir.

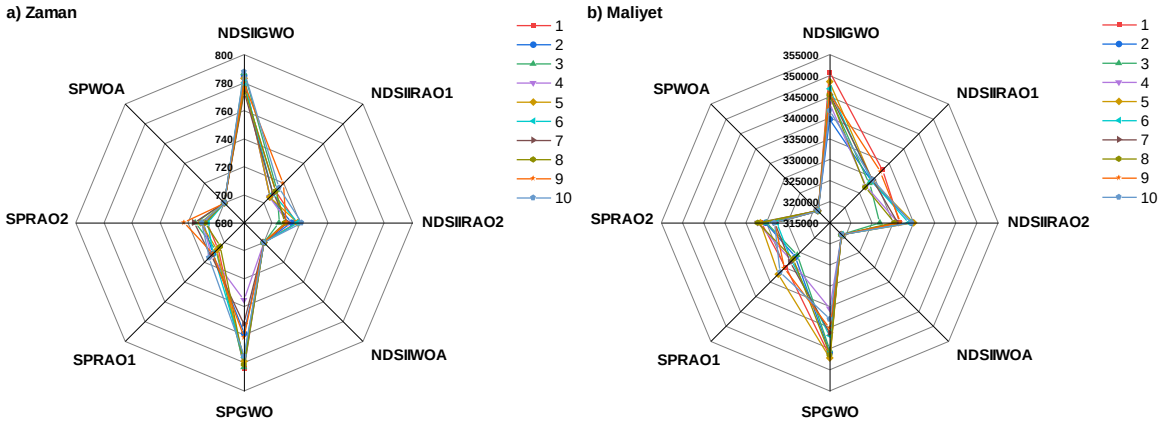
Tablo 19. 290 Aktivite Zaman-maliyet opsiyonları

No	Öncülük ilişkileri	Zaman opsiyonları			Maliyet Opsiyonları		
		T1	T2	T3	C1	C2	C3
1		5	4		2030	2300	
2	1FS-3	8	7	6	1020	1280	1510
3	1;2	8	7	6	1700	1850	2090
4	3	4	3		590	730	
5	4SS+1	2			90		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	29FS	5	4		2030	2300	
31	3;7	7	6	5	1490	1650	1830
32	4;8	4	3		520	750	
33	5;9FF+1	2			90		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
145	144	1			50		
146	145	5	4		2030	2300	
147	146FS-3	8	7	6	1020	1280	1510
148	146;147	8	7	6	1700	1850	2090
149	148	4	3		590	730	
150	149SS+1	2			90		
151	146	4	3		910	1100	
152	147;151FS-1	2			250		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
284	283FS-9	14	12	11	2220	2510	2690
285	284SS+6	3			230		
286	284FS-4	6	5	4	1590	1790	1990
287	286SS+4	10	9	8	2630	2930	3240
288	287	8	7	6	2060	2450	2660
289	288FS-3	10	9	8	320	440	610
290	289	1			50		

290 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet optimizasyon problemine ait on bağımsız çözüm neticesinde elde edilen minimum değerler Şekil 36'da gösterilmektedir. SPGWO'nun NDSIIGWO algoritmasına göre hem minimum zamana hem de maliyete yaklaşmada daha iyi sonuçlar verdiği, ancak her iki algoritmada bağımsız çözümlerinde belirgin dalgalanmalar görülmektedir. Güçlendirilmiş Pareto yöntemi (SP) ile geliştirilen Rao-2 algoritması, NDSIIRAO2'ye kıyasla maliyet optimizasyonunda tüm bağımsız çözümlerde daha istikrarlı sonuçlar üretmiştir. Optimum zamana ulaşma açısından ise her iki algoritmanın benzer performans gösterdiği ve tutarlı çözümler sunduğu gözlemlenmektedir. Rao-1 algoritması incelendiğinde hem NDSIIRAO1 hem de SPRAO1'in zaman optimizasyonunda tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak maliyet optimizasyonunda her iki algoritmada da belirgin dalgalanmalar gözlenmiştir. WOA tabanlı algoritmalar hem

SP hem de NDSII operatörleri ile geliştirildiğinde, tüm bağımsız çözümlerde minimum maliyet ve zamanı bulmada etkili olmuştur. Algoritmaların genel performansı değerlendirildiğinde, SP operatörü ile geliştirilen algoritmaların (SPGWO, SPRAO1, SPRAO2, SPWOA), NDSII operatörü ile geliştirilen algoritmalara göre daha tutarlı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir

Algoritmaların her bir bağımsız çözüm sonucunda ürettiği Pareto çözümlerini zaman, maliyet ve dengeli çözümler açısından kıyaslamak için, önceki bölümde belirtildiği gibi en yüksek HV değerine sahip bağımsız çözüm seçilmiştir. Tablo 20'de gri kurt algoritması ve balina algoritmalarının 290 aktivite içeren çok amaçlı TCTP optimizasyon problemi için SP ve NDSII yöntemleriyle elde edilen Pareto çözümleri gösterilmektedir. GWO algoritması incelendiğinde, minimum maliyet ve zaman pareto çözümlerinin elde edilmesinde SPGWO algoritmasının, NDSIIGWO algoritmasından daha başarılı olduğu görülmektedir. NDSIIGWO'nun ürettiği (1, 2, 4, 5, 6, 8, 9) çözümler, SPGWO tarafından baskılanmıştır. SPWOA ve NDSIIWOA algoritmalarının elde ettiği minimum süreler aynı olsa da SPWOA algoritmasının ürettiği ilk üç pareto çözümünün, maliyet açısından NDSIIWOA algoritmasının çözümlerinden daha üstün olduğu tespit edilmiştir. Minimum maliyete göre elde edilen çözümler incelendiğinde her iki algoritmada aynı sonuçları üretmiştir. Dengeli çözümler incelendiğinde ise SPWOA tarafından üretilen çözümlerin NDSIIWOA algoritmasına göre daha baskın olduğu Tablo 20'de görülebilmektedir.



Şekil 36. 290 aktiviteli TCTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman ve maliyet değerleri

Tablo 20. 290 aktiviteli problem için GWO ve WOA algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	NDSIIGWO		SPGWO		NDSIIWOA		SPWOA	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Min. Zaman	785	354420	735	355900	700	404060	700	390560
2		787	354340	736	354220	701	403110	701	389500
3		788	354110	738	354140	702	398160	702	388150
4	Min. Maliyet	835	339640	844	335410	930	318900	930	318900
5		829	340150	840	335800	927	319140	926	319300
6		825	340300	839	335950	925	319400	921	319620
7	Dengeli	814	342520	815	339540	813	349440	813	341610
8		815	342370	816	339140	820	347090	815	340960
9		816	342210	820	338530	822	343260	821	340300

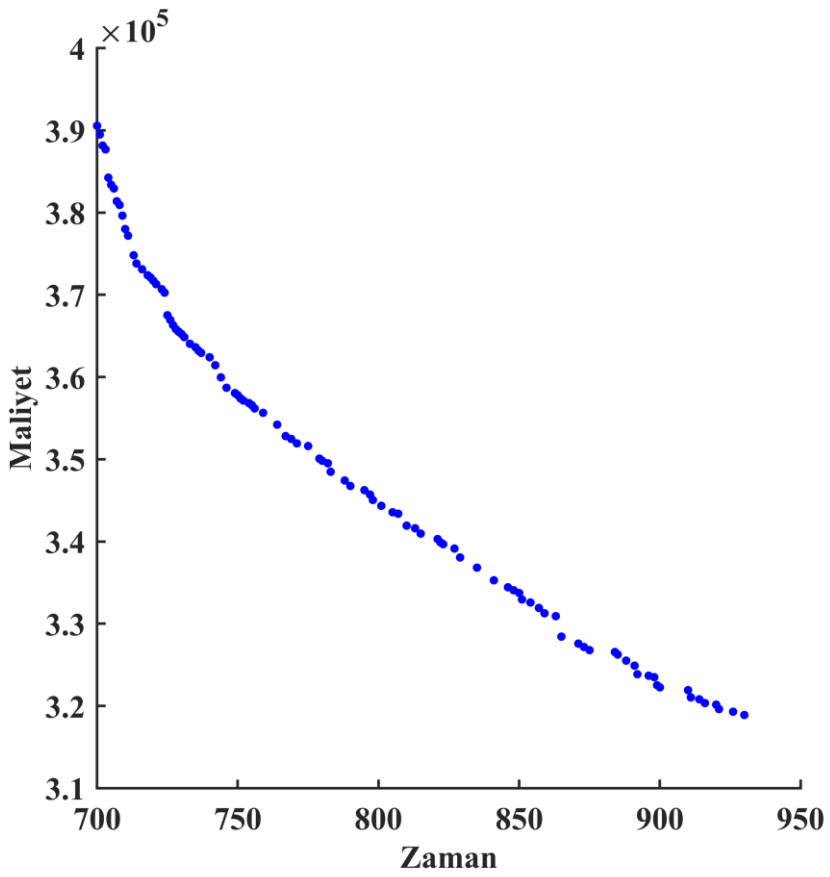
Tablo 21'de, NDSIIRAO1, SPRAO1, NDSIIRAO2 ve SPRAO2 algoritmalarının zaman ve maliyet açısından ürettikleri pareto çözümlerinin karşılaştırmalı sonuçları sunulmaktadır. Rao-1 algoritması incelediğinde, SPRAO1 algoritması zaman ve maliyet açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Dengeli çözümlere bakıldığında da SPRAO1 algoritmasının, NDSIIRAO1 algoritmasının ürettiği 8. ve 9. çözüme göre daha baskın olduğu görülmektedir. Rao-2 algoritması incelendiğinde, zaman odaklı pareto çözümlerinde NDSII çok amaçlı seçme ve eleme operatörünü kullanan algoritmanın, güçlendirilmiş Pareto yöntemine göre daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Ancak, maliyet ve dengeli çözümler açısından bu durum tersine dönmüş ve SP yöntemini kullanan Rao-2 algoritmasının NDSII'nin çözümleri üzerinde baskın olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 21. 290 aktiviteli TCTP için RAO1 ve RAO2 algoritmalarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

Çöz.	Çözüm Setleri	NDSIIRAO1		SPRAO1		NDSIIRAO1		SPRAO2	
		Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet	Zaman	Maliyet
1	Min. Zaman	712	373080	711	374740	711	370040	716	375190
2		714	372630	712	374300	712	369290	717	374750
3		715	372480	713	373020	713	369250	718	373940
4	Min. Maliyet	910	327080	918	325890	896	331090	892	327960
5		909	327620	916	326070	893	331560	891	328340
6		906	327680	915	326270	892	331710	888	328430
7	Dengeli	812	345090	814	343090	812	344590	811	342800
8		816	344760	815	342650	816	344160	812	341990
9		820	344120	818	341990	820	343250	816	341020

Tablo 20 ve Tablo 21'de algoritmalara ait Pareto çözümleri incelendiğinde, SPWOA algoritmasının maliyet ve zaman odaklı çözümler açısından diğer algoritmalara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Dengeli çözümler sağlama konusunda ise GWO algoritması, WOA algoritmasına göre daha başarılı bulunmuştur. Bu durum, GWO algoritmasının uç noktalardan ziyade orta bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Öte yandan, Rao-1 ve Rao-2 algoritmaları tarafından üretilen çözümler, dengeli çözümler açısından WOA algoritmasının gerisinde kalmıştır.

Bir sonraki bölümde ele alınacak performans analizlerinde görüleceği gibi, HV değeri açısından en başarılı olan SPWOA algoritmasının minimum zaman ve maliyet çözümlerine ait kullanılan modlar Tablo 22'de elde edilen pareto çözümleri ise Şekil 37'de gösterilmektedir.



Şekil 37. SPWOA tarafından üretilmiş 290 aktivite zaman-maliyet pareto grafiği

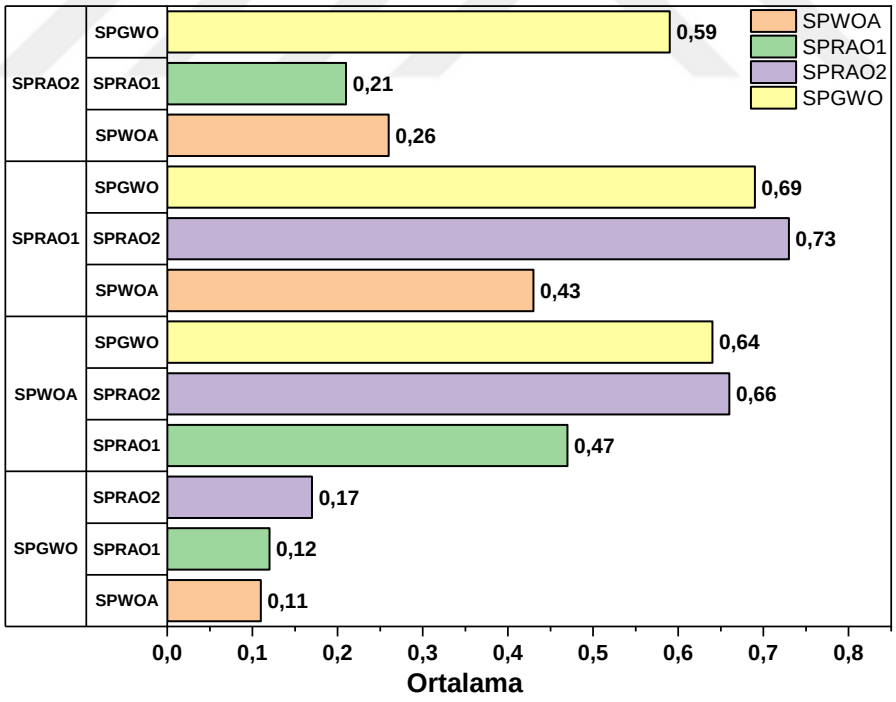
Tablo 22. 290 Aktivite için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z.	M.
Minimum Zaman	1	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,3,2,3,1,3,2,3,2,2,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,2,1,2,1,3,3,2,3,2,2,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,2,2,1,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,2,3,2,1,3,1,1,2,2,3,3,3,1,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,2,3,2,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,1,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,2,2,3,2,3,2,1,2,3,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,2,1,2,3,1,3,2,3,2,2,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,2,1,3,2,1,3,2,3,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,3,2,3,3,1,3,2,2,3,3,3,1,1,3,3,3,1	700	390560
Minimum Maliyet	2	1,1,1,1,1,

Tablo 23. 290 aktivite zaman-maliyet problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(NDSIIGWO,SPGWO)	1,0000	0,0000	0,4061	0,4223
C(SPGWO,NDSIIGWO)	1,0000	0,0000	0,5983	0,4315
C(NDSIIWOA,SPWOA)	0,2500	0,0000	0,0481	0,0467
C(SPWOA,NDSIIWOA)	0,9800	0,6300	0,8663	0,0767
C(NDSIIRAO1,SPRAO1)	0,4500	0,0000	0,1123	0,1124
C(SPRAO1,NDSIIRAO1)	1,0000	0,4700	0,8451	0,1343
C(NDSIIRAO2,SPRAO2)	0,9200	0,0000	0,2469	0,2320
C(SPRAO2,NDSIIRAO2)	1,0000	0,0800	0,6928	0,2577

Tablo 24'te, NDSII ve SP çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile üretilen algoritmalara ait hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe değerleri sunulmaktadır. Bu değerler, her algoritmanın on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle birlikte verilmiştir.



Şekil 38. 290 aktivite zaman-maliyet problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 24. 290 aktivite için algoritmalara ait HV,SP ve MID performans ölçütleri karşılaştırması

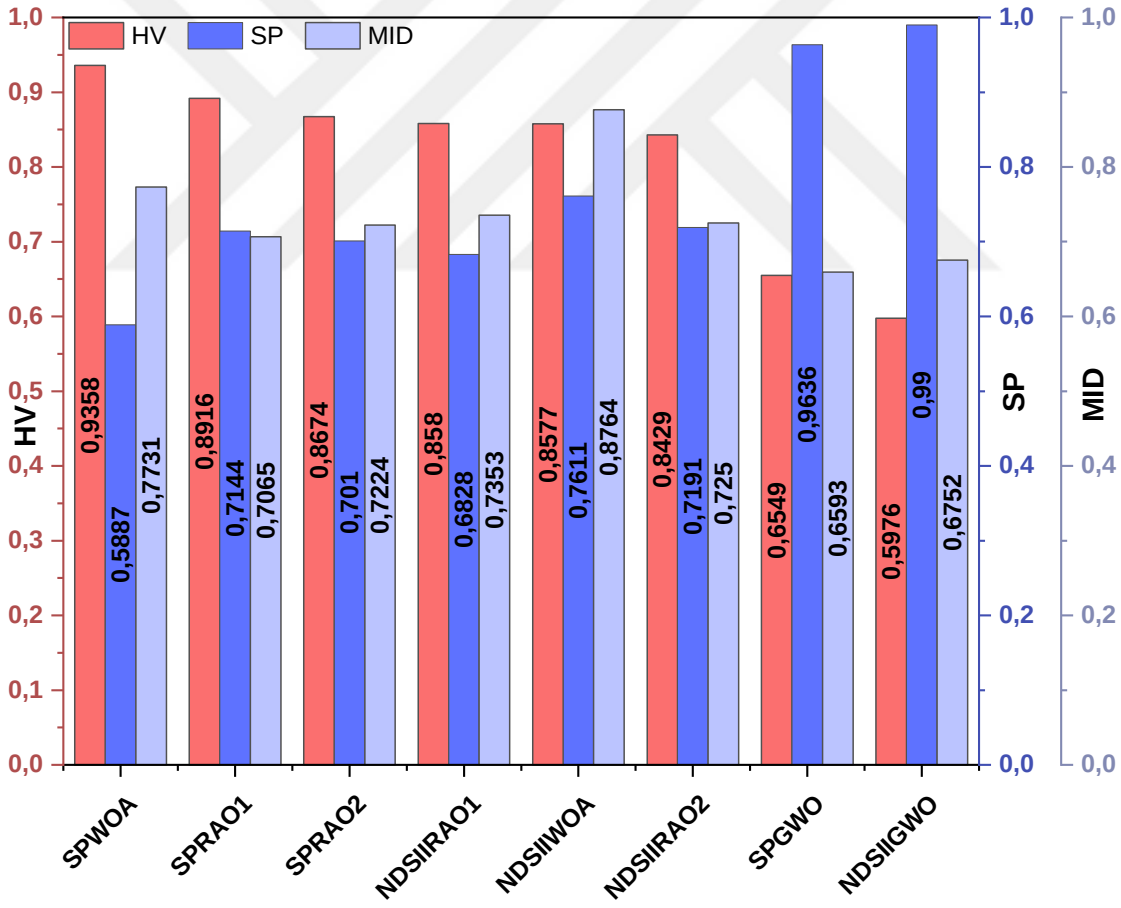
Algoritma Performans Kriterleri	Değer Tipi	NDSIIGWO	NDSIIRAO1	NDSIIRAO2	NDSIIWOA	SPGWO	SPRAO1	SPRAO2	SPWOA
Hiper Hacim (HV)	En İyi	0,6462	0,8801	0,8807	0,8778	0,8435	0,9194	0,8846	0,9599
	En Kötü	0,5525	0,8369	0,8146	0,8341	0,5516	0,8627	0,8525	0,9146
	Ort.	0,5976	0,858	0,8429	0,8577	0,6549	0,8916	0,8674	0,9358
	Std.	0,0295	0,0127	0,0227	0,0107	0,092	0,0171	0,0104	0,0128
Yayılım (SP)	En İyi	0,9606	0,5976	0,5506	0,5583	0,9055	0,5904	0,6436	0,3997
	En Kötü	1,0478	0,7599	0,7949	0,8747	1,018	0,7833	0,7696	0,7193
	Ort.	0,99	0,6828	0,7191	0,7611	0,9636	0,7144	0,701	0,5887
	Std.	0,0276	0,0452	0,0742	0,0873	0,0411	0,0688	0,0394	0,0978
Ortalama İdeal Mesafe (MID)	En İyi	0,7223	0,7674	0,7605	0,9056	0,7401	0,7468	0,7553	0,7945
	En Kötü	0,632	0,6989	0,6871	0,8607	0,5565	0,6587	0,6949	0,7413
	Ort.	0,6752	0,7353	0,725	0,8764	0,6593	0,7065	0,7224	0,7731
	Std.	0,0327	0,0219	0,0201	0,014	0,0684	0,027	0,0198	0,0168

Tablo 25'te 290 aktivite TCTP problemi için algoritmaların performans ölçütlerine ait ortalama değerler verilmiş olup, bu ölçütler Şekil 39'de görsel olarak da sunulmuştur. Şekil 39, algoritmaların HV (Hiper Hacim), SP (Yayılım) ve MID (Ortalama İdeal Mesafe) performanslarını karşılaştırmalı bir şekilde göstermektedir. Bu tablo ve şekil birlikte incelendiğinde, SPWOA algoritmasının 0.9358 HV değeriyle en yüksek hiper hacim değerine ulaştığı ve çözümlerinin hem kalite hem de çeşitlilik açısından üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca, 0.5887 SP ve 0.7731 MID değerleri ile SPWOA algoritması, yayılım ve ideal çözüme yakınlık açısından da başarılı sonuçlar sunmaktadır. SPRAO1 ve SPRAO2 algoritmaları ise sırasıyla 0.8916 ve 0.8674 HV değerleri ile yüksek hiper hacim elde etmiş, ancak yayılım ve hiper hacim açısından SPWOA algoritmasının gerisinde kalmıştır. Buna karşılık, NDSIIWOA algoritması 0.8577 HV değeriyle iyi bir hiper hacim sergilerken, 0.7611 SP ve 0.8764 MID değerleriyle daha geniş yayılım ve ideal çözüme uzaklık açısından daha düşük performans göstermiştir. Aynı durum diğer algoritmalarda da görülebilmektedir. Bu sonuçlar, SP ile üretilen çözümlerin NDSII algoritmalarıyla üretilen çözümlerden kalite ve yayılım açısından daha üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, ortalama ideal mesafe (MID) açısından SPGWO algoritması, elde edilen Pareto çözümleriyle daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, her algoritmanın farklı açılardan üstünlük sağladığını göstermektedir. Ancak, önceki bölümde de belirtildiği gibi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin performans değerlendirmelerinde, Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem

de çeşitliliğini ölçmesi nedeniyle hiper hacim (HV) ölçütü, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi ölçütlere göre daha fazla tercih edilmektedir.

Tablo 25. 290 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

Algoritmalar	NFE	HV	SP	MID
SPWOA	20000	0,9358	0,5887	0,7731
SPRAO1	20000	0,8916	0,7144	0,7065
SPRAO2	20000	0,8674	0,7010	0,7224
NDSIIRAO1	20000	0,8580	0,6828	0,7353
NDSIIWOA	20000	0,8577	0,7611	0,8764
NDSIIRAO2	20000	0,8429	0,7191	0,7250
SPGWO	20000	0,6549	0,9636	0,6593
NDSIIGWO	20000	0,5976	0,9900	0,6752



Şekil 39. 290 aktivite TCTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.2.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Problemleri Genel Değerlendirme

Bu çalışmada, çok amaçlı zaman-maliyet ödünleşim problemlerinin çözümünde farklı metasezgisel algoritmaların performansları incelenmiştir. Rao serileri, Gri Kurt optimizasyonu ve Balina optimizasyonu algoritmaları, NDSII ve SP çok amaçlı seçme ve eleme operatörleriyle ayrı ayrı geliştirilmiştir. Analizler, küçük (29 aktivite), orta (69 aktivite) ve büyük (290 aktivite) ölçekli projeler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar algoritmaların ve operatörlerin etkinliğini ortaya koymuştur. Güçlendirilmiş pareto (SP) yöntemi ile geliştirilen algoritmaların, NDSII operatörü ile geliştirilen versiyonlara kıyasla tüm problem boyutlarında daha üstün performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Küçük ölçekli problemde (29 aktivite) SPRAO1 algoritması 1.000 hiper hacim değeri ile tüm gerçek pareto sonuçlarını bulmayı başarmış, SPWOA algoritması 0.3048 yayılım değeri ile en iyi dağılımı sağlamıştır. Bu durumu daha yakından incelediğimizde, 76 günlük gerçek Pareto çözümü olan 34510$ yerine, SPWOA algoritmasının bir bağımsız çalışmasında 34520$ değerini bulduğu tespit edilmiştir. Bu küçük fark, pareto cephesinde bir çeşitlilik yaratmış ve üretilen çözümlerin daha düzenli dağılmasını sağlamıştır. Ancak bu çeşitlilik, yayılım metriğinde olumlu bir etki yaratmasına rağmen, hiper hacim ölçütüne olumsuz yansımıştır. Bu durum, hiper hacim değerinin bir pareto cephesinin genel performansını değerlendirmede ne kadar kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Tüm SP tabanlı algoritmalar, literatürde yer alan MOSGO algoritmasından tüm metriklerde daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Orta ölçekli problemde (69 aktivite), SPWOA algoritması tarafından üretilen Pareto çözümlerinin diğer algoritmalara göre daha baskın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 0.9973 hiper hacim ve 0.7071 ortalama ideal mesafe değerleriyle en iyi performansı sergilemiştir. NDSII ile üretilen çözümlerin tamamının hiper hacim ölçütü açısından MOSGO algoritmasına göre daha düşük performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Diğer yandan, güçlendirilmiş pareto yöntemiyle geliştirilen WOA ve Rao-2 algoritmalarının, %50 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanmasına rağmen MOSGO'dan daha iyi sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. Bu durum, SP operatörünün hesaplama verimliliği açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, MOSGO algoritması tarafından üretilen çözümler, Rao-2 ve WOA algoritmalarına kıyasla çok az bir farkla daha homojen bir dağılım sergilemiştir.

Büyük ölçekli problemde (290 aktivite) SPWOA algoritması 0.9358 hiper hacim ve 0,5887 yayılım değeri ile en iyi performansı göstermiştir. SP operatörünün avantajı bu problem boyutunda daha belirgin hale gelmiş, özellikle çözüm kalitesi ve çeşitliliği açısından NDSII'ye göre üstünlük sağlamıştır.

Algoritmaların performans özellikleri incelendiğinde, WOA algoritmasının tüm problem boyutlarında tutarlı ve yüksek performans gösterdiği, Rao serilerinin özellikle küçük ölçekli problemlerde etkili sonuçlar verdiği, GWO algoritmasının ise dengeli çözümler üretmede başarılı olmasına rağmen uç noktalarda diğer algoritmalara göre daha zayıf kaldığı gözlemlenmiştir.

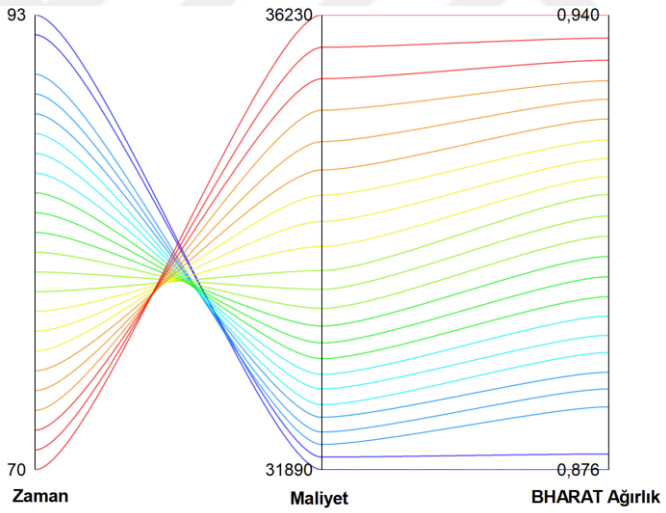
Hesaplama verimliliği açısından, SP tabanlı algoritmaların daha az fonksiyon değerlendirmesiyle MOSGO algoritmasına göre daha kaliteli sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. 29 aktiviteli problemde %75, 69 aktiviteli problemde ise %50 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanılmasına rağmen, literatürdeki sonuçlardan daha iyi performans elde edilmiştir. Sonuç olarak, çok amaçlı zaman-maliyet ödünleşim problemlerinin çözümünde SP operatörü ile geliştirilen algoritmaların, özellikle SPWOA'nın hem çözüm kalitesi hem de hesaplama verimliliği açısından üstün performans gösterdiği görülmüştür.

3.2.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi

Bu bölümde, 29, 69 ve 290 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet optimizasyon problemlerinin çözümleri sonucunda elde edilen bağımsız çözümler arasından en yüksek hiper hacim değerine sahip Pareto çözümleri incelenmiş ve en uygun alternatiflerin belirlenmesi amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Her bir problem kategorisinde en iyi performansı gösteren algoritmanın pareto çözümleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu kapsamda, 29 aktiviteli problem için SPRAO1, 69 ve 290 aktiviteli problemler için ise SPWOA algoritmaları tarafından üretilen Pareto çözümleri kullanılmıştır. Analiz sürecinde zaman ve maliyet kriterlerine eşit önem verilmiş ve her iki kriter eşit ağırlıkta (wt=wc=0.5) değerlendirilmiştir. Böylece, proje yöneticilerine süre ve maliyet açısından dengeli çözüm alternatifleri sunulması hedeflenmiştir. BHARAT yöntemi kullanılarak her bir problem kategorisi için en iyi üç alternatif gösterilmiştir. Bu alternatifler, zaman ve maliyet kriterleri için belirlenen eşit ağırlıklar altında BHARAT yöntemi ile sıralanarak elde edilen çözümlerden oluşmaktadır. Bu sayede, proje yöneticilerine yönelik

sistematik bir karar destek mekanizması oluşturulmuş ve karar vericilerin projelerinin gereksinimlerine göre en uygun çözümü seçebilmeleri sağlanmıştır.

Şekil 40'ta, 29 aktiviteli TCTP problemi için elde edilen Pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman ve maliyet değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümlerine bakıldığında, zaman değerlerinin 70-93 gün, maliyet değerlerinin ise 31890-36230 arasında değiştiği görülmektedir. Grafikte, her bir çizgi bir Pareto çözümünü temsil etmekte olup, bu çizgilerin kesişim noktaları çözümlerin birbirleriyle ilişkisini ve BHARAT yöntemi sonucunda elde edilen ağırlık değerlerini göstermektedir. BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç çözüm Tablo 26'da sunulmuştur. Tabloda her bir alternatif için kullanılan modlar, projenin tamamlanma süresi, toplam maliyet ve BHARAT ağırlık değerleri yer almaktadır. Bu değerlendirmede, ilk sırada yer alan alternatif 70 günde tamamlanmakta ve 36230$ maliyet gerektirmekte olup, 0.9401 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir.

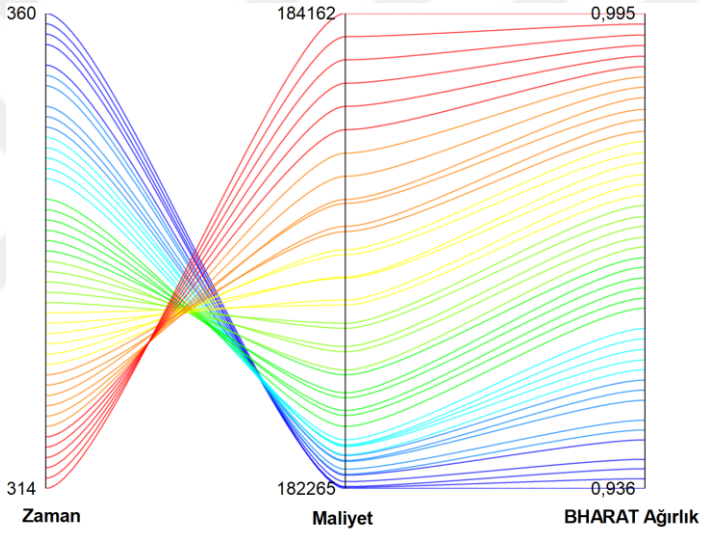


Şekil 40. 29 aktiviteli TCTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 26. 29 aktiviteli TCTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	BHARAT Ağrılık
1	2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,3,3,3,1,1,3,3,3,1	70	36230	0.9401
2	2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,3,3,3,1,1,2,3,3,1	71	35920	0.9369
3	2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,3,3,3,1,1,1,3,3,1	72	35620	0.9338

Şekil 41'de 69 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet optimizasyon problemi için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto sonuçlarının BHARAT ağırlıkları, zaman ve maliyet değerleri arasındaki ilişki sunulmaktadır. Elde edilen pareto sonuçları incelendiğinde, sürelerin 314-360 gün aralığında, maliyetlerin ise 182265-184162 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 27'de gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen modlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, ağırlıkların eşit kabul edilmesi durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 314 gün sürede tamamlanıp 184162$ maliyet ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.9949 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 41. 69 aktiviteli TCTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

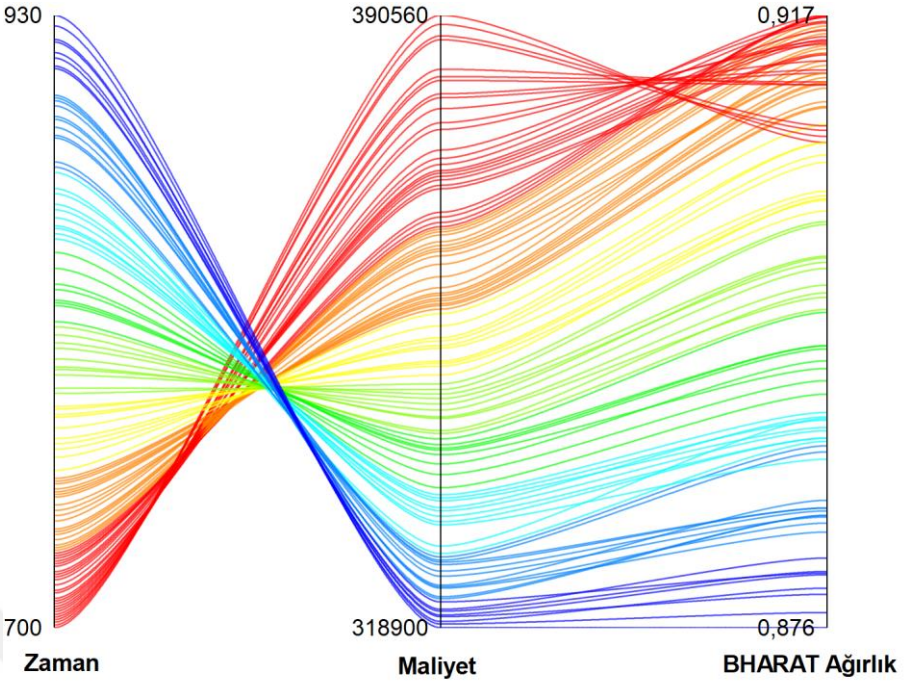
Tablo 27. 69 aktiviteli TCTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	BHARAT Ağrılık
1	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,3,1 ,3,1,3,1,3,1,3,1,3,1,3,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,1	314	184162	0.9948
2	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,3,1 ,3,1,3,1,2,1,3,1,3,1,3,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,1	315	184069	0.9935
3	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,1,3,1 ,3,1,3,1,3,1,3,1,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,1	316	183976	0.9922

Şekil 42'de, 290 aktiviteli TCTP problemi için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto sonuçlarının BHARAT ağırlıkları, zaman ve maliyet değerleri arasındaki bağlantı sunulmuştur. SPWOA tarafından elde edilen pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 700 ile 930 gün arasında, maliyetlerin ise 318900$ ile 390560$ arasında değiştiği görülmektedir. BHARAT yöntemi uygulaması sonucu en yüksek ağırlığa sahip üç pareto çözümü Tablo 28'de verilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda, ağırlıkların eşit kabul edilmesi durumunda en iyi çözüm olarak seçilen ilk alternatif, 714 gün sürede tamamlanmış ve 373810$ maliyetle gerçekleştirilmiş olup, BHARAT ağırlık değeri 0.9167 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 28. 290 aktiviteli TCTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	BHARAT Ağrılık
1	2,1,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,3,1,3,1,1,2,1,3,3,1,3,3,3,3,1,1,3,3,1, 1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,3,1,1,3,2,1,3,3,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3, 2,1,1,1,3,2,1,3,1,1,1,2,1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3,2,1,1,1, 3,2,1,3,1,1,1,2,3,3,3,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,1,1,1, 3,3,3,1,3,3,3,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,1,2, 3,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,2,1,1,3,1,1,1,1,3,3,1, 1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,3,3,3, 1,2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,3,1,2,1,3,1,1,3,1,1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,1, 1,1,1,1,3,1,1,1,1,3,2,3,3,1,1,1,2,3,3,3,1,1,3,3,3,1	714	373810	0.9167
2	2,1,1,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,3,1,1,2,1,3,3,1,1,1,1,3,1,1,3,3,1, 1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,2,1,3,1,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3, 2,1,1,1,3,2,1,3,1,1,1,2,1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3,2,1,1,1, 3,2,1,1,1,1,1,2,3,3,3,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,1,1,1, 3,1,3,1,3,3,3,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,2, 1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,1,1,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,2,1,1,3,1,1,1,1,3,3,1, 1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,3,3,3, 1,2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,3,1,2,1,3,1,1,1,1,1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,1, 1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,3,1,1,1,1,2,3,3,3,1,1,3,3,3,1	727	366320	0.9167
3	2,1,1,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,3,1,1,2,1,3,3,1,1,1,1,3,1,1,3,3,1, 1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3, 2,1,1,1,3,2,1,3,1,1,2,2,1,3,3,1,1,3,3,3,1,1,3,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1, 3,2,1,1,1,1,1,2,1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,1,1,1, 3,1,3,1,3,3,3,1,1,3,1,3,1,2,3,3,2,1,1,1,3,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,2, 1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,1,1,2,1,2,1,3,2,1,1,3,1,2,1,1,3,1,1,1,1,3,3,1, 1,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,1,3,3,3, 1,2,3,3,1,1,1,1,3,2,1,1,3,1,2,1,3,1,1,1,1,1,3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,1, 1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,3,1,1,1,1,2,3,3,3,1,1,3,3,3,1	728	365830	0.9166



Şekil 42. 290 aktiviteli TCTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

3.3. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemleri

Çok amaçlı zaman-maliyet-kalite ödünleşim (TCQTP) problemlerinin incelenmesi kapsamında, 18, 60 ve 180 aktiviteli projeler üzerinde algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. İlk olarak El-Rayes ve Kandil (2005) tarafından literatüre kazandırılan on sekiz aktiviteli karayolu inşaatı zaman-maliyet-kalite problemi, baskın olmayan sıralama genetik algoritma (NSGA-II) ile çözülmüştür. Daha sonra, Luong vd. (2021) bu probleme daha iyi bir çözüm sunmak amacıyla karşıt tabanlı çoklu amaçlı diferansiyel evrim algoritmasını (OMODE) önermişlerdir. Son olarak, Son ve Khoi (2024), balçık küfü algoritması (SMA) ile alternatif bir çözüm geliştirmişlerdir.

60 aktiviteli TCQTO problemi ise ilk kez Tran vd. (2015) tarafından literatüre kazandırılmış olup, diferansiyel evrim ile hibrit çok amaçlı yapay arı kolonisi algoritması (MOABCDE) kullanılarak çözülmüştür. Sonrasında, aynı problem Son ve Tri (2024) tarafından yeniden ele alınmış ve akış yönü algoritması (FDA) kullanılarak alternatif bir çözüm yöntemi önerilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, zaman-maliyet-kalite ödünleşim problemlerini derinlemesine incelemek amacıyla Rao serileri, Gri kurt optimizasyonu (GWO) ve Balina optimizasyonu algoritması (WOA), sırasıyla NDSII, SP ve NDSIII çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. Böylece hem optimizasyon algoritmaları hem de çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin pareto çözümleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Ayrıca, geliştirilen algoritmaların 18 ve 60 aktiviteli TCQTO problemleri üzerindeki performanslarını, literatürde kullanılan diğer algoritmalarla performans metriklerinin daha doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi amacıyla OMODE ve MOABCDE algoritmaları yeniden kodlanarak test edilmiştir. Son ve Khoi (2024) ve Son ve Tri (2024) tarafından önerilen SMA ve FDA algoritmalarında, üretilen çözümlerin bir sonraki nesile (iterasyona) nasıl aktarılacağı, yani çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin nasıl kullanıldığına dair bir bilgi verilmemiştir. Zaman-maliyet-kalite problemi çok amaçlı bir optimizasyon problemi olduğundan, SMA ve FDA algoritmaları bu çalışma kapsamında yeniden kodlanamamıştır. Hem OMODE hem de MOABCDE algoritmaları, entropi kalabalık mesafesi tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemini kullanmıştır. Bu algoritmalar hakkında tüm detaylar için sırasıyla Luong vd. (2021) ve Tran vd. (2015) çalışmalarına başvurulabilir.

Son olarak, geliştirilen algoritmaların büyük ölçekli projelerdeki performansını değerlendirmek amacıyla, 18 aktiviteli proje on kat artırılarak 180 aktiviteye genişletilmiştir. Böylece, kullanılan optimizasyon algoritmalarının ve çok amaçlı seçme-eleme operatörlerinin performans değişiklikleri büyük ölçekli TCQTP problemi üzerinde incelenmiş ve algoritmaların performansı C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

3.3.1. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemi

18 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite ödünleşim problemi, ilk olarak El-Rayes ve Kandil (2005) tarafından incelenmiştir. Çalışmalarında NSGA-II algoritmasını kullanarak Pareto çözümü sunmuşlardır. Daha sonra, Luong vd. (2021) bu probleme daha iyi bir çözüm sunmak amacıyla karşıt tabanlı çoklu amaçlı diferansiyel evrim algoritmasını (OMODE) kullanmışlardır. Son olarak, Son ve Khoi (2024), balçık küfü algoritması (SMA) ile geliştirilmiş ve OMODE algoritması ile kıyaslanmıştır.

Bu çalışma kapsamında Rao serileri, Gri kurt algoritması ve Balina algoritmaları, kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), güçlendirilmiş pareto yöntemi

(SP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon sayısı 92 iterasyon sayısı 200 olacak şekilde belirlenmiştir. Bu popülasyon ve iterasyon değerleri, literatürde kullanılan OMODE algoritmasına kıyasla yaklaşık %63 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile analiz edilmiştir. Böylece, literatürde önerilen algoritmaya kıyasla daha az fonksiyon değerlendirmesi ile performansın artırılması hedeflenmiş ve her bir algoritmada kullanılan çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında, OMODE algoritması orijinal çalışmadaki gibi 100 popülasyon 500 jenerasyon kullanılarak yeniden test edilmiştir. OMODE algoritmasında iterasyon yerine jenerasyon kullanılmasındaki amaç algoritmanın karşıt tabanlı öğrenme ile de popülasyonlar oluşturmasıdır.

18 aktiviteli problem, her bir faaliyetin süre, maliyet ve kalite opsiyonları bulunmakta ve toplamda 2,95E+09 farklı proje tamamlanma opsiyonu sunmaktadır. Probleme ait zaman-maliyet-kalite opsiyonları Tablo 29'de gösterilmektedir.

Tablo 29. 18 Aktivite TCQTO problemi zaman-maliyet-kalite opsiyonları

Akt	Mod	Süre	Maliyet	Akt. Ağırlık	W1	QP1	W2	QP3	W3	QP3
1	1	14	2400	3	50	100	30	96	20	98
	2	15	2150			90		89		89
	3	16	1900			86		77		84
	4	21	1500			75		72		73
	5	24	1200			63		60		65
2	1	15	3000	5	40	98	40	94	20	99
	2	18	2400			87		94		95
	3	20	1800			81		92		85
	4	23	1500			77		72		70
	5	25	1000			60		66		59
3	1	15	4500	8	70	100	15	97	15	95
	2	22	4000			80		82		81
	3	33	3200			62		60		63
4	1	12	45000	11	50	99	35	95	15	94
	2	16	35000			74		71		76
	3	20	30000			59		63		64
5	1	22	20000	10	60	100	20	97	20	99
	2	24	17500			93		89		89
	3	28	15000			77		71		72
	4	30	10000			61		64		61
6	1	14	40000	11	50	95	25	95	25	100
	2	18	32000			76		74		79
	3	24	18000			59		62		68
7	1	9	30000	10	30	97	30	99	40	93
	2	15	24000			70		73		71
	3	18	22000			61		62		67

Tablo 29'un devamı

8	1	14	220	1	100	95	0	-	0	-
	2	15	215			83				
	3	16	200			75				
	4	21	208			68				
	5	24	120			61				
9	1	15	300	1	50	100	50	99	0	-
	2	18	240			97		92		
	3	20	180			81		88		
	4	23	150			71		75		
	5	25	100			63		64		
10	1	15	450	1	60	94	40	97	0	-
	2	22	400			79		83		
	3	33	320			63		69		
11	1	12	450	2	70	96	30	95	0	-
	2	16	350			72		75		
	3	20	300			61		66		
12	1	22	2000	3	50	99	35	98	15	95
	2	24	1750			89		85		87
	3	28	1500			70		71		79
	4	30	1000			62		61		63
13	1	14	4000	7	40	99	40	96	20	97
	2	18	3200			73		71		76
	3	24	1800			60		62		63
14	1	9	3000	6	80	100	10	95	10	98
	2	15	2400			79		82		81
	3	18	2200			63		67		66
15	1	16	3500	7	70	100	30	98	0	-
16	1	20	3000	3	30	97	30	96	40	98
	2	22	2000			89		85		87
	3	24	1750			81		79		78
	4	28	1500			72		73		74
	5	30	1000			67		60		62
17	1	14	4000	6	70	98	20	97	10	99
	2	18	3200			73		75		72
	3	24	1800			62		65		61
18	1	9	3000	5	30	98	45	99	25	94
	2	15	2400			75		77		71
	3	18	2200			63		66		67

Şekil 43'te on bağımsız çözüm neticesinde elde edilen minimum zaman, maliyet ve maksimum kalite değerleri sırasıyla gösterilmiştir. Zaman açısından elde edilen sonuçlara incelendiğinde, geliştirilen tüm algoritmaların minimum zamanı (100 gün) bulmada başarılı oldukları tespit edilmiştir. Gri kurt algoritması (GWO) incelendiğinde, NDSII ile geliştirilen algoritmanın kaliteyi maksimize etmede NDSIII ve SP operatörlerine göre geride kaldığı görülmektedir. GWO algoritmasının SP ile geliştirilen modeli NDSIII ile geliştirilen modele göre maksimum kalite ve minimum maliyetin edilmesinde de daha iyi performans göstermiştir. Rao-1 algoritması, SP ve NDSII operatörleri ile geliştirilen versiyonların kaliteyi maksimize etmede tüm bağımsız çözümlerde başarılı oldukları, ancak NDSIII

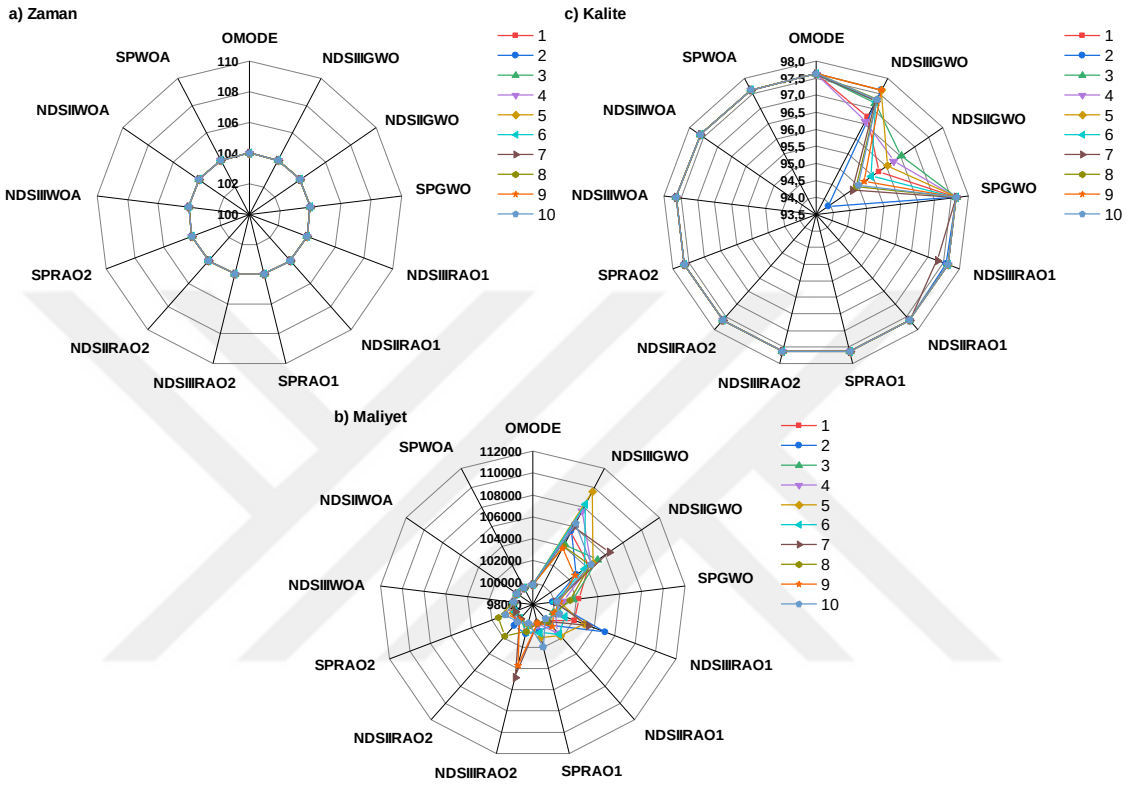
operatörü ile geliştirilen versiyonun yalnızca bir bağımsız çözümde bu başarıya ulaşamadığı görülmektedir. Maliyet açısından değerlendirildiğinde ise her üç operatörle geliştirilen Rao-1 algoritmasının benzer şekilde düzensiz bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Rao-2'ye bakıldığında ise, her üç operatör (SP, NDSII ve NDSIII) ile geliştirilen versiyonların kaliteyi maksimize etmede tüm bağımsız çözümlerde benzer başarı gösterdiği ve maksimum kalite değerlerine ulaştığı görülmektedir. Maliyet açısından değerlendirildiğinde, her üç operatörle geliştirilen modelde de her bağımsız çözümde minimum maliyete ulaşamadığı görülmektedir.

Balina optimizasyon algoritması (WOA) incelendiğinde SP, NDSII ve NDSIII operatörleri ile geliştirilen versiyonlarının, maliyeti ve zamanı minimize ederken kaliteyi maksimize etme konusunda tüm bağımsız çözümlerde başarılı olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, balina algoritmasının diğer algoritmalara göre üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır.

Literatürde, Luong vd. (2021) tarafından önerilen OMODE algoritması, bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmalara göre yaklaşık %172 daha fazla fonksiyon değerlendirilmesi ile geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında tekrar üretilen OMODE algoritmasının, tüm bağımsız çözümlerde optimum değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Ancak, balina algoritmasının tüm versiyonları, OMODE algoritmasına göre %63 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle her bir amaç için optimum sonuçlara ulaşarak hesaplama verimliliği açısından üstünlük sağlamıştır.

Algoritmaların her bir bağımsız çözüm sonucunda ürettiği pareto çözümlerini zaman, maliyet ve kalite açısından kıyaslamak için, önceki TCTP problemleri incelemesinde de belirtildiği gibi en yüksek HV değerine sahip bağımsız çözüm seçilmiştir. Tablo 30'da gri kurt algoritması için çok amaçlı TCQTP optimizasyon problemi için SP,NDSII ve NDSIII yöntemleriyle elde edilen Pareto çözümleri gösterilmektedir. GWO algoritması incelendiğinde, zamana göre sıralanmış pareto cephelerinde NDSIIGWO tarafından üretilen ilk üç pareto cephesi, SPGWO tarafından baskılandığı görülmektedir. Minimum maliyet ve maksimum kalite açısından bakıldığında, SPGWO algoritması diğer algoritmalara göre daha düşük maliyet ve daha yüksek kalite değeri ürettiği görülmektedir. Kalite açısından kıyaslandığında ise NDSIIIGWO tarafından üretilen ilk pareto cephesi, SPGWO tarafından baskılanmıştır. Zaman, maliyet ve kalite açısından Balina algoritmasının farklı operatörlerle geliştirildiğinde bile optimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Ancak, kalabalık mesafe ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemi ile geliştirilen (1 ve 3) numaralı pareto

sonuçlarının SPWOA tarafından baskılandığı görülmektedir. Bu sonuçlar hem WOA hem de GWO algoritmasında aynı algoritma kullanılsa da optimizasyon sürecinde çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin üretilen pareto cepheleri üzerindeki etkilerini göstermektedir.



Şekil 43. 18 aktiviteli TCQTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman, maliyet ve maksimum kalite değerleri

Tablo 30. 18 aktiviteli TCQTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	104	141158	86,77	104	141720	87,03	104	138020	86,02
	2	104	141515	86,83	104	147820	91,23	104	141100	88,67
	3	104	147965	90,59	104	150320	92,62	104	143700	89,69
Mal. Göre	4	147	102795	68,89	161	99970	65,70	161	103770	72,83
	5	139	103250	69,86	156	100320	66,13	143	104400	72,58
	6	145	103970	70,96	154	100820	66,42	138	109180	78,46
Kal. Göre	7	108	165420	93,94	104	168820	97,63	105	168565	97,24
	8	104	163120	93,60	104	168220	97,37	104	167800	97,13
	9	108	162040	92,93	104	167570	97,09	105	166970	96,80

Tablo 31. 18 aktiviteli TCQTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	104	137820	86.16	104	137620	86.49	104	137820	86.16
	2	104	138370	86.98	104	143470	89.66	104	138370	86.98
	3	104	144820	88.25	104	146370	90.21	104	144820	88.25
Mal. Göre	4	169	99740	65.00	169	99740	65.00	169	99740	65.00
	5	166	101178	66.37	169	100240	65.57	166	101178	66.37
	6	143	102570	68.03	164	100678	65.79	143	102570	68.03
Kal. Göre	7	104	168820	97.63	104	168820	97.63	104	168820	97.63
	8	109	168700	97.48	104	168220	97.37	109	168700	97.48
	9	108	160820	95.43	104	167820	97.33	108	160820	95.43

Tablo 32 ve Tablo 33'te Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarının farklı çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri kullanılarak elde ettiği pareto çözümleri, zaman, maliyet ve kalite kriterlerine göre sıralanmış olarak sunulmaktadır. Rao-1 algoritması incelendiğinde, tüm algoritmaların zaman ve kalite açısından optimum değerlere ulaşabildiği, ancak maliyet öncelikli değerde SPRAO1'in daha iyi çözümler sağladığı görülmüştür. Rao-2 algoritması incelendiğinde ise zaman açısından tüm algoritmaların aynı optimum süreye ulaşabildiği, ancak NDSII tarafından üretilen ilk iki çözümün, NDSIII ve SP tarafından üretilen Rao-2 algoritmaları ile baskılandığı gözlemlenmektedir. Maliyet açısından bakıldığında, NDSII ve SP ile geliştirilen Rao-2 algoritmalarının NDSIII'e göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Kalite açısından ise tüm operatörlerin aynı değeri sağladığı tespit edilmiştir.

Tablo 32. 18 aktiviteli TCQTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	104	151320	92.92	104	142320	89.39	104	136665	82.75
	2	104	153220	93.44	104	145320	90.45	104	138020	86.34
	3	104	153820	93.70	104	146720	90.46	104	142120	89.17
Mal. Göre	4	169	99940	65.36	169	99740	65.00	160	100540	66.60
	5	158	100165	65.94	163	100490	65.76	160	100590	66.70
	6	166	100535	66.86	166	101090	68.57	141	101730	68.68
Kal. Göre	7	104	168820	97.63	104	168820	97.63	104	168820	97.63
	8	106	167970	97.05	104	168220	97.37	109	168700	97.48
	9	104	165720	96.59	107	167760	97.28	104	168220	97.37

Tablo 33. 18 aktiviteli TCQTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	104	135820	82.35	104	138220	86.75	104	134970	82.41
	2	104	141720	84.70	104	139470	87.16	104	136970	83.76
	3	104	143320	89.69	104	140220	87.51	104	141320	88.67
Mal. Göre	4	169	99740	65.00	169	99740	65.00	161	99870	65.29
	5	166	99990	65.57	167	100378	65.57	161	99950	65.43
	6	158	100320	66.43	169	101040	67.99	142	100870	67.26
Kal. Göre	7	104	168820	97.63	104	168820	97.63	104	168820	97.63
	8	111	167920	96.89	104	168220	97.37	104	168720	97.29
	9	104	166320	96.85	104	167220	97.07	108	160720	95.09

Tablo 34'te, SPWOA ve SPRAO2 algoritmaları tarafından üretilen Pareto çözümlerinin, literatürde sunulan OMODE ve SMA algoritmaları tarafından üretilen Pareto çözümleriyle karşılaştırması sunulmaktadır. Zaman açısından incelendiğinde (1,2,3 nolu pareto), tüm algoritmalar projeyi minimum 104 günde tamamlama konusunda başarılı olmuştur, ancak maliyet değerlerinde farklılıklar gözlenmektedir. SPWOA algoritması, zaman odaklı çözümlerinde diğer algoritmalara kıyasla daha düşük maliyet sunarken, OMODE ve SMA algoritması daha yüksek kalite değerleri sağlamaktadır. Maliyet kriterine göre yapılan değerlendirmelerde ise SPRAO2 ve SPWOA algoritmalarının, OMODE ve SMA algoritmalarına göre daha düşük maliyetli çözümler sağladığı dikkat çekmektedir. SPRAO2 ve SPWOA algoritmaları kalite açısından aynı sonuçlara %63 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle ulaşarak hesaplama verimliliği açısından üstünlük sağlamaktadır.

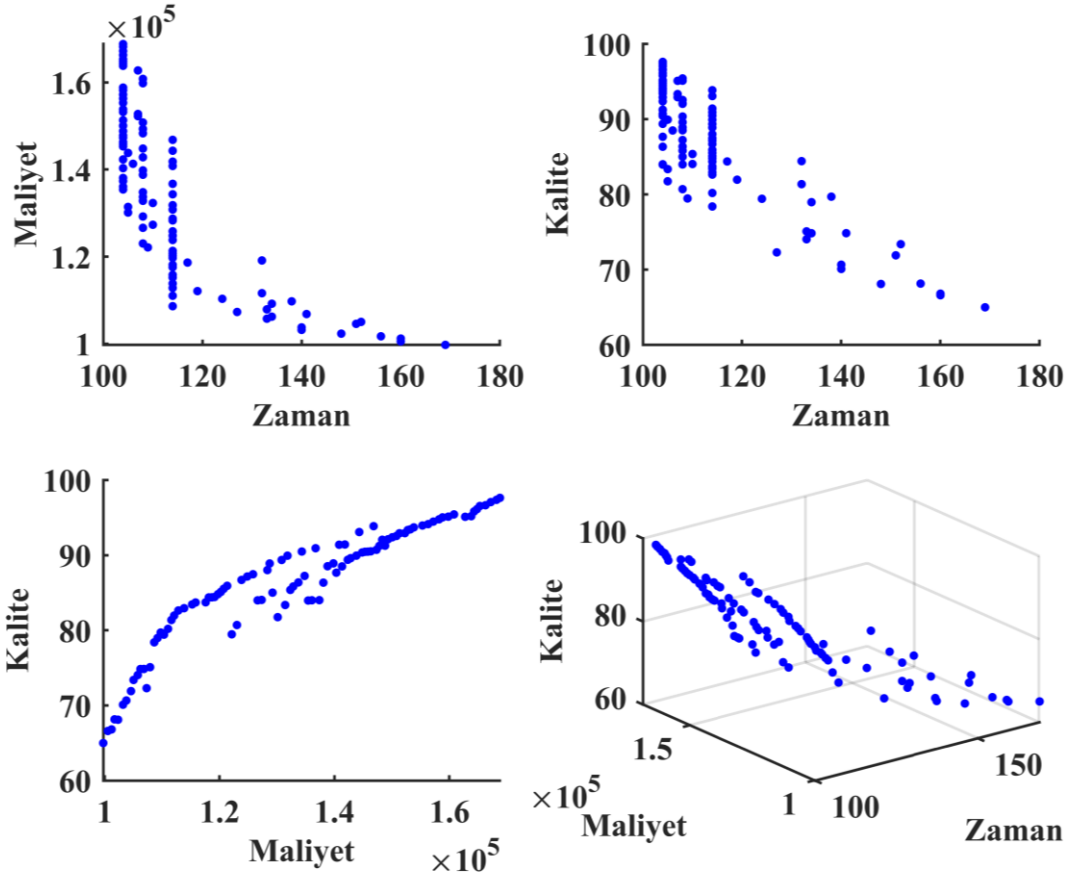
Tablo 34. 18 aktiviteli TCQTP problemi için SPRAO2 ve SPWOA algoritmalarına ait Pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması

	OMODE (2021)			SMA (2024)			SPRAO2			SPWOA		
	Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
1	104	164715	96.17	104	166620	96.77	104	138220	86.75	104	137620	86.49
2	104	158850	95.03	104	165070	96.28	104	139470	87.16	104	143470	89.66
3	104	163100	95.01	104	163870	95.76	104	140220	87.51	104	146370	90.21
4	159	99870	65.24	161	99820	65.15	169	99740	65.00	169	99740	65.00
5	120	105570	72.69	159	99870	65.24	167	100378	65.57	169	100240	65.57

Tablo 34'ün devamı

6	114	105270	71.55	158	99900	65.36	169	101040	67.99	164	100678	65.79
7	104	168820	97.63	104	168820	97.63	104	168820	97.63	104	168820	97.63
8	109	167695	97.06	104	168815	97.47	104	168220	97.37	104	168220	97.37
9	104	167820	97.33	104	168800	97.39	104	167220	97.07	104	167820	97.33

Bir sonraki bölümde ele alınacak performans analizlerinde görüleceği gibi, HV değeri açısından en başarılı algoritma olan SPRAO2'nin minimum zaman, maliyet ve kalite çözümlerinde kullanılan modlar Tablo 35'te, SPRAO2 algoritması tarafından elde edilen pareto çözümleri ise Şekil 44'te gösterilmektedir.



Şekil 44. SPRAO2 tarafından üretilmiş 18 aktivite zaman-maliyet-kalite pareto grafiği

Tablo 35. 18 aktivite TCQTP için SPRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite
Minimum Zaman	1	1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,5,1,1	104	164320	95,82
	2	1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,4,1,1	104	164820	96,13
	3	1,2,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1	104	157220	94,47
Minimum Maliyet	4	5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3	169	99740	65,00
	5	5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,1	160	100540	66,60
	6	5,4,3,3,4,3,3,5,5,3,3,2,3,3,1,5,3,2	160	101190	66,81
Maksimum Kalite	7	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	104	168820	97,63
	8	1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	104	168220	97,37
	9	1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1	104	167220	97,07

3.3.2. 18 Aktivite TCQTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

18 aktivite içeren çok amaçlı zaman-maliyet-kalite problemlerinin performans değerlendirilmesi C-metrik, hiper hacim, dağılım ve ortalama ideal mesafe gibi performans ölçütleri kullanılarak yapılmıştır. Tablo 36'da her bir algoritmaya ait on bağımsız çözümle elde edilen Pareto çözümlerinin, OMODE algoritması ile baskınlık performanslarının (C-metrik) karşılaştırılması gösterilmektedir.

Tablo 36'da, OMODE algoritmasının, NDSIIGWO algoritmasının çözümlerinin ortalama olarak %83'ünü baskıladığı, buna karşılık NDSIIGWO algoritması ise MOSGO'nun ürettiği çözümlerinin yalnızca %1'ini baskılayabildiği görülmektedir. Ancak, Gri kurt algoritması (GWO) güçlendirilmiş pareto yöntemi ve referans noktalı baskın olmayan sıralama operatörleri ile geliştirildiğinde, OMODE algoritması ile C-metrik açısından benzer baskınlık performansları elde edilmiştir.

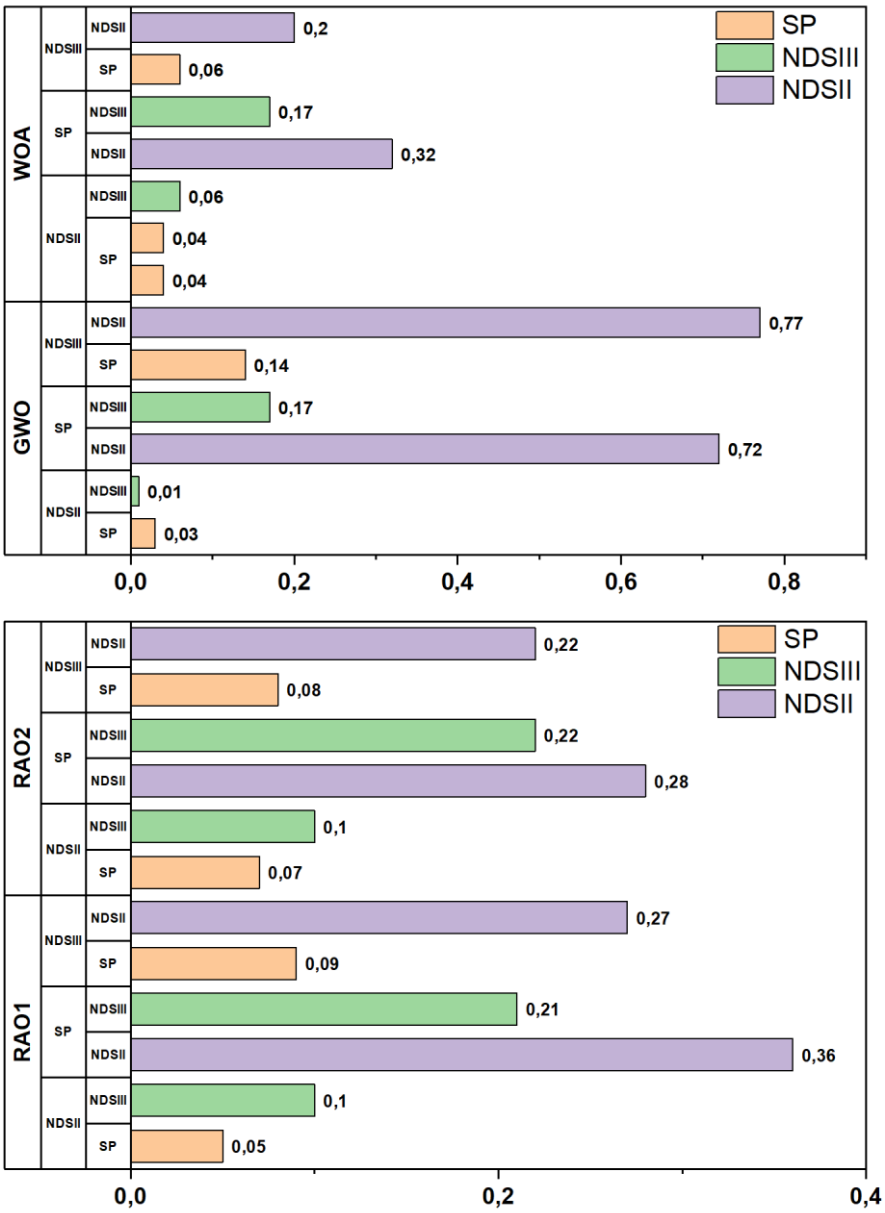
OMODE algoritması, NDSIIWOA algoritmasının %27'sini baskılarken, yaklaşık %9'u NDSIIWOA tarafından baskılanmıştır. Ancak WOA algoritması SP ve NDSIII ile geliştirildiğinde, OMODE algoritmasına karşı daha iyi performans göstermiştir. RAO1 algoritmasında ise, NDSII ile geliştirilen versiyonun çözümlerinin neredeyse yarısı OMODE tarafından baskılanırken, NDSIII ve SP ile geliştirilen versiyonlarda bu oran önemli ölçüde azalmıştır. Rao-2 algoritmasında ise, SP ile geliştirilen modelin OMODE çözümlerinin %19'unu baskıladığı, %13'ünün de OMODE tarafından baskılandığı görülmektedir.

NDSII ile geliştirilen tüm algoritmaların pareto çözümlerinin, OMODE çözümlerine karşı baskınlık açısından SP ve NDSIII ile geliştirilen versiyonlara göre oldukça geride kaldığı gözlemlenmiştir. Tüm algoritmalar arasında, SPWOA, NDSIIIWOA ve SPRAO2 algoritmalarının, %63 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile OMODE'ye karşı daha baskın sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir.

Tablo 36. 18 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, OMODE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(OMODE, NDSIIGWO)	0,9800	0,5800	0,8276	0,0780
C(NDSIIGWO, OMODE)	0,0300	0,0000	0,0051	0,0080
C(OMODE, SPGWO)	0,4300	0,0200	0,1886	0,0870
C(SPGWO, OMODE)	0,2400	0,0200	0,1351	0,0517
C(OMODE, NDSIIIGWO)	0,3077	0,0220	0,1329	0,0694
C(NDSIIIGWO, OMODE)	0,1900	0,0400	0,1071	0,0361
C(OMODE, NDSIIWOA)	0,5000	0,1000	0,2706	0,0930
C(NDSIIWOA, OMODE)	0,1900	0,0100	0,0887	0,0343
C(OMODE, SPWOA)	0,1600	0,0100	0,0805	0,0357
C(SPWOA, OMODE)	0,3700	0,1000	0,2109	0,0576
C(OMODE, NDSIIIWOA)	0,2198	0,0110	0,1033	0,0408
C(NDSIIIWOA, OMODE)	0,2200	0,0600	0,1222	0,0346
C(OMODE, NDSIIRAO1)	0,6700	0,1200	0,4580	0,1354
C(NDSIIRAO1, OMODE)	0,1500	0,0100	0,0641	0,0335
C(OMODE, SPRAO1)	0,2800	0,0800	0,1701	0,0460
C(SPRAO1, OMODE)	0,2400	0,0600	0,1504	0,0435
C(OMODE, NDSIIIRAO1)	0,4396	0,0000	0,1849	0,0990
C(NDSIIIRAO1, OMODE)	0,1900	0,0000	0,0784	0,0408
C(OMODE, NDSIIRAO2)	0,7500	0,0700	0,2887	0,1684
C(NDSIIRAO2, OMODE)	0,2100	0,0100	0,1067	0,0515
C(OMODE, SPRAO2)	0,2200	0,0400	0,1317	0,0391
C(SPRAO2, OMODE)	0,3200	0,0700	0,1918	0,0462
C(OMODE, NDSIIIRAO2)	0,5934	0,0000	0,1446	0,1232
C(NDSIIIRAO2, OMODE)	0,2900	0,0000	0,1154	0,0561

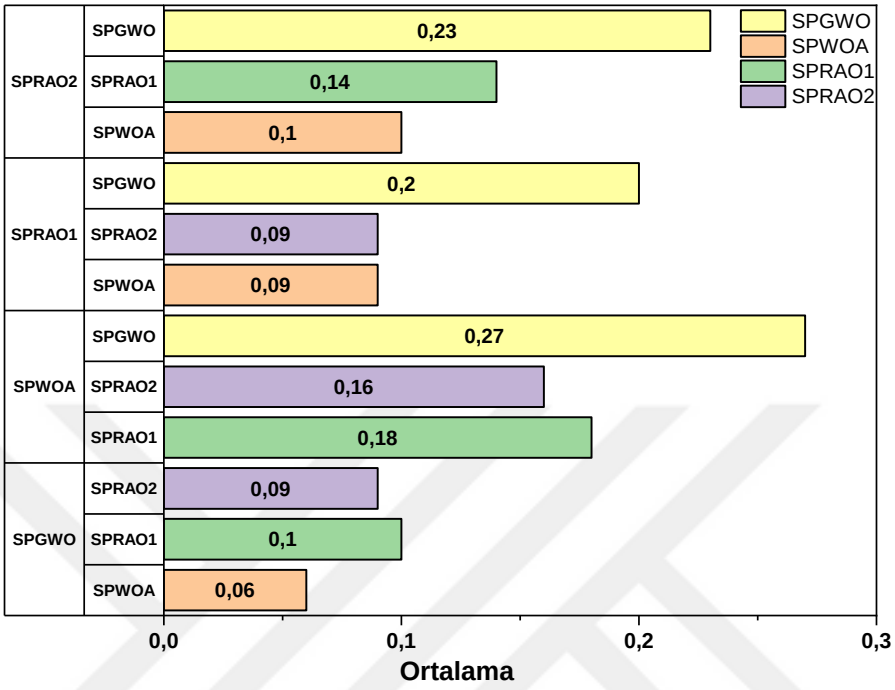
Şekil 45'te, SP,NDSII ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak oluşturulan algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin karşılaştırması sunulmaktadır. GWO algoritmasında, NDSIII ve SP yöntemleri ile geliştirilen versiyonların NDSII'ye göre oldukça üstün sonuçlar verdiği görülmektedir. SPGWO algoritması NDSIIIGWO algoritmasının ortalama %17'sini domine ederken %14'ü NDSIIIGWO tarafından domine edilmiştir. WOA, RAO1 ve RAO2 algoritmalarında güçlendirilmiş pareto yöntemi ile geliştirilen algoritmaların, NDSIII ve NDSII algoritmalarına göre üstünlük kurduğu Şekil 45'te görülmektedir.



Şekil 45. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

Şekil 46'da her bir algoritmaya ait en iyi çözümlerin C-metrik kıyaslamaları gösterilmektedir. SPGWO algoritmasının, sırasıyla SPWOA, SPRAO1 ve SPRAO2 algoritmalarının %6, %10 ve %9'unu baskıladığı gözlemlenirken, kendisinin SPWOA tarafından %27, SPRAO1 tarafından %20 ve SPRAO2 algoritması tarafından %23 oranında baskılandığı görülmektedir. SPWOA algoritması, SPRAO1'in %18'ini ve SPRAO2'nin %16'sını baskılarken, SPRAO1 tarafından %9 ve SPRAO2 tarafından %10 oranında

baskılanmıştır. Rao serileri arasında ise, SPRAO1'in SPRAO2'nin %9'unu baskıladığı buna karşılık SPRAO2'nin SPRAO1 çözümlerinin %14'ünü baskıladığı gözlenmiştir.



Şekil 46. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Algoritmaların performans değerlendirmesinde yalnızca C-metrik ölçütüne bağlı kalmak yanıltıcı olabilir. Çünkü çözümler belirli bir bölgede yoğunlaşarak sayısal üstünlük sağlayabilir. Bu nedenle, algoritmaların Pareto uzayındaki dağılımı, çeşitliliği ve kapsadığı alanın büyüklüğünün de incelenmesi gerektiği önceki bölümlerde vurgulanmaktadır. Böylece algoritmaların optimizasyon kabiliyetleri daha objektif şekilde karşılaştırılabilir.

Tablo 37'de hiper hacim ve yayılım, Tablo 38'de ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 37. 18 aktivite TCQTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
OMODE	0,968	0,9541	0,9604	0,0039	0,6436	0,7900	0,7271	0,0563
NDSIIGWO	0,9113	0,861	0,8908	0,0141	0,6799	0,7937	0,7435	0,0373
NDSIIRAO1	0,9526	0,8858	0,9264	0,0210	0,7685	1,0788	0,9987	0,0886
NDSIIRAO2	0,9576	0,9105	0,9464	0,0140	0,7902	1,0940	0,9068	0,0843
NDSIIWOA	0,9457	0,9226	0,9349	0,0087	0,9212	1,2325	1,0947	0,0916
SPGWO	0,959	0,9210	0,9488	0,0108	0,1985	0,2899	0,2427	0,0314
SPRAO1	0,9587	0,9471	0,9533	0,0038	0,1692	0,2865	0,2145	0,0390
SPRAO2	0,9695	0,9523	0,9624	0,0049	0,1971	0,2478	0,2227	0,0164
SPWOA	0,9742	0,9474	0,9611	0,0088	0,1582	0,2118	0,1909	0,0151
NDSIIIGWO	0,9528	0,9271	0,9422	0,0083	0,9127	1,0827	0,9825	0,0553
NDSIIIRAO1	0,9657	0,9393	0,9564	0,0087	1,0872	1,5146	1,2703	0,1394
NDSIIIRAO2	0,9745	0,9398	0,9617	0,0092	0,9333	1,3800	1,1585	0,1336
NDSIIIWOA	0,9594	0,9394	0,9493	0,0064	1,2356	1,5875	1,3936	0,1073

Tablo 38. 18 aktivite TCQTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

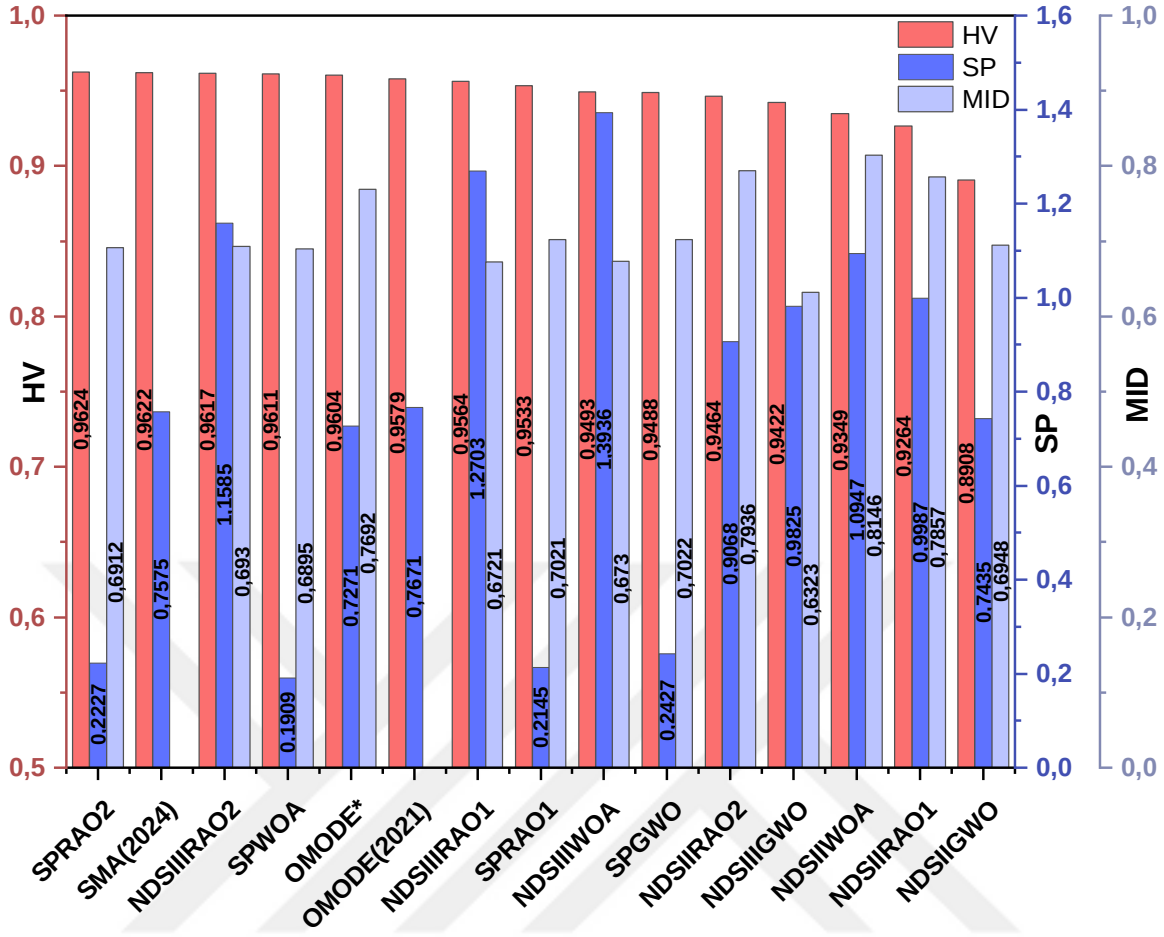
Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
OMODE	0,7548	0,7805	0,7692	0,0091
NDSIIGWO	0,6592	0,7557	0,6948	0,0269
NDSIIRAO1	0,7503	0,8276	0,7857	0,0234
NDSIIRAO2	0,7575	0,8384	0,7936	0,0241
NDSIIWOA	0,7888	0,8446	0,8146	0,0142
SPGWO	0,6793	0,7427	0,7022	0,0181
SPRAO1	0,6833	0,7176	0,7021	0,0098
SPRAO2	0,6622	0,7154	0,6912	0,0148
SPWOA	0,6748	0,702	0,6895	0,0101
NDSIIIGWO	0,6233	0,647	0,6323	0,0087
NDSIIIRAO1	0,6522	0,7102	0,6721	0,0195
NDSIIIRAO2	0,6784	0,7113	0,693	0,0107
NDSIIIWOA	0,7548	0,7805	0,7692	0,0091

Tablo 39'da performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmaktadır. Tablo 37 ve Tablo 38'de yer alan performans ölçümlerine ait ortalama değerler, Şekil 47'de grafiksel olarak sunulmaktadır. OMODE algoritmasının ürettiği HV ve yayılım değerleri incelendiğinde, bu çalışma kapsamında yeniden üretilen OMODE algoritması sonuçlarının, Luong vd. (2021) tarafından elde edilen değerlerle oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu da karşılaştırmada

kullanılan $HV_{algoritma}$/ $HV_{gerçek}$ değerlerinin doğru şekilde hesaplandığını göstermektedir. Hem Tablo 39 hem de Şekil 47'de, SPRAO2 algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPRAO1 algoritmasının vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği pareto çözümlerinin daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, her bir algoritmanın kendi içerisinde farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, daha önceki bölümde belirtildiği gibi çok amaçlı optimizasyon problemlerinde performans değerlendirmesi yapılırken HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi bakımından, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi diğer ölçütlerden daha öncelikli kabul edilmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen SPRAO2 algoritması, %63 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile SMA ve OMODE algoritmalarına kıyasla tüm performans ölçütlerinde daha üstün sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 39. 18 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
SPRAO2	18400	0,9624	0,2227	0,6912
SMA(2024)	50000	0,9622	0,7575	-
NDSIIIRAO2	18400	0,9617	1,1585	0,6930
SPWOA	18400	0,9611	0,1909	0,6895
OMODE*	50000	0,9604	0,7271	0,7692
OMODE(2021)	50000	0,9579	0,7671	-
NDSIIIRAO1	18400	0,9564	1,2703	0,6721
SPRAO1	18400	0,9533	0,2145	0,7021
NDSIIIWOA	18400	0,9493	1,3936	0,6730
SPGWO	18400	0,9488	0,2427	0,7022
NDSIIRAO2	18400	0,9464	0,9068	0,7936
NDSIIIGWO	18400	0,9422	0,9825	0,6323
NDSIIWOA	18400	0,9349	1,0947	0,8146
NDSIIRAO1	18400	0,9264	0,9987	0,7857
NDSIIGWO	18400	0,8908	0,7435	0,6948
* Bu Çalışma				



Şekil 47. 18 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.3.3. 60 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemi

60 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite ödünleşim problemi, ilk olarak Tran vd. (2015) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, çok amaçlı diferansiyel evrim ve yapay arı kolonisi algoritması (MOABCDE) hibrit bir yaklaşım kullanılarak problem çözülmüştür. Daha sonra, aynı problem Son ve Tri (2024) tarafından akış yönü algoritması (FDA) ile yeniden ele alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Rao serileri, Gri Kurt algoritması ve Balina algoritması, her biri ayrı ayrı, kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), güçlendirilmiş Pareto yöntemi (SP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) gibi çok amaçlı seçim ve eleme operatörleriyle geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon sayısı 300 iterasyon sayısı 300 olacak şekilde belirlenmiştir. Popülasyon ve iterasyon sayıları, literatürde kullanılan MOABCDE algoritmasına kıyasla %40 daha az fonksiyon

değerlendirmesi ile analiz edilmiştir. Bu sayede, önerilen algoritmada daha az fonksiyon değerlendirmesi ile performans artışı hedeflenmiş ve her bir algoritmanın optimizasyon sürecindeki çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin rolü araştırılmıştır. Bu çalışmada, MOABCDE algoritması, orijinal çalışmada olduğu gibi 300 popülasyon ve 500 jenerasyon ile yeniden değerlendirilmiştir. MOABCDE algoritmasında iterasyon yerine jenerasyon kullanılmasındaki amaç algoritmanın besin kaynaklarını seçen izleyici arıların davranışları neticesinde olasılığa göre diferansiyel evrim algoritmasını kullanmasıdır. Algoritma hakkında daha detaylı bilgi için Tran vd. (2015) tarafından yapılan çalışmaya başvurulabilir.

60 aktiviteli problem, toplamda 1,09863E+40 farklı proje tamamlanma opsiyonu sahiptir. Probleme ait aktiviteler arası öncülük ilişkileri ve zaman-maliyet-kalite opsiyonları Tablo 40'da gösterilmektedir.

Tablo 40. 60 Aktivite TCQTP problemi zaman-maliyet-kalite opsiyonları

Akt.	Öncül Dur.	Mod 1			Mod 2			Mod 3			Mod 4			Mod 5		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
1		14	3750	85	12	4250	99,98	10	5400	87,09	9	6250	70,19			
2		21	11250	85	18	14800	99,37	17	16200	94,48	15	19650	70,19			
3		24	22450	85	22	24900	98,54	19	27950	92,2	17	31650	70,19			
4		19	17800	85	17	19400	99,37	15	21600	70,19						
5		28	31180	85	26	34200	98,54	23	38250	92,2	21	41400	70,19			
6	1	44	54260	85	42	58450	96,76	38	63225	94,48	35	68150	70,19			
7	1	39	47600	85	36	50750	99,42	33	54800	94,48	30	59750	70,19			
8	2	52	62140	85	47	69700	99,92	44	72600	96,5	39	81750	70,19			
9	3	63	72750	85	59	79450	98,54	55	86250	97,87	51	91500	82,97	49	99500	70,19
10	4	57	66500	85	53	70250	97,63	50	75800	99,96	46	80750	93,53	41	86450	70,19
11	5	63	83100	85	59	89450	96,76	55	97800	99,92	50	10425	91,78	45	11240	70,19
12	6	68	75500	85	62	82000	99,14	58	87500	98,92	53	91800	87,79	49	96550	70,19
13	7	40	34250	85	37	38500	99,42	33	43950	88,54	31	48750	70,19			
14	1,8	33	52750	85	30	58450	99,86	27	63400	90,23	25	66250	70,19			
15	9	47	38140	85	40	41500	99,77	35	47650	87,09	32	54100	70,19			
16	9,10	75	94600	85	70	10125	98,36	66	11275	99,37	61	12450	88,54	57	13285	70,19
17	10	60	78450	85	55	84500	99,92	49	91250	83,81	47	94640	70,19			
18	10,11	81	12715	85	73	14325	99,98	66	15460	90,23	61	16190	70,19			
19	11	36	82500	85	34	94800	99,42	30	10170	70,19						
20	12	41	48350	85	37	53250	99,92	34	59450	88,54	32	66800	70,19			
21	13	64	85250	85	60	92600	98,08	57	99800	99,77	53	10750	91,17	49	11375	70,19
22	14	58	74250	85	53	79100	99,09	50	86700	99,37	47	91500	93,53	42	97400	70,19
23	15	43	66450	85	41	69800	94,06	37	75800	99,81	33	81400	89,07	30	88450	70,19
24	16	66	72500	85	62	78500	97,19	58	83700	99,73	53	89350	89,35	49	96400	70,19
25	17	54	66650	85	50	70100	98,54	47	74800	99,37	43	79500	88,03	40	86800	70,19
26	18	84	93500	85	79	10250	96,93	73	11125	99,37	68	11975	91,51	62	12850	70,19
27	20	67	78500	85	60	86450	99,37	57	89100	92,2	56	91500	88,03	53	94750	70,19

Tablo 40'ın devamı

28	21	66	85000	85	63	89750	97,63	60	92500	99,37	58	96800	94,48	54	10050	70,19
29	22	76	92700	85	71	98500	99,09	67	10460	98,11	64	10990	90,23	60	11560	70,19
30	23	34	27500	85	32	29800	97,63	29	31750	96,16	27	33800	81,57	26	36200	70,19
31	19,25	96	14500	85	89	15480	98,68	83	16865	98,6	77	17950	87,64	72	18910	70,19
32	26	43	43150	85	40	48300	98,85	37	51450	97,02	35	54600	87,09	33	61450	70,19
33	26	52	61250	85	49	64350	96,49	44	68750	97,87	41	74500	88,03	38	79500	70,19
34	28,30	74	89250	85	71	93800	95,04	66	99750	99,73	62	10510	92,63	57	11425	70,19
35	24,27,	13	18300	85	126	20150	98,85	11	23800	97,77	103	28375	81,57	98	29750	70,19
36	24	54	47500	85	49	50750	97,27	42	56800	97,87	38	62750	89,52	33	68250	70,19
37	31	34	22500	85	32	24100	95,97	29	26750	99,37	27	29800	92,93	24	31600	70,19
38	32	51	61250	85	47	65800	99	44	71250	98,67	41	76500	89,07	38	80400	70,19
39	33	67	81150	85	61	87600	99,42	57	92100	98,28	52	97450	84,76	49	10280	70,19
40	34	41	45250	85	39	48400	95,97	36	51200	99,37	33	54700	87,09	31	58200	70,19
41	35	37	17500	85	31	21200	99,98	27	26850	92,2	23	32300	70,19			
42	36	44	36400	85	41	39750	96,49	38	42800	99,98	32	48300	82,97	30	50250	70,19
43	36	75	66800	85	69	71200	98,54	63	76400	97,87	59	81300	89,52	54	86200	70,19
44	37	82	10275	85	76	10950	99,14	70	12700	95,91	66	13680	84,11	63	14600	70,19
45	39	59	84750	85	55	91400	97,63	51	10130	99,37	47	12650	90,23	43	14275	70,19
46	39	66	94250	85	63	99500	95,49	59	10825	99,96	55	11850	93,53	50	13600	70,19
47	40	54	73500	85	51	78500	97,04	47	83600	98,67	44	88700	89,07	41	93400	70,19
48	42	41	36750	85	39	39800	95,97	37	43800	99,98	34	48500	92,93	31	53950	70,19
49	38,41,	17	26750	85	159	28970	98,15	14	31200	99,37	138	35250	94,2	121	39775	70,19
50	45	10	47800	85	74	61300	99,05	63	76800	91,32	49	91500	70,19			
51	46	83	84600	85	77	93650	98,24	72	98500	99,37	65	10460	85,84	61	11320	70,19
52	47	31	23150	85	28	27600	98,85	26	29800	99,37	24	32750	92,93	21	35200	70,19
53	43,48	39	31500	85	36	34250	97,04	33	37800	99,81	29	41250	89,07	26	44600	70,19
54	49	23	16500	85	22	17800	95,97	21	19750	99,98	20	21200	97,02	18	24300	70,19
55	52,53	29	23400	85	27	25250	98,54	26	26900	99,98	24	29400	92,2	22	32500	70,19
56	50,53	38	41250	85	35	44650	99,42	33	47800	98,28	31	51400	88,54	29	55450	70,19
57	51,54	41	37800	85	38	41250	98,24	35	45600	98,52	32	49750	85,84	30	53400	70,19
58	55,56	24	12500	85	22	13600	97,63	20	15250	99,37	18	16800	90,23	16	19450	70,19
59	56	27	34600	85	24	37500	98,85	22	41250	99,37	19	46750	87,09	17	50750	70,19
60	57	31	28500	85	29	30500	95,97	27	33250	99,98	25	38000	97,02	21	43800	70,19

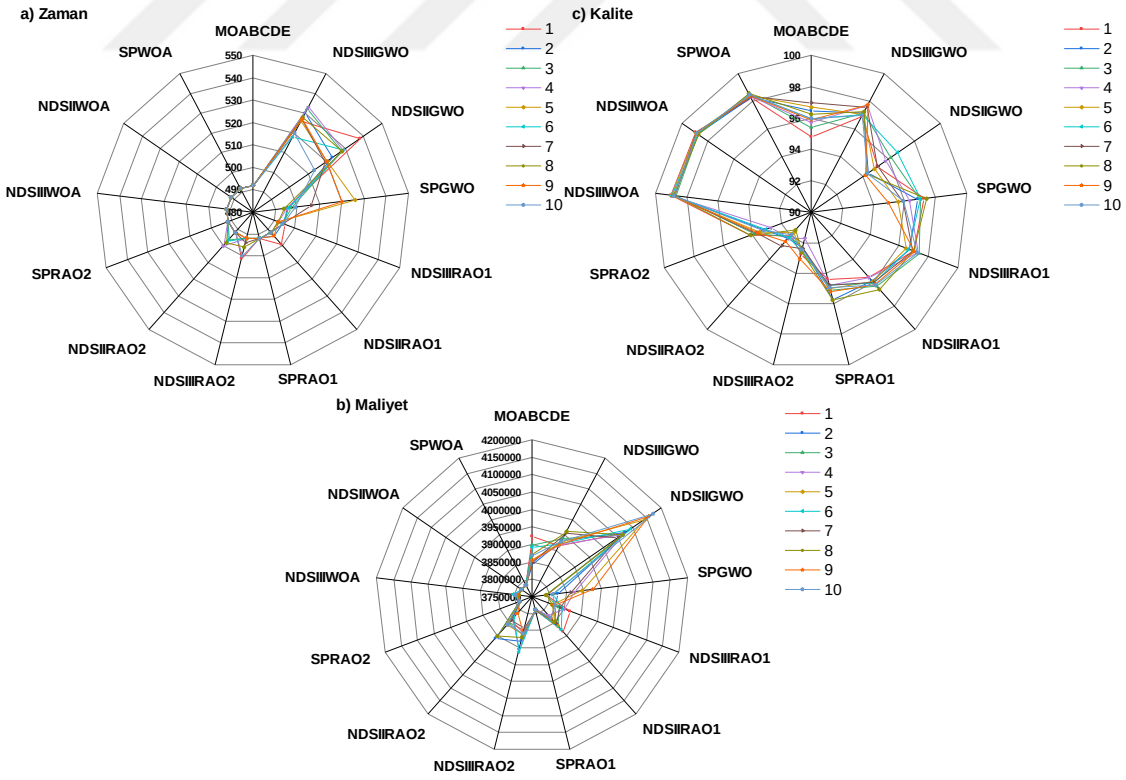
Şekil 48'de on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maksimum kalite ve minimum maliyet değerleri karşılaştırılmıştır. GWO algoritması zaman ve maliyet açısından incelendiğinde, güçlendirilmiş pareto (SP) yöntemini kullanan algoritmanın, NDSII ve NDSIII algoritmalarına kıyasla minimum zaman ve maliyet değerlerine ulaşma konusunda daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Kalite açısından bakıldığında ise, GWO algoritmasında NDSIII ile geliştirilen modelin, diğer iki yönteme göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

WOA algoritması incelendiğinde, minimum maliyete ulaşma konusunda NDSII ve SP ile geliştirilen versiyonların, NDSIII ile geliştirilen versiyonuna göre tüm bağımsız

çözümlerde optimum çözüme ulaştıkları gözlemlenmektedir. Kalite ve zaman açısından değerlendirildiğinde ise, bu üç algoritmanın benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

Rao-1 algoritmasına incelendiğinde, minimum zaman ve maliyete ulaşma konusunda SPRAO1 algoritmasının, NDSII ve NDSIII ile geliştirilen versiyonlara kıyasla tüm bağımsız çözümlerde optimum maliyet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Ancak, maksimum kalite açısından SP ile geliştirilen modelin, diğer yöntemlere göre geride kaldığı görülmüştür. Rao-2 algoritması incelendiğinde, güçlendirilmiş Pareto yöntemi ile geliştirilen modelin, kalabalık mesafe ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemlerine göre hem zaman hem de maliyet açısından tüm bağımsız çözümlerde optimum sonuçlara ulaştığı, ayrıca diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek kalite değerleri elde ettiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında yeniden kodlanan MOABCDE algoritmasının, minimum maliyeti bulma konusunda oldukça dağınık bir performans sergilediği ve SPWOA, NDSIIWOA, SPRAO1 ve SPRAO2 algoritmalarına göre geri kaldığı tespit edilmiştir. MOABCDE algoritması, zaman optimizasyonunda oldukça stabil bir performans sergilemiş olsa da maksimum kaliteye ulaşmada diğer algoritmalara göre zorlandığı görülmektedir.



Şekil 48. 60 aktiviteli TCQTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman, maliyet ve maksimum kalite değerleri

Tablo 41 incelendiğinde, GWO algoritmasının SP, NDSII ve NDSIII yöntemleriyle elde edilen pareto çözümleri gösterilmektedir. GWO algoritmasının bu üç farklı yöntemle geliştirilmiş çözümleri incelendiğinde, NDSII ile üretilen çözümlerin, SP ve NDSIII yöntemleriyle elde edilen çözümler tarafından tamamen domine edildiği görülmektedir. Özellikle, güçlendirilmiş pareto seçme ve eleme operatörü (SP) ile geliştirilen GWO algoritması, NDSIII yöntemine kıyasla zaman ve maliyet açısından daha düşük değerler üretmiştir. Ancak, her iki çözüm birbiri üzerinde tam baskınlık kuramamıştır. Tablo 42'de ise balina optimizasyon algoritmasının farklı operatörlerle geliştirilmiş çözümlerine yer verilmiştir. WOA algoritması zaman ve maliyet açısından incelendiğinde, farklı operatörlerle geliştirildiğinde bile optimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Ancak, kalabalık mesafe ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemleriyle elde edilen bazı çözümler (örneğin, 1, 2 ve 3 numaralı pareto çözümleri) SPWOA tarafından domine edilmiştir. Kalite açısından bakıldığında ise referans tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemiyle geliştirilen WOA algoritmasının, diğer operatörlere göre daha yüksek kalite değerleri elde ettiği görülmektedir. Sonuç olarak hem GWO hem de WOA algoritmaları incelendiğinde, NDSII yöntemiyle geliştirilen versiyonların SP ve NDSIII yöntemleriyle geliştirilen versiyonlara göre performans açısından geri kaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, farklı operatörlerin optimizasyon sonuçları üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Tablo 41. 60 aktiviteli TCQTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	538	4642710	86,87	497	4732845	86,82	533	4400520	91,49
	2	543	4504550	88,65	497	4725645	86,79	536	4406680	92,74
	3	546	4504795	88,91	498	4723995	87,31	540	4362000	94,05
Mal. Göre	4	667	4073560	90,13	683	3789470	85,46	651	3918000	90,02
	5	654	4076660	89,06	682	3793070	85,85	640	3930390	89,94
	6	616	4101735	90,24	681	3795620	86,08	624	3933340	88,36
Kal. Göre	7	601	4271545	95,15	574	4329675	96,99	579	4245300	97,71
	8	597	4269295	95,14	581	4254850	96,97	599	4147900	97,60
	9	596	4283355	95,11	575	4288400	96,82	588	4201000	97,57
Dengeli	10	584	4341245	93,98	584	4211150	96,18	584	4143610	95,65
	11	597	4212820	90,43	597	4072840	91,97	597	4013750	90,54
	12	607	4162310	90,69	607	4099080	95,00	607	4068810	95,73

Tablo 42. 60 aktiviteli TCQTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	492	4975390	72,41	492	4805340	85,07	492	4946190	78,04
	2	492	5056340	76,97	492	4774140	83,51	493	4975565	79,47
	3	492	5023940	74,66	493	4783340	85,37	498	4913065	82,08
Mal. Göre	4	683	3787870	85,00	683	3787870	85,00	683	3787870	85,00
	5	677	3791570	85,25	683	3791270	85,24	669	3801370	85,66
	6	682	3796520	85,40	677	3794620	85,59	683	3810530	86,22
Kal. Göre	7	588	4368600	98,99	599	4210400	98,55	600	4312200	99,03
	8	588	4361850	98,78	588	4278250	98,48	578	4396150	98,88
	9	599	4287450	98,63	581	4298000	98,38	587	4353950	98,79
Dengeli	10	495	5040440	78,44	495	4795190	85,76	501	4860150	82,26
	11	532	4437000	93,61	531	4468950	94,96	529	4458360	90,82
	12	578	4243150	96,77	576	4140650	93,24	576	4268450	97,02

Tablo 43 ve Tablo 44 incelendiğinde Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarının farklı çok amaçlı optimizasyon versiyonları ile geliştirilmiş hallerinin pareto sonuçları karşılaştırılması görülmektedir. Rao-1 algoritması ele alındığında, her üç versiyon (SP, NDSII ve NDSIII) zaman açısından benzer değerler sağlamış olsa da NDSII ile geliştirilmiş modelin ürettiği ilk üç Pareto çözümünün diğer operatörler (SP ve NDSIII) tarafından baskılandığı gözlemlenmiştir. Maliyet açısından SP operatörüyle elde edilen çözümler en düşük maliyetleri sağlarken, kalite açısından NDSIII operatörüyle geliştirilen model en yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Rao-2 algoritması incelendiğinde ise NDSII ile geliştirilen çoğu pareto çözümü, SP ve NDSIII ile geliştirilen versiyonları tarafından baskılandığı görülmektedir. Ayrıca zaman öncelikli pareto çözümleri incelendiğinde NDSIIIRAO2 algoritması tarafından üretilen pareto çözümlerinin (1., 2. ve 3. pareto), SP ile geliştirilen pareto çözümleri tarafından baskılandığı görülmektedir. Maliyet ve kalite açısından da incelendiğinde güçlendirilmiş pareto yöntemi ile geliştirilen Rao-2 algoritmasının, NDSIII ile geliştirilen versiyona göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. Tüm algoritmalara bakıldığında genel olarak NDSII ile geliştirilen versiyonların, SP ve NDSIII ile geliştirilen versiyonlarına göre oldukça geri kaldığı görülmektedir.

Tablo 43. 60 aktiviteli TCQTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	492	4894865	76,92	492	4887880	80,98	492	4883820	81,03
	2	492	4932890	78,36	494	4933690	82,24	496	4805165	79,90
	3	493	4929090	77,22	494	4896115	82,21	496	4796665	78,78
Mal. Göre	4	683	3820570	86,66	683	3787870	85,00	683	3848480	87,34
	5	683	3825520	86,68	682	3790270	85,39	671	3855130	86,21
	6	681	3838620	87,81	683	3792620	85,48	683	3855330	87,72
Kal. Göre	7	607	4200710	95,52	593	4230405	95,75	589	4303475	97,25
	8	613	4181690	95,42	589	4362475	94,91	603	4282425	97,25
	9	621	4168260	95,29	580	4335060	94,41	604	4263875	97,15
Dengeli	10	495	4843965	78,82	495	4844340	82,31	500	4902070	81,87
	11	532	4501280	88,36	532	4472940	88,73	532	4547500	92,40
	12	576	4237740	91,63	578	4120995	89,47	577	4099690	87,08

Tablo 44. 60 aktiviteli TCQTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	492	4871440	77,33	492	4861580	79,75	492	4841430	74,99
	2	492	4831040	76,36	492	4843180	77,96	492	4896890	76,37
	3	492	4847140	76,56	494	4822780	77,23	492	4841430	74,99
Mal. Göre	4	683	3812320	84,51	683	3787870	85,00	683	3858490	83,93
	5	682	3817220	84,91	681	3789870	85,18	675	3873590	84,55
	6	680	3822970	85,18	680	3791820	85,47	679	3876850	84,90
Kal. Göre	7	610	4290350	92,49	607	4317625	94,13	595	4362300	93,07
	8	647	4110715	91,98	628	4159975	93,76	555	4399875	92,48
	9	632	4105430	91,78	607	4271770	93,49	624	4324750	91,77
Dengeli	10	495	4838740	77,10	495	4809530	79,21	495	4846440	78,80
	11	532	4452890	82,69	532	4544300	88,84	532	4438555	82,87
	12	578	4253580	88,77	578	4206295	89,32	578	4154770	87,78

Bir sonraki bölümde performans metrikleri açısından ortalama HV ölçütüne bakıldığında en yüksek değere sahip olan NDSIIIWOA algoritması olarak görülmektedir. Literatürde Tran vd. (2015) ile Son ve Tri (2024) yaptıkları çalışmalarda MOABCDE ve FDA algoritmaları için en iyi bağımsız çözüm yerine, tüm çözümler arasından elde edilen

en iyi sonuçlar raporlanmıştır. Tablo 45'te, NDSIIIWOA algoritması tarafından üretilen pareto çözümlerini, literatürdeki MOABCDE ve FDA algoritmalarının sunduğu pareto çözümleri ile karşılaştırmaktadır. Bu çözümler incelendiğinde, NDSIIIWOA algoritmasının %40 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile MOSGO algoritması ile benzer sonuçları elde ettiği görülmektedir. Tablo 46'da, NDSIIIWOA algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait pareto çözümleri opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 49'da pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 45. 60 aktiviteli TCQTP problemi için NDSIIIWOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması

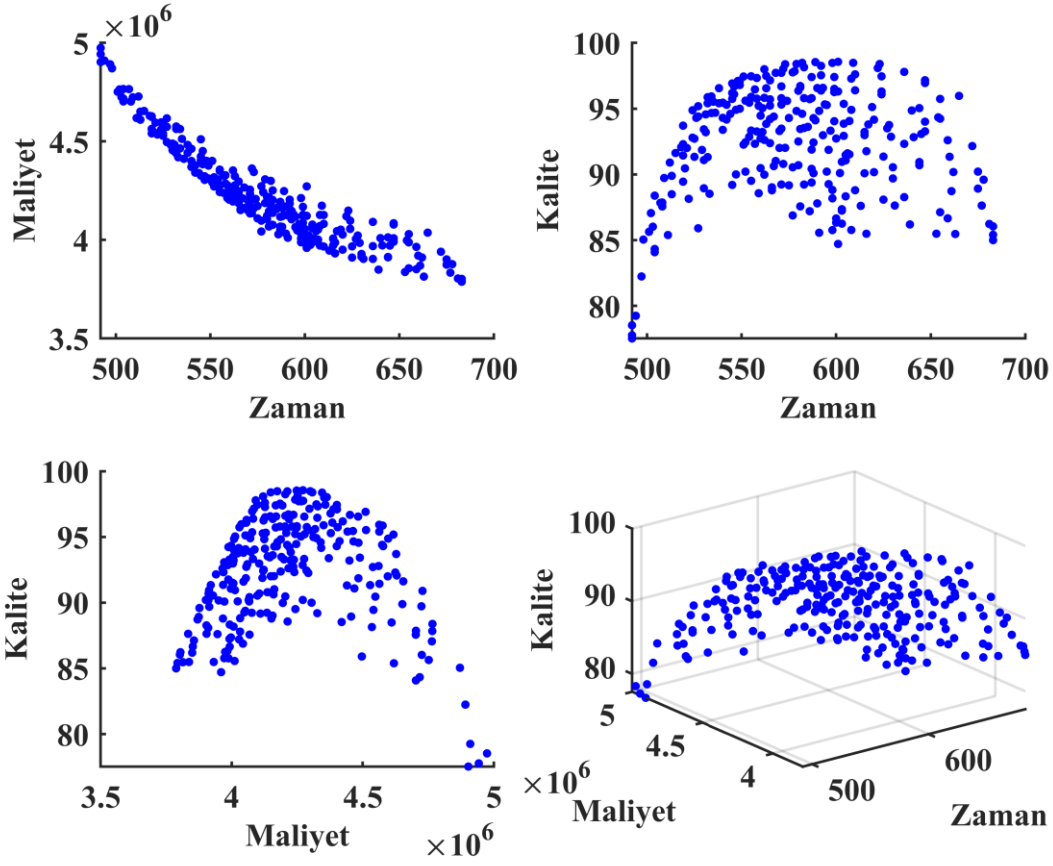
MOABCDE (2015)			MOABCDE (Bu çalışma)			FDA (2024)			NDSIIIWOA		
Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
495	4752390	85.93	492	4857690	81,46	492	4791110	77.15	492	4946190	78,04
519	4607880	78.48	492	4837140	81,11	492	4876970	75.77	493	4975565	79,47
534	4611380	80.10	492	4823040	81,09	492	4806920	75.10	498	4913065	82,08
683	3787870	85.00	675	3842530	87,30	683	3787870	85.00	683	3787870	85,00
681	3798020	85.83	675	3856830	88,00	683	3788370	85.25	669	3801370	85,66
673	3801470	85.63	670	3869895	86,63	683	3789470	85.24	683	3810530	86,22
603	4286750	99.30	580	4373400	96,46	613	4256850	98.65	600	4312200	99,03
616	4260300	98.98	598	4257925	96,17	605	4233700	98.56	578	4396150	98,88
586	4326050	98.87	608	4228150	95,92	608	4238525	98.41	587	4353950	98,79
498	4757240	86.17	498	4743175	82,03	511	4672330	80.60	501	4860150	82,26
565	4409675	90.08	565	4268745	91,42	498	4757240	86.18	529	4458360	90,82
578	4229600	94.82	578	4185800	90,18	495	4752390	85.93	576	4268450	97,02

Tablo 46. 18 Aktivite TCQTP için NDSIIIWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K
Minimum Zaman	1	4,4,4,3,4,4,1,4,4,5,5,5,4,4,4,5,4,4,1,4,1,5,4,4,5,4,4,2,5,2,5,1,4,5,5,4,5,1,5,2,4,4,5,5,1,4,4,5,5,4,2,5,1,5,5,4,5,2,5,5	492	4946190	78,04
	2	3,4,4,3,4,3,3,4,5,5,5,5,4,4,3,3,4,3,3,4,3,5,3,5,5,3,5,4,5,5,5,3,5,4,5,4,5,4,4,3,4,4,5,5,3,4,4,5,5,4,4,4,3,5,5,5,5,3,5,5	493	4975565	79,47
	3	3,4,3,3,4,3,3,4,5,5,5,5,4,4,3,3,4,3,3,3,3,4,3,5,5,3,4,3,5,5,5,3,5,4,5,3,5,3,3,3,4,3,5,4,3,4,3,5,5,4,4,4,3,5,5,5,5,2,5,5	498	4913065	82,08
Minimum Maliyet	4	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	683	3787870	85,00
	5	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	669	3801370	85,66
	6	2,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	683	3810530	86,22

Tablo 46'nın devamı

Maksimum Kalite	7	2,2,2,2,2,2,2,2,3,3,3,2,2,2,2,3,2,2,2,2,3,3,3,3,3,2,2,2,3,2,2,3,3,3 ,2,3,3,3,3,2,2,3,2,3,3,3,3,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,2,3	600	4312200	99,03
	8	2,2,2,2,2,2,2,2,3,3,3,3,2,2,2,3,2,2,2,2,3,3,3,3,3,2,2,2,3,2,2,3,3,3 ,3,3,3,3,3,2,2,3,2,3,3,3,3,3,3,4,2,3,3,3,4,3,2,3,3,2,3	578	4396150	98,88
	9	2,2,2,2,2,2,2,2,3,3,3,2,2,2,2,3,2,2,2,2,3,3,3,3,3,2,2,2,3,2,2,3,2,3 ,2,3,3,3,3,3,2,3,3,2,3,3,3,3,3,3,4,2,3,3,3,3,3,3,2,3,3,2,3	587	4353950	98,79



Şekil 49. NDSIIIWOA tarafından üretilmiş 60 aktivite zaman-maliyet-kalite pareto grafiği

3.3.4. 60 Aktivite TCQTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 47'de, 60 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemleri için geliştirilen algoritmaların, MOABCDE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir. Tablo incelendiğinde, MOABCDE algoritmasının, NDSIIGWO algoritmasının çözümlerinin ortalama olarak %64'ünü baskıladığı, ancak NDSIIGWO algoritmasının MOABCDE'nin ürettiği çözümlerin yalnızca %0.6'sını baskılayabildiği görülmektedir. SPGWO algoritmasıyla yapılan karşılaştırmada ise,

MOABCDE'nin çözümlerin yalnızca %0.46'sını baskıladığı, buna karşın SPGWO'nun MOABCDE çözümlerinin %74'ünü baskıladığı dikkat çekmektedir. NDSIIIGWO algoritması incelendiğinde, MOABCDE'nin çözümlerin sadece %0.60'ını baskıladığı, öte yandan NDSIIIGWO'nun MOABCDE çözümlerinin %59.86'sını baskıladığı gözlenmektedir.

MOABCDE algoritması, NDSIIWOA algoritmasının çözümlerinin %25.74'ünü baskılarken, NDSIIWOA ise MOABCDE çözümlerinin %41.69'unu baskılamıştır. Balina algoritmasının SP versiyonu incelendiğinde, MOABCDE'nin çözümlerin sadece %3.29'unu baskıladığı, öte yandan SPWOA'nın MOABCDE çözümlerinin %82.36'sını baskıladığı gözlemlenmektedir. NDSIIIWOA algoritması ile yapılan karşılaştırmada, MOABCDE algoritması çözümlerin %5.11'ini baskılarken, NDSIIIWOA ise MOABCDE çözümlerinin %73.53'ünü baskılamıştır.

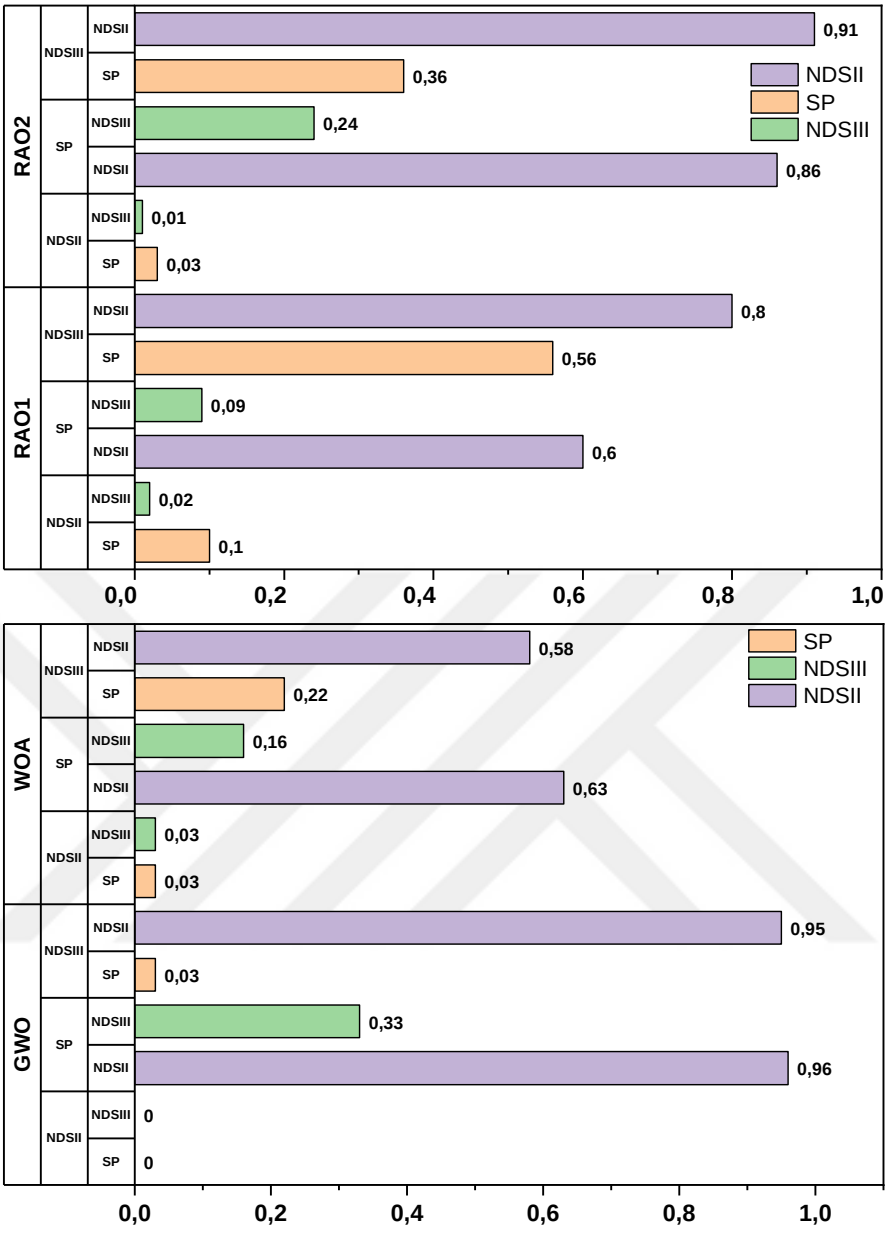
Rao-1 algoritmasının farklı versiyonları incelendiğinde, MOABCDE algoritması NDSIIRAO1 çözümlerinin %59.71'ini baskılarken, SPRAO1 versiyonunda bu oran %26.79 olarak gözlenmektedir. Buna karşılık, NDSIIIRAO1'in MOABCDE çözümlerinin %69.85'ini, SPRAO1'in ise %37.89'unu baskıladığı tespit edilmiştir. Rao-2 algoritmasının farklı versiyonları incelendiğinde, MOABCDE algoritmasının NDSIIRAO2 serisindeki çözümlerin %86.64'ünü baskıladığı, buna karşılık NDSIIRAO2'nin MOABCDE çözümlerinin yalnızca %0.92'sini baskılayabildiği görülmektedir. SPRAO2 versiyonuna gelindiğinde ise, MOABCDE çözümlerinin %46.66'sını baskılarken, SPRAO2 yalnızca %11.63'ünü baskılayabilmiştir. NDSIIIRAO2 sonuçlarına bakıldığında ise MOABCDE çözümlerinin %27.88'ini baskılarken, NDSIIIRAO2'nin %15.28'ini baskıladığı gözlemlenmektedir.

Tüm algoritmalar arasında, özellikle SPGWO, NDSIIIGWO, SPWOA, NDSIIIWOA, SPRAO1 ve NDSIIRAO1 algoritmalarının MOABCDE'ye karşı daha üstün performans gösterdiği, diğer yandan MOABCDE'nin NDSIIGWO, NDSIIRAO2 ve SPRAO2 versiyonlarına karşı oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Bu sonuçlar, SP ve NDSIII operatörleri ile geliştirilen algoritma versiyonlarının genel olarak daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Tablo 47. 60 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOABCDE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MOABCDE, NDSIIGWO)	1,0000	0,0400	0,6459	0,2657
C(NDSIIGWO, MOABCDE)	0,4000	0,0033	0,0608	0,0781
C(MOABCDE, SPGWO)	0,0567	0,0000	0,0046	0,0120
C(SPGWO, MOABCDE)	0,9667	0,3033	0,7641	0,1625
C(MOABCDE, NDSIIIGWO)	0,0200	0,0000	0,0060	0,0054
C(NDSIIIGWO, MOABCDE)	0,6633	0,4867	0,5986	0,0373
C(MOABCDE, NDSIIWOA)	0,3400	0,1433	0,2574	0,0385
C(NDSIIWOA, MOABCDE)	0,5267	0,2800	0,4169	0,0599
C(MOABCDE, SPWOA)	0,1133	0,0000	0,0329	0,0298
C(SPWOA, MOABCDE)	0,9633	0,6267	0,8236	0,0713
C(MOABCDE, NDSIIIWOA)	0,1233	0,0200	0,0511	0,0212
C(NDSIIIWOA, MOABCDE)	0,8367	0,5967	0,7353	0,0515
C(MOABCDE, NDSIIRAO1)	0,9733	0,1600	0,5971	0,1835
C(NDSIIRAO1, MOABCDE)	0,5533	0,0033	0,1262	0,1070
C(MOABCDE, SPRAO1)	0,4800	0,0300	0,2679	0,1039
C(SPRAO1, MOABCDE)	0,7667	0,1733	0,3789	0,1333
C(MOABCDE, NDSIIIRAO1)	0,1667	0,0067	0,0558	0,0306
C(NDSIIIRAO1, MOABCDE)	0,8600	0,4567	0,6985	0,0817
C(MOABCDE, NDSIIRAO2)	1,0000	0,4000	0,8664	0,1286
C(NDSIIRAO2, MOABCDE)	0,0867	0,0033	0,0092	0,0123
C(MOABCDE, SPRAO2)	0,6767	0,1833	0,4666	0,1122
C(SPRAO2, MOABCDE)	0,3233	0,0167	0,1163	0,0713
C(MOABCDE, NDSIIIRAO2)	0,4200	0,1233	0,2788	0,0650
C(NDSIIIRAO2, MOABCDE)	0,2600	0,0533	0,1528	0,0486

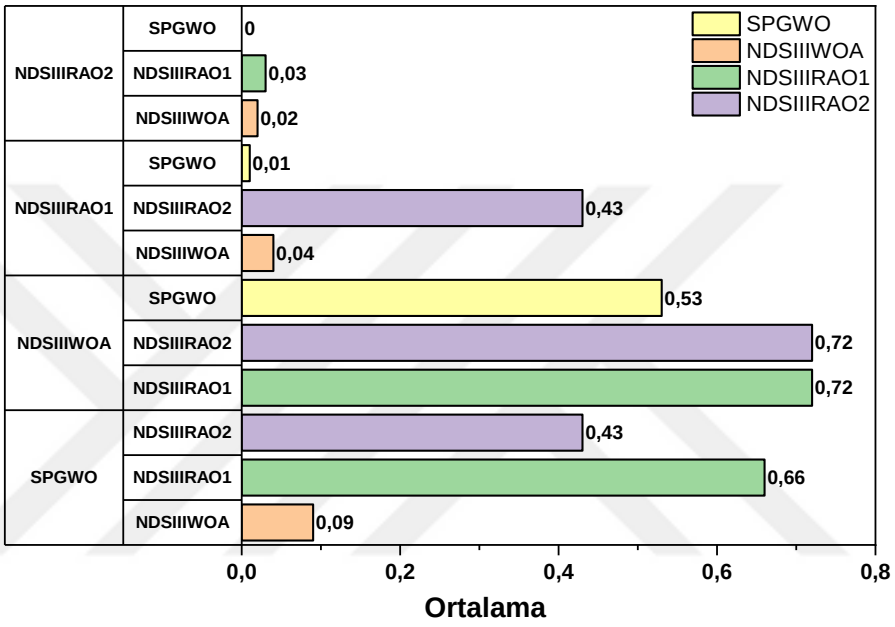
Şekil 50'de, SP,NDSII ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak oluşturulan algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırması sunulmaktadır. Tüm algoritmalar incelendiğinde NDSII ile geliştirilen yöntemin diğer algoritmalara göre oldukça geri kaldığı görülmektedir. Gri kurt algoritması incelendiğinde, SPGWO algoritması NDSIIIGWO algoritmasının %33'ünü baskılarken %3'ü NDSIIIGWO tarafından baskılanmıştır. Rao serileri ve balina algoritmasına bakıldığında ise NDSIII ile geliştirilen versiyonun, SP ile geliştirilen versiyonlara göre ortalama baskınlık seviyesinde daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 50. 60 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

Şekil 51'de her bir algoritmanın en iyi çözümlerinin C-metrik kıyaslamaları sunulmaktadır. SPGWO algoritmasının, NDSIIIWOA çözümlerinin %9'unu, NDSIIIRAO1 çözümlerinin %66'sını ve NDSIIIRAO2 çözümlerinin %43'ünü baskıladığı görülmektedir. Öte yandan, SPGWO algoritması NDSIIIWOA tarafından %53 oranında baskılanırken, NDSIIIRAO1 tarafından yalnızca %1 oranında baskılanmış ve NDSIIIRAO2 tarafından hiç baskılanmamıştır. NDSIIIWOA algoritmasının performansına bakıldığında, NDSIIIRAO1 ve NDSIIIRAO2 algoritmalarının her ikisini de %72 oranında baskıladığı anlaşılmaktadır.

Diğer yandan, NDSIIIWOA algoritması, NDSIIIRAO1 tarafından %4 ve NDSIIIRAO2 tarafından %2 oranında baskılanmıştır. RAO algoritmaları arasında yapılan kıyaslamada, NDSIIIRAO1'in NDSIIIRAO2 çözümlerinin %43'ünü baskıladığı, ancak NDSIIIRAO2'nin NDSIIIRAO1 çözümlerinin yalnızca %3'ünü baskılayabildiği gözlemlenmiştir. Genel olarak, baskınlık ilişkilerine bakıldığında, NDSIIIWOA'nın diğer algoritmalara göre daha üstün olduğu görülmektedir.



Şekil 51. 60 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Algoritmaların performans değerlendirmesinde yalnızca C-metrik kullanımı yanıltıcı sonuçlar doğurabilir. Çünkü bazı algoritmalar, çözüm uzayının belirli bir bölgesinde yoğunlaşarak diğer algoritmalara karşı sayısal açıdan yanıltıcı bir üstünlük elde edebilmektedir. Bu nedenle, daha kapsamlı ve güvenilir bir analiz için çözümlerin çözüm uzayındaki dağılımı, çeşitliliği ve kapsadığı alanın büyüklüğü gibi performans kriterlerinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece, farklı algoritmaların optimizasyon yeteneklerinin daha sağlıklı bir şekilde karşılaştırılması mümkün kılınmaktadır. Tablo 48'de hiper hacim ve yayılım değerleri yer alırken, Tablo 49'de ortalama ideal mesafe sonuçları bulunmaktadır. Her metrik için en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 48. 60 aktivite TCQTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOABCDE	0,8428	0,7680	0,8157	0,0227	0,5656	0,7277	0,6199	0,0435
NDSIIGWO	0,706	0,628	0,666	0,027	0,9174	1,0289	0,9586	0,0371
NDSIIRAO1	0,832	0,772	0,806	0,017	0,5383	0,6672	0,5995	0,0394
NDSIIRAO2	0,722	0,675	0,703	0,016	0,5796	0,7822	0,6918	0,0541
NDSIIWOA	0,894	0,878	0,889	0,005	1,0861	1,2404	1,1892	0,0481
SPGWO	0,903	0,774	0,857	0,047	0,3479	0,9506	0,5201	0,1892
SPRAO1	0,849	0,819	0,832	0,009	0,3460	0,4519	0,4177	0,0318
SPRAO2	0,797	0,771	0,787	0,009	0,3766	0,4825	0,4380	0,0388
SPWOA	0,934	0,918	0,927	0,005	0,2173	0,2906	0,2549	0,0234
NDSIIIGWO	0,842	0,815	0,827	0,009	0,9875	1,1073	1,0323	0,0399
NDSIIIRAO1	0,902	0,847	0,875	0,014	0,8768	0,9714	0,9159	0,0294
NDSIIIRAO2	0,783	0,753	0,768	0,010	0,8133	0,9377	0,8797	0,0417
NDSIIIWOA	0,941	0,926	0,934	0,005	0,9166	1,0863	0,9807	0,0585

Tablo 49. 60 aktivite TCQTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOABCDE	0,8958	0,9511	0,9269	0,0183
NDSIIGWO	0,9283	1,0125	0,9607	0,0254
NDSIIRAO1	0,949	0,9891	0,9668	0,0134
NDSIIRAO2	0,8243	0,8749	0,8479	0,0161
NDSIIWOA	0,9889	1,012	1,0037	0,0072
SPGWO	0,9593	1,0163	0,9852	0,0192
SPRAO1	0,9226	0,946	0,9344	0,0079
SPRAO2	0,8463	0,8872	0,8673	0,0151
SPWOA	0,9807	1,0222	1,0011	0,0142
NDSIIIGWO	0,9777	1,0348	1,0022	0,0164
NDSIIIRAO1	0,8995	0,9516	0,9225	0,0188
NDSIIIRAO2	0,7907	0,8084	0,8004	0,0062
NDSIIIWOA	0,8958	0,9511	0,9269	0,0183

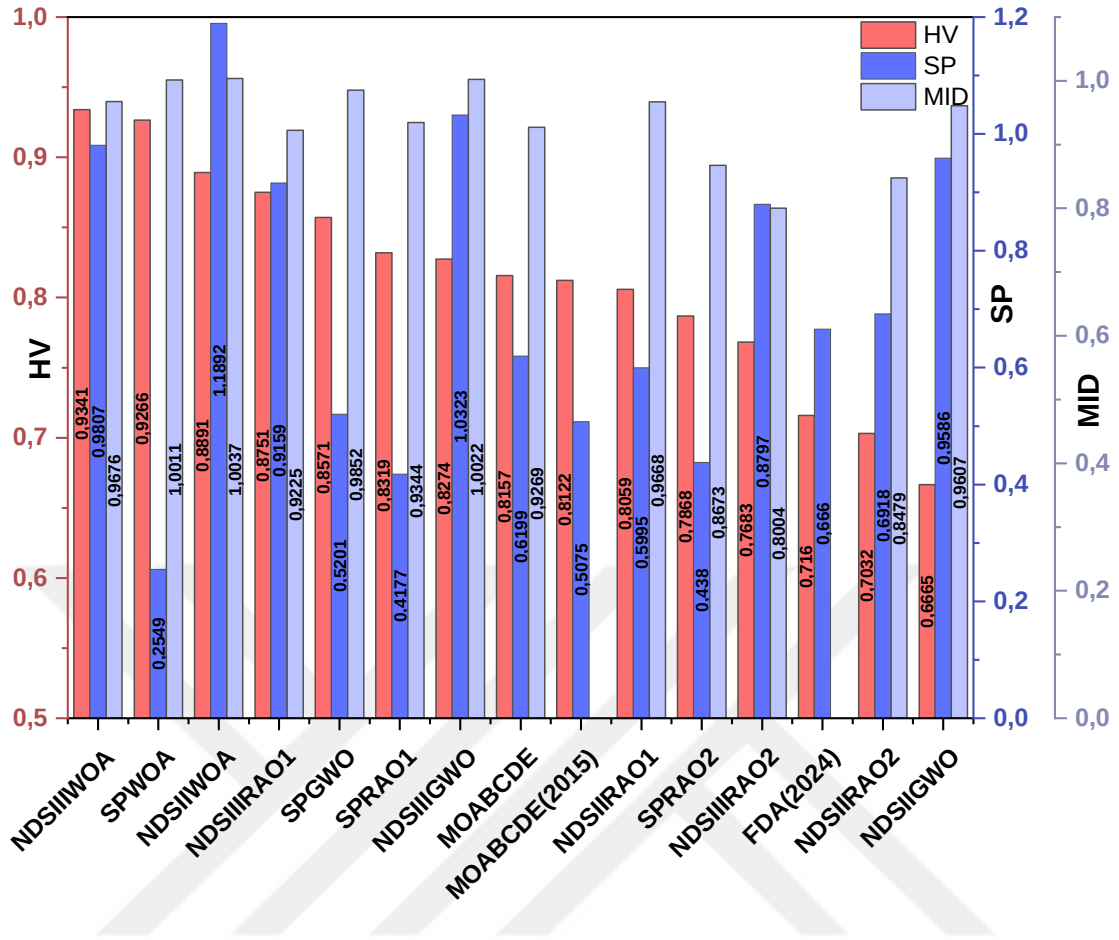
Tablo 50'de tüm performans metriklerinin ortalama sonuçları, algoritmaların hiper hacim (HV) değerlerine göre azalan sırada sunulmakta, Şekil 52 aracılığıyla görselleştirilmiştir. Karşılaştırma ölçütü olarak kullanılan MOABCDE algoritması, literatürde Tran vd. (2015) tarafından önerilen performans ölçütlerinde benzer sonuçlar vermiş, böylece karşılaştırmanın doğruluğu desteklenmiştir. Tablo 50 incelendiğinde, NDSIIWOA algoritmasının HV (hiper hacim) performans ölçütü açısından 0.9341 değeri ile diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu algoritmayı, 0.9266 HV değeriyle SPWOA ve 0.8891 değeriyle NDSIIWOA takip etmektedir. Pareto cephelerinin

yayılımı incelendiğinde, en iyi sonucun 0.2549 değeriyle SPWOA algoritması tarafından elde edildiği gözlemlenmiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIRAO2 algoritmasının elde ettiği pareto çözümlerinin (0.8004) daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen SPWOA, SPGWO ve SPRAO1 algoritmalarının performansı, Tran vd. (2015) tarafından önerilen MOABCDE algoritmasıyla karşılaştırıldığında hem HV hem de yayılım (SP) metrikleri açısından daha üstün sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. NDSIII algoritması tarafından üretilen çözümlerin çeşitliliği tatmin edici seviyede olmasına rağmen, güçlendirilmiş pareto yaklaşımı kullanılarak geliştirilen algoritmaların elde ettiği pareto çözümlerinin daha etkin bir yayılım gösterdiği tespit edilmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın farklı üstün yönlere sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, daha önce de vurgulandığı gibi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde hiper hacim (HV) ölçütü, üretilen pareto çözümlerinin kalitesini (gerçek pareto sınırına yakınlık açısından) ve çeşitliliğini (hedef uzaydaki kapsamını) birlikte değerlendirir. Yayılım (SP) metriği ise çözümlerin pareto sınırı boyunca homojen bir dağılıma sahip olmasını ölçer, ancak çözümlerin gerçek pareto sınırına yakınlığıyla (yakınsama) doğrudan ilgilenmez.

Tablo 50. 60 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
NDSIIIWOA	90000	0,9341	0,9807	0,9676
SPWOA	90000	0,9266	0,2549	1,0011
NDSIIWOA	90000	0,8891	1,1892	1,0037
NDSIIIRAO1	90000	0,8751	0,9159	0,9225
SPGWO	90000	0,8571	0,5201	0,9852
SPRAO1	90000	0,8319	0,4177	0,9344
NDSIIIGWO	90000	0,8274	1,0323	1,0022
MOABCDE*	150000	0,8157	0,6199	0,9269
MOABCDE (2015)	150000	0,8122	0,5075	-
NDSIIRAO1	90000	0,8059	0,5995	0,9668
SPRAO2	90000	0,7868	0,438	0,8673
NDSIIIRAO2	90000	0,7683	0,8797	0,8004
FDA(2024)	18750	0,7160	0,666	-
NDSIIRAO2	90000	0,7032	0,6918	0,8479
NDSIIGWO	90000	0,6665	0,9586	0,9607
*Bu Çalışma				



Şekil 52. 60 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.3.5. 180 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Ödünleşim Problemi

Bu çalışma kapsamında, çok amaçlı optimizasyonda kullanılan operatörlerin küçük ve orta ölçekli zaman-maliyet-kalite problemlerinin yanı sıra büyük ölçekli inşaat projelerine olan etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla, Tablo 29'de opsiyonları ile verilen 18 aktiviteli zaman-maliyet-kalite problemi, 10 kat artırılarak 180 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. 180 aktiviteli zaman-maliyet problemi, toplamda 5,03298E+94 farklı proje tamamlanma kombinasyonu içermektedir. Tüm algoritmalar 92 popülasyon, 400 iterasyon ile çözülmüştür.

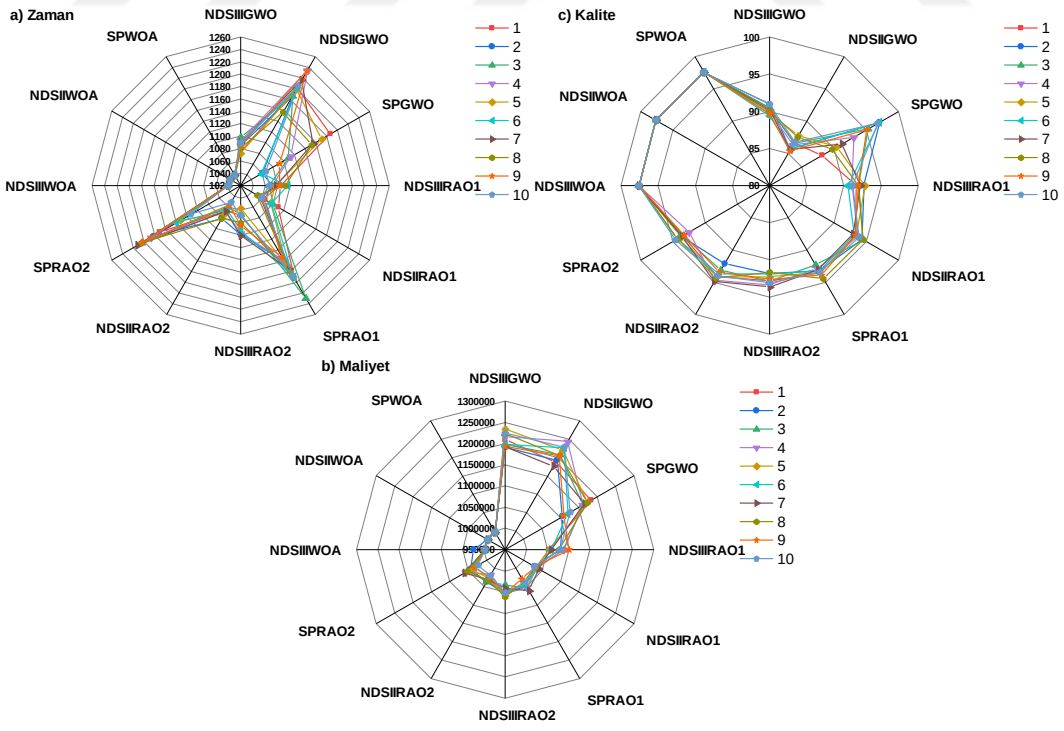
Şekil 53'te on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maksimum kalite ve minimum maliyet değerleri karşılaştırılmıştır. GWO algoritması değerlendirildiğinde, zaman açısından NDSIII versiyonunun diğer versiyonlara göre daha yüksek değerler verdiği görülmektedir. Kalite parametresinde NDSIII ve SP versiyonları,

NDSII'ye göre daha başarılı sonuçlar üretmiş, özellikle NDSIIIGWO daha kararlı, SPGWO ise daha dağınık bir performans sergilemiştir. Maliyet optimizasyonunda SPGWO diğer versiyonlara göre daha iyi olsa da, GWO'nun tüm versiyonları diğer algoritmalara kıyasla yüksek maliyetler üreterek dezavantajlı konumda kalmıştır.

WOA algoritması, zaman ve kalite parametreleri açısından incelendiğinde ise üç versiyonun da benzer performans gösterdiği ve aralarında belirgin bir fark olmadığı anlaşılmaktadır. Tüm bağımsız çözümlerde WOA algoritması zaman, maliyet ve kalite açısından daha stabil ve optimum çözümlere ulaştığı görülmektedir.

Rao-1 algoritması incelendiğinde, özellikle zaman ve maliyet optimizasyonu konusunda NDSIIRAO1 versiyonunun üstün performans gösterdiği gözlenmektedir. Kalite değerleri incelendiğinde ise SPRAO1 versiyonunun diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerleri sağladığı görülmektedir.

Rao-2 algoritması incelendiğinde ise NDSII ve NDSIII ile geliştirilen versiyonların, güçlendirilmiş pareto yöntemi ile geliştirilen Rao-2 algoritmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Maksimum kalite ve minimum maliyet değerleri incelendiğinde ise üç operatöründe benzer davranışlar sergilediği görülmektedir.



Şekil 53. 180 aktiviteli TCQTP için on bağımsız çözümde elde edilen minimum zaman, maliyet ve maksimum kalite değerleri

Tablo 51 ve Tablo 52'de her bir bağımsız koşu sonunda elde edilen en yüksek hiper hacim değerine göre seçilen bağımsız çözümlerin pareto sonuçları sırasıyla GWO ve WOA algoritmaları için gösterilmektedir. Tablo 51'de gri kurt algoritmasının NDSII ile geliştirilen modelindeki pareto sonuçlarının büyük bir kısmının SP ve NDSIII ile geliştirilen versiyonlar tarafından domine edildiği görülmektedir. Zaman, maliyet ve kalite uç değerlerine ulaşmada, SP ile geliştirilen GWO algoritması diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar verirken, dengeli çözümler üretme konusunda NDSIII ile geliştirilen gri kurt algoritmasının SP ile geliştirilen versiyona üstünlük sağladığı gözlemlenmiştir. Tablo 52'de ise balina algoritmasının tüm versiyonlarının minimum zaman ve maliyet ile maksimum kalite değerlerine ulaşmada başarılı olduğu görülmektedir. Ancak dengeli çözümler incelendiğinde, NDSII ve NDSIII ile geliştirilen versiyonların, SP ile geliştirilen versiyon tarafından domine edildiği görülebilmektedir.

Tablo 51. 180 aktiviteli TCQTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	1217	1387428	83,90	1061	1678423	97,03	1087	1403468	86,93
	2	1218	1377131	83,38	1061	1667823	96,75	1090	1411951	88,12
	3	1219	1418517	84,52	1064	1655858	96,42	1092	1415394	88,48
Mal. Göre	4	1352	1176681	77,15	1337	1106560	77,83	1359	1197621	77,31
	5	1333	1187631	78,61	1314	1112290	78,26	1349	1202179	77,75
	6	1325	1188108	78,60	1314	1117790	78,42	1216	1203689	81,28
Kal. Göre	7	1226	1435995	85,52	1061	1678423	97,03	1124	1421438	89,39
	8	1238	1420661	85,05	1066	1672513	96,81	1094	1441616	89,19
	9	1368	1388135	85,04	1061	1667823	96,75	1114	1420318	89,04
Dengeli	10	1291	1231708	79,67	1291	1222708	81,02	1231	1221531	82,29
	11	1300	1382294	84,91	1203	1350858	84,41	1129	1314498	85,59
	12	1368	1388135	85,04	1237	1343028	84,94	1168	1255178	85,15

Tablo 52. 180 aktiviteli TCQTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	1040	1685700	97,55	1040	1688200	97,63	1040	1688200	97,63
	2	1040	1688200	97,63	1040	1683200	97,47	1044	1625000	95,12
	3	1040	1688200	97,63	1040	1639700	95,96	1047	1649840	96,42
Mal. Göre	4	1690	997400	65,00	1690	997400	65,00	1690	997400	65,00
	5	1675	1000452	65,29	1673	1001176	65,32	1660	1007602	65,98
	6	1654	1004060	65,64	1672	1004990	65,74	1640	1066780	67,99
Kal. Göre	7	1040	1688200	97,63	1040	1688200	97,63	1040	1688200	97,63
	8	1040	1685700	97,55	1040	1683200	97,47	1096	1638505	96,58
	9	1049	1666870	96,88	1041	1677950	97,29	1058	1646800	96,43
Deng.	10	1238	1292960	82,44	1222	1242840	83,05	1289	1265706	82,84
	11	1444	1110710	75,12	1381	1100198	75,39	1409	1134244	73,03
	12	1464	1093250	71,16	1440	1084530	73,91	1508	1101090	73,06

Tablo 53 ve Tablo 54'te sırasıyla Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarına ait pareto sonuçları gösterilmektedir. Tablo 53 incelendiğinde, NDSII ile geliştirilen versiyonun zaman ve maliyet açısından daha optimum sonuçlara ulaştığı görülmektedir. Ancak pareto sonuçları değerlendirildiğinde, NDSIII ile geliştirilen algoritmanın hiçbir sonucunun diğer algoritmalar tarafından domine edilemediği anlaşılmaktadır. Öte yandan, SP ile geliştirilen Rao-1 algoritmasının pareto sonuçlarının büyük bir kısmı diğer algoritmalar tarafından domine edilmektedir. Ayrıca, NDSII ve SP ile geliştirilen dengeli çözümlerin NDSIII tarafından domine edildiği tespit edilmiştir. Tablo 54 incelendiğinde, NDSIII ile geliştirilen Rao-2 algoritmasının uç değerleri yakalamada diğer versiyonlara göre geride kaldığı, ancak dengeli çözümler açısından diğer algoritmalara üstünlük sağladığı görülmektedir.

Tablo 53. 180 aktiviteli TCQTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	1059	1610600	92,24	1153	1641300	92,91	1085	1389463	84,40
	2	1068	1620690	92,84	1155	1632120	92,61	1086	1473263	87,41
	3	1073	1604658	92,29	1159	1650370	93,23	1086	1371525	84,25
Mal. Göre	4	1589	1028745	69,23	1574	1029890	69,57	1481	1052691	71,87
	5	1555	1031798	69,05	1532	1035080	70,01	1481	1056539	72,15
	6	1603	1032070	69,72	1559	1039465	70,29	1292	1060673	72,49
Kal. Göre	7	1094	1636320	93,88	1161	1659258	93,94	1271	1569158	91,64
	8	1094	1627620	93,21	1160	1654690	93,74	1259	1571524	91,54
	9	1068	1620690	92,84	1164	1645940	93,33	1127	1536528	91,11
Deng.	10	1376	1138238	74,21	1373	1146808	75,65	1366	1126304	75,68
	11	1451	1095505	72,08	1462	1080753	72,72	1344	1074650	73,23
	12	1340	1175740	76,43	1411	1178650	76,23	1268	1170793	78,87

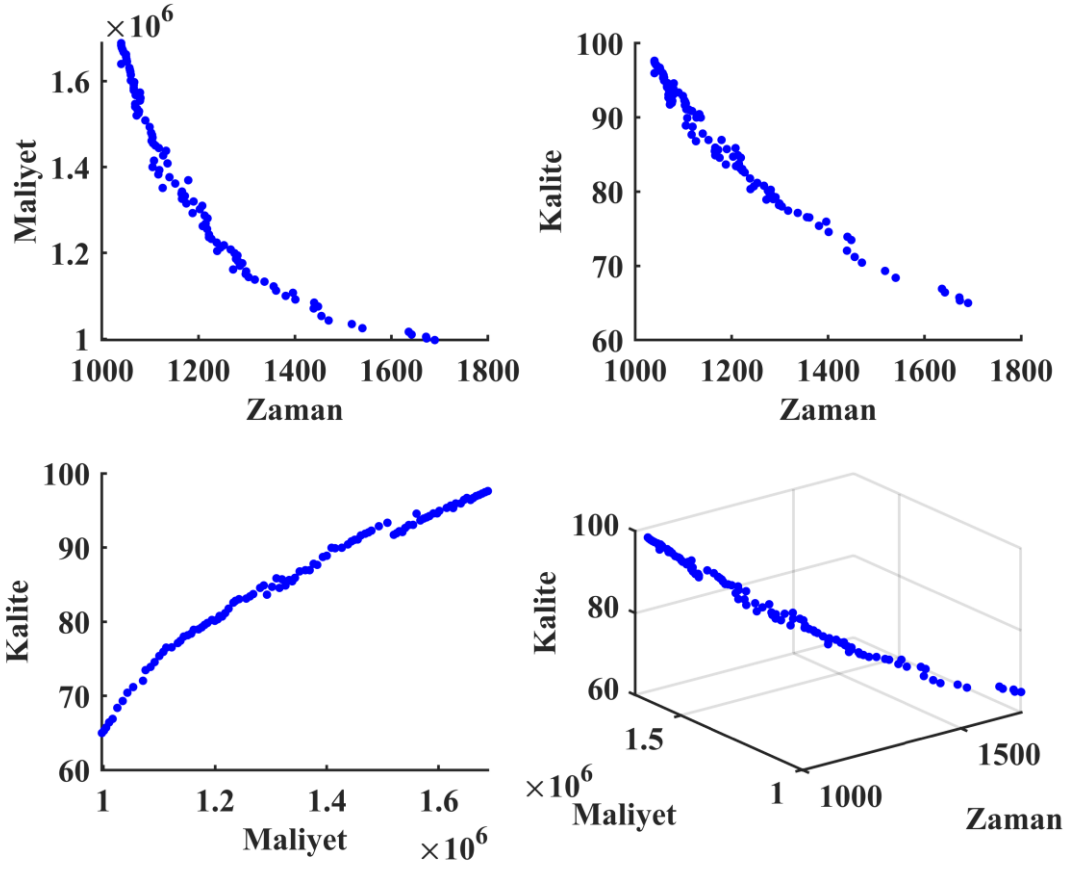
Tablo 54. 180 aktiviteli TCQTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
Zam. Göre	1	1069	1632600	93,07	1068	1530200	89,18	1205	1616435	92,09
	2	1069	1632600	93,07	1074	1519950	87,82	1210	1553703	89,65
	3	1077	1642900	93,90	1080	1462150	86,16	1211	1610450	91,88
Mal. Göre	4	1620	1017460	67,89	1431	1051670	70,48	1465	1046610	70,72
	5	1619	1019390	68,12	1549	1051940	70,75	1459	1051960	71,54
	6	1616	1023490	68,45	1543	1052700	70,82	1451	1058998	72,28
Kal. Göre	7	1079	1659850	94,71	1174	1616710	93,11	1245	1640580	93,47
	8	1079	1657950	94,30	1217	1597288	92,83	1216	1630610	92,99
	9	1077	1642900	93,90	1162	1611773	92,53	1222	1625878	92,89
Deng.	10	1272	1541263	88,81	1256	1353858	82,42	1268	1347418	83,70
	11	1330	1237888	79,77	1345	1256958	79,52	1296	1224858	80,11
	12	1416	1183750	76,57	1446	1111418	73,98	1326	1160400	77,58

Ürettiği Pareto çözümlerinin uç noktaları bulma kabiliyeti, çözüm uzayında daha iyi dağılması ve kaliteli çözümler üretmesi nedeniyle, performans ölçütlerinde en iyi ortalama HV değerini sağlayan SPWOA algoritması, 180 aktivite TCQTP problemi için diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Tablo 55'te, SPWOA algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait Pareto çözümleri ve kullandığı opsiyonlar sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 54'de pareto çözümlerinin grafiksel dağılımını göstermektedir.

Tablo 55. 180 aktivite TCQTP için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K
Min. Zaman	1	1,1,1,



Şekil 54. SPWOA tarafından üretilmiş 180 aktivite zaman-maliyet-kalite pareto grafiği

3.3.6. 180 Aktivite TCQTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 56'da, 180 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemleri için geliştirilen her bir algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir. Gri kurt algoritması incelendiğinde, SP ile geliştirilen versiyonun, NDSII ile geliştirilen versiyona göre ortalama %69 oranında baskın olduğu görülmektedir. Öte yandan, NDSIII ile geliştirilen versiyon, SP ile geliştirilen versiyona kıyasla ortalama %70 oranında üstünlük sağlamaktadır. Balina algoritması incelendiğinde, güçlendirilmiş pareto (SP) yöntemiyle geliştirilen modelin, NDSII ile geliştirilen versiyona göre ortalama %64, NDSIII ile geliştirilen versiyona göre ise %38 oranında baskın olduğu gözlemlenmiştir. Rao-1 algoritmasına bakıldığında, NDSII ile geliştirilen versiyonun SP ile geliştirilen versiyona göre %34 oranında baskınlık sağladığı, ancak bağımsız çözümlerin ortalama %22'sinin SP tarafından domine edildiği görülmektedir. Ayrıca, NDSII ile geliştirilen Rao-1 algoritması,

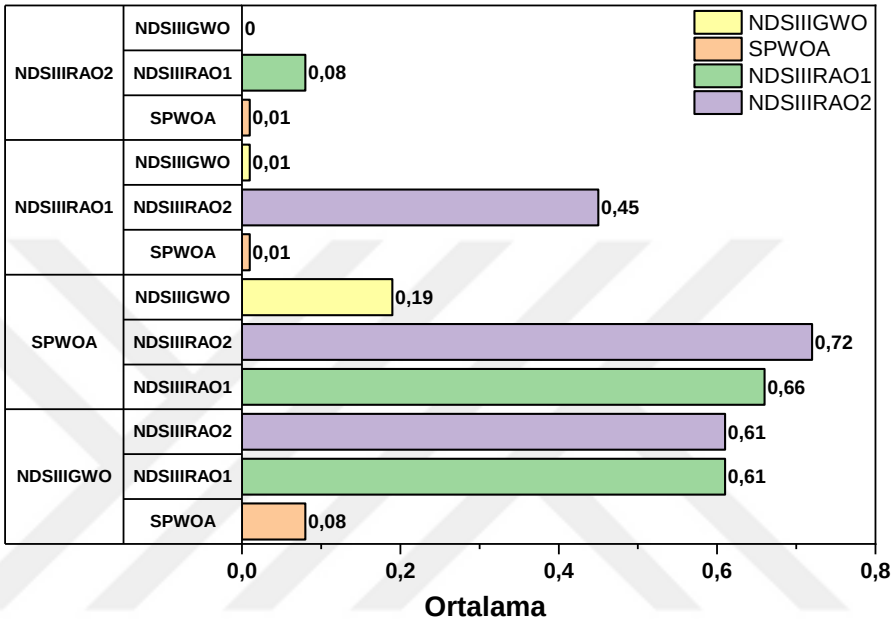
NDSIII versiyonunun yalnızca %8'ini domine ederken %51 oranında domine edilmiştir. Rao-2 algoritması incelendiğinde ise NDSIII ile geliştirilen versiyonun diğerlerine göre daha baskın olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 56. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(NDSIIGWO,SPGWO)	0,6200	0,0000	0,0861	0,1457
C(SPGWO, NDSIIGWO)	1,0000	0,0100	0,6903	0,3233
C(NDSIIGWO,NDSIIIGWO)	0,0220	0,0000	0,0020	0,0055
C(NDSIIIGWO,NDSIIGWO)	1,0000	0,7300	0,9662	0,0610
C(SPGWO, NDSIIIGWO)	0,0220	0,0000	0,0069	0,0084
C(NDSIIIGWO,SPGWO)	0,9900	0,4000	0,6950	0,1901
C(NDSIIWOA,SPWOA)	0,2300	0,0000	0,0463	0,0435
C(SPWOA, NDSIIWOA)	0,8100	0,2900	0,6350	0,1003
C(NDSIIWOA,NDSIIIWOA)	0,3516	0,0000	0,0795	0,0757
C(NDSIIIWOA,NDSIIWOA)	0,6700	0,0600	0,3561	0,1321
C(SPWOA, NDSIIIWOA)	0,8462	0,0220	0,3829	0,2157
C(NDSIIIWOA,SPWOA)	0,4300	0,0000	0,0747	0,0893
C(NDSIIRAO1,SPRAO1)	0,7400	0,0100	0,3454	0,2012
C(SPRAO1, NDSIIRAO1)	0,4300	0,0600	0,2187	0,0861
C(NDSIIRAO1,NDSIIIRAO1)	0,4725	0,0000	0,0809	0,1023
C(NDSIIIRAO1,NDSIIRAO1)	0,8300	0,0900	0,5087	0,1629
C(SPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,1978	0,0000	0,0379	0,0466
C(NDSIIIRAO1,SPRAO1)	0,9100	0,1800	0,5998	0,1506
C(NDSIIRAO2,SPRAO2)	0,9400	0,0000	0,4118	0,2514
C(SPRAO2, NDSIIRAO2)	0,6200	0,0000	0,1958	0,1456
C(NDSIIRAO2,NDSIIIRAO2)	0,7802	0,0000	0,2770	0,1809
C(NDSIIIRAO2,NDSIIRAO2)	0,5900	0,0000	0,1841	0,1382
C(SPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,4835	0,0220	0,1710	0,1063
C(NDSIIIRAO2,SPRAO2)	0,6800	0,0000	0,2599	0,1613

Şekil 55'te 180 aktiviteli problemler için NDSIIIGWO, SPWOA, NDSIIIRAO1 ve NDSIIIRAO2 algoritmalarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir. NDSIIIGWO algoritmasının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, SPWOA'nın %8'ini, NDSIIIRAO1'in %61'ini ve NDSIIIRAO2'nin %61'ini domine ettiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, NDSIIIGWO algoritması SPWOA tarafından %19 oranında domine edilirken, NDSIIIRAO1 ve NDSIIIRAO2 tarafından sadece %1 oranında domine edilmiştir. SPWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in %66'sını ve NDSIIIRAO2'nin %72'sini domine ettiği, ayrıca NDSIIGWO'nun %19'unu domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, SPWOA algoritması NDSIIIRAO1 ve

NDSIIGWO tarafından %1 gibi düşük bir oranda domine edilmiştir. RAO algoritmaları arasındaki pareto baskınlığı karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in NDSIIIRAO2'yi %45 oranında domine ettiği, buna karşılık NDSIIIRAO2'nin NDSIIIRAO1'i %8 oranında domine edebildiği gözlemlenmiştir. SPWOA algoritmasın 180 aktivite TCQTP problemi için diğer algoritmalardan daha baskın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 55. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 57 ve Tablo 58'de on bağımsız çözüm sonucunda farklı çok amaçlı seçim ve eleme operatörleriyle geliştirilen Gri Kurt, Balina ve Rao serisi algoritmalarına ait hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe performans ölçümleri sunulmaktadır. Bu ölçümlerin özet hali, en yüksek HV değerinden en düşüğe doğru sıralanmış ortalama değerlerle birlikte Tablo 59'de gösterilmiştir.

Tablo 57. 180 aktivite TCQTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,5824	0,4643	0,5267	0,0362	0,9321	0,9954	0,9575	0,0227
NDSIIRAO1	0,7576	0,7011	0,7268	0,0203	0,6002	0,8064	0,6888	0,0636
NDSIIRAO2	0,8240	0,7074	0,7427	0,0345	0,6121	0,7538	0,6870	0,0415

Tablo 57'nin devamı

NDSIIWOA	0,8205	0,7778	0,8040	0,0159	0,7368	1,0177	0,9244	0,0884
SPGWO	0,7797	0,5697	0,6812	0,0707	0,4822	0,8405	0,6579	0,1391
SPRAO1	0,6477	0,5826	0,6355	0,0193	0,3587	0,4488	0,3920	0,0280
SPRAO2	0,7173	0,6268	0,6606	0,0278	0,3448	0,4932	0,4086	0,0476
SPWOA	0,9059	0,8316	0,8755	0,0231	0,1862	0,3656	0,2328	0,0519
NDSIIIGWO	0,7596	0,7255	0,7431	0,0119	0,9752	1,0276	1,0029	0,0148
NDSIIIRAO1	0,8412	0,7580	0,7923	0,0251	0,8185	0,9239	0,8718	0,0392
NDSIIIRAO2	0,8010	0,7619	0,7780	0,0122	0,7610	0,8942	0,8305	0,0449
NDSIIIWOA	0,8779	0,8064	0,8503	0,0240	0,9874	1,3563	1,1391	0,1224

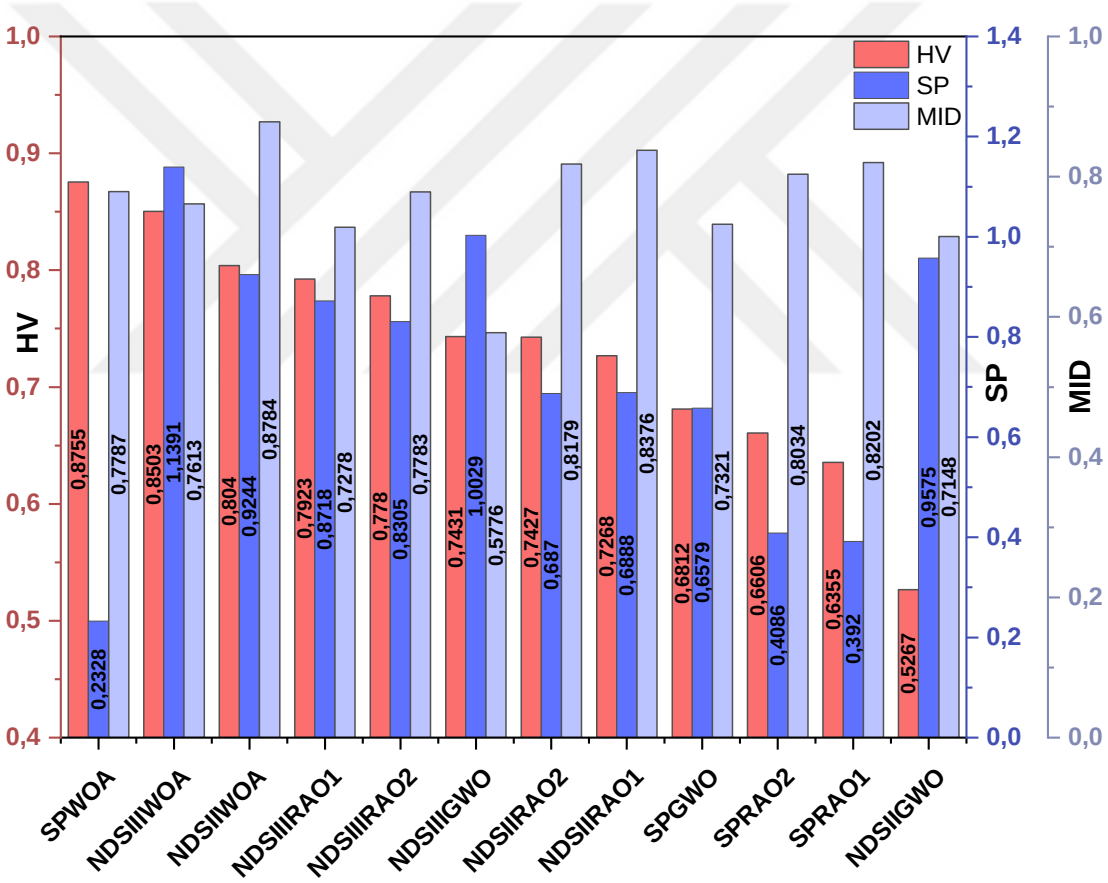
Tablo 58. 180 aktivite TCQTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,6684	0,761	0,7148	0,0298
NDSIIRAO1	0,819	0,8595	0,8376	0,0147
NDSIIRAO2	0,7591	0,8561	0,8179	0,0302
NDSIIWOA	0,8617	0,8998	0,8784	0,0107
SPGWO	0,7049	0,7554	0,7321	0,0158
SPRAO1	0,8043	0,8397	0,8202	0,0105
SPRAO2	0,7783	0,8332	0,8034	0,0165
SPWOA	0,7521	0,8116	0,7787	0,0163
NDSIIIGWO	0,5616	0,595	0,5776	0,0098
NDSIIIRAO1	0,6764	0,7661	0,7278	0,0327
NDSIIIRAO2	0,7579	0,7946	0,7783	0,0124
NDSIIIWOA	0,7139	0,8028	0,7613	0,0288

Tablo 57 ve Tablo 58'de yer alan performans ölçümlerine ait ortalama değerler, Şekil 56'da grafiksel olarak gösterilmektedir. SPWOA algoritmasının ürettiği HV değerleri incelendiğinde, 180 aktiviteli TCQTP problemi için geliştirilen bu algoritmanın diğer yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir. Tablo 59 detaylı incelendiğinde, SPWOA algoritmasının 0.8755 değeriyle HV performans ölçütünde diğer algoritmalardan daha üstün sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımı analiz edildiğinde, SPWOA algoritmasının 0.2328 yayılım değeriyle en iyi yayılım performansını gösterdiği belirlenmiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.5776) ideal noktaya en yakın değeri sağladığı ve dolayısıyla diğer algoritmalara göre daha başarılı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, algoritmaların farklı performans ölçütlerinde kendilerine özgü avantajlara sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 59. 180 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
SPWOA	40000	0,8755	0,2328	0,7787
NDSIIIWOA	40000	0,8503	1,1391	0,7613
NDSIIWOA	40000	0,8040	0,9244	0,8784
NDSIIIRAO1	40000	0,7923	0,8718	0,7278
NDSIIIRAO2	40000	0,7780	0,8305	0,7783
NDSIIIGWO	40000	0,7431	1,0029	0,5776
NDSIIRAO2	40000	0,7427	0,6870	0,8179
NDSIIRAO1	40000	0,7268	0,6888	0,8376
SPGWO	40000	0,6812	0,6579	0,7321
SPRAO2	40000	0,6606	0,4086	0,8034
SPRAO1	40000	0,6355	0,3920	0,8202
NDSIIGWO	40000	0,5267	0,9575	0,7148



Şekil 56. 180 aktivite TCQTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.3.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Problemleri Genel Değerlendirme

Çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemlerinin çözümünde, farklı metasezgisel algoritmaların performansları detaylı olarak incelenmiştir. Rao serileri, Gri Kurt Optimizasyonu ve Balina Optimizasyonu algoritmaları, NDSII, SP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleriyle ayrı ayrı geliştirilmiştir. Analizler, küçük (18 aktivite), orta (60 aktivite) ve büyük (180 aktivite) ölçekli projeler üzerinde gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar algoritmaların ve operatörlerin etkinliğini ortaya koymuştur.

Küçük ölçekli problemde WOA algoritması, zaman, maliyet ve kaliteye ait uç noktaları bulmada tüm bağımsız sonuçlarda kararlı bir davranış sergilemiştir. Çok amaçlı optimizasyon performans ölçütleri açısından ise SPRAO2 algoritması 0.9624 hiper hacim değeri ile en iyi sonucu vermiştir. SPRAO2 algoritması, literatürdeki OMODE ve SMA algoritmalarına kıyasla %63 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak tüm performans kriterlerinde daha başarılı olmuştur.

Orta ölçekli problemde Balina algoritması, optimum zaman, maliyet ve kalite değerlerine ulaşmada diğer algoritmalara göre daha dengeli bir performans göstermiştir. Performans ölçütleri açısından NDSIIIWOA algoritması 0.9341 hiper hacim değeri ile öne çıkmıştır. Ancak NDSIII ile geliştirilen algoritmaların pareto çözümlerindeki dağılımı, SP yöntemi ile geliştirilen versiyonlara göre daha zayıf kalmıştır. SPWOA, SPGWO ve SPRAO1 algoritmaları, MOABCDE algoritmasına göre %40 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile tüm metriklerde daha iyi sonuçlar elde etmiştir. NDSIIIWOA algoritması HV açısından üstün performans göstermesine rağmen, pareto çözümlerinin dağılımında SP ile geliştirilen algoritmaların gerisinde kalmıştır.

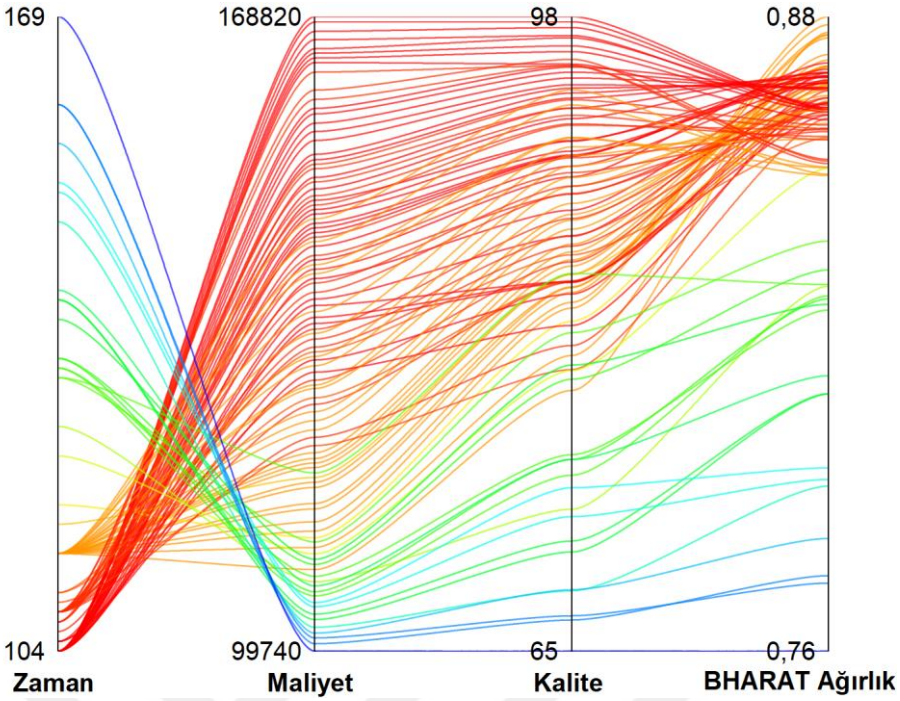
Büyük ölçekli problemde SPWOA algoritması 0.8755 hiper hacim değeri ile en iyi performansı sergilemiştir. Ancak, NDSIII ile geliştirilen algoritmaların hiper hacim değerleri WOA algoritması haricinde diğer algoritmalarda daha iyi sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. SP operatörü ile geliştirilen algoritmalar, özellikle pareto çözümlerinde homojen bir dağılım üretme konusunda başarılı olmuştur. WOA algoritması tüm versiyonlarında tutarlı sonuçlar üreterek, büyük ölçekli problemler için güvenilir bir seçenek olduğunu kanıtlamıştır.

Sonuç olarak, algoritmaların performansında çok amaçlı optimizasyon operatörlerinin etkisi belirgin şekilde gözlenmiştir. WOA algoritması tüm problem boyutlarında tutarlı ve

yüksek performans gösterirken, Rao serileri küçük ölçekli problemlerde etkili olmuştur. GWO algoritması dengeli çözümler üretmede başarılı olmasına rağmen, uç noktalarda diğer algoritmalara göre daha zayıf kalmıştır. NDSIII operatörü, NDSII'ye kıyasla çok daha başarılı sonuçlar üretmiştir.

3.3.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi

Bu bölümde, 18, 60 ve 180 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite optimizasyon problemlerinin çözümleri neticesinde elde edilen bağımsız çözümlerden en yüksek hiper hacim değerine sahip pareto çözümleri arasından en uygun alternatiflerin belirlenmesi amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Her bir problem kategorisinde en iyi performansı gösteren algoritmanın pareto çözümleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu kapsamda, 18 aktiviteli problem için SPRAO2, 60 aktiviteli problem için NDSIIIWOA ve 180 aktiviteli problemler için SPWOA algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümleri kullanılmıştır. Analiz sürecinde zaman, maliyet ve kalite kriterlerine eşit önem verilmiş ve her üç kriter eşit ağırlıkta (wt=wc=wq=0.33) değerlendirilmiştir. Her bir problem kategorisi için en iyi üç alternatif, kriterlerin eşit ağırlıkta olduğu duruma göre BHARAT yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve sunulmuştur. Bu sayede proje yöneticilerine yönelik sistematik bir karar destek mekanizması oluşturularak, projelerinin gereksinimlerine göre en uygun çözümü seçebilme imkânı sunulmuştur. Şekil 57'de, 18 aktiviteli TCQTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet ve kalite değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümlerine bakıldığında, zaman değerlerinin 104-169 gün arasında, maliyet değerlerinin 99740-168820 arasında ve kalite değerlerinin %65-98 arasında değiştiği görülmektedir. Grafikte her bir çizgi bir pareto çözümünü temsil etmekte olup, bu çizgilerin kesişim noktaları çözümlerin birbirleriyle olan ilişkisini göstermekte ve BHARAT yöntemi sonucunda elde edilen ağırlık değerlerine (0.76-0.88) ulaşmaktadır. BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç çözüm Tablo 60'da sunulmuştur. Tabloda her bir alternatif için kullanılan modlar, projenin tamamlanma süresi, toplam maliyeti, kalite değeri ve BHARAT ağırlık değerleri yer almaktadır. Bu değerlendirmede ilk sırada yer alan alternatif, 114 günde tamamlanmakta, 112820$ maliyet gerektirmekte ve %82.64 kalite değeri sağlamakta olup, 0.8809 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir.



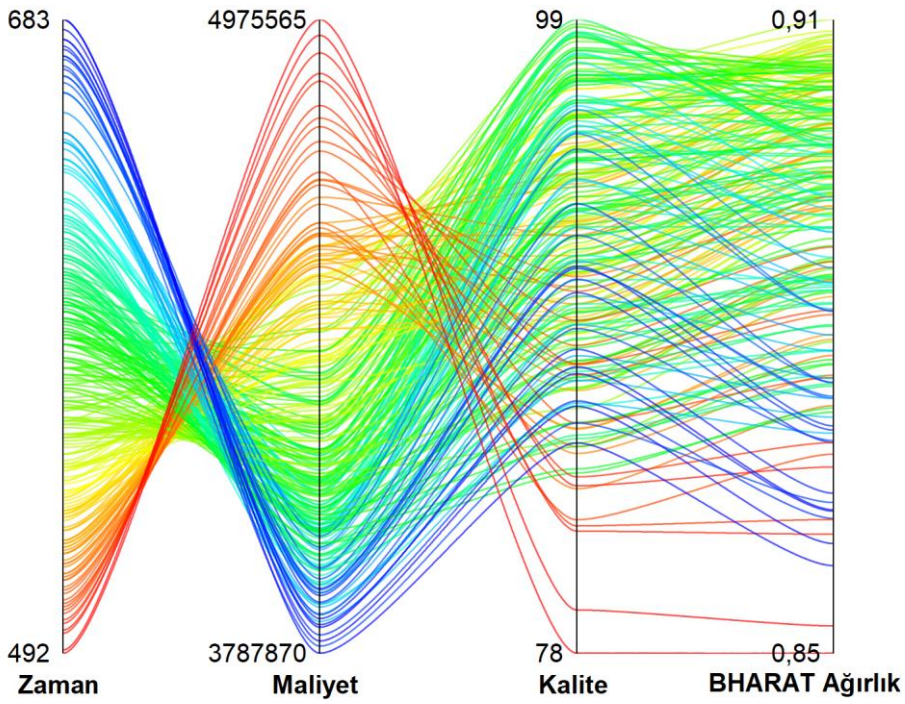
Şekil 57. 18 aktiviteli TCQTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 60. 18 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	BHARAT Ağrılık
1	1,1,1,3,4,3,3,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1	114	112820	82,64	0,8809
2	1,1,1,3,4,3,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	114	113820	82,95	0,8794
3	1,5,1,3,4,3,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,1	114	108620	78,40	0,8779

Şekil 58'de, 60 aktiviteli TCQTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları, zaman, maliyet ve kalite değerleri arasındaki ilişki sunulmaktadır. NDSIIIWOA tarafından elde edilen pareto sonuçları incelendiğinde, sürelerin 492-683 gün aralığında, maliyetlerin 3787870-4975565 aralığında ve kalite değerlerinin %78-99 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.85-0.91) ilişkilendirilmektedir. BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 61'de gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen modlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, eşit ağırlıkların kullanılması

durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 557 gün sürede tamamlanıp 4353300$ maliyet ve %97.16 kalite ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.9115 olarak hesaplanmıştır. İkinci en iyi alternatif olarak belirlenen çözüm ise 550 günde tamamlanmakta, 4423500$ maliyet gerektirmekte ve %97.08 kalite değeri sağlamakta olup, 0.9104 BHARAT ağırlık değerine sahiptir.

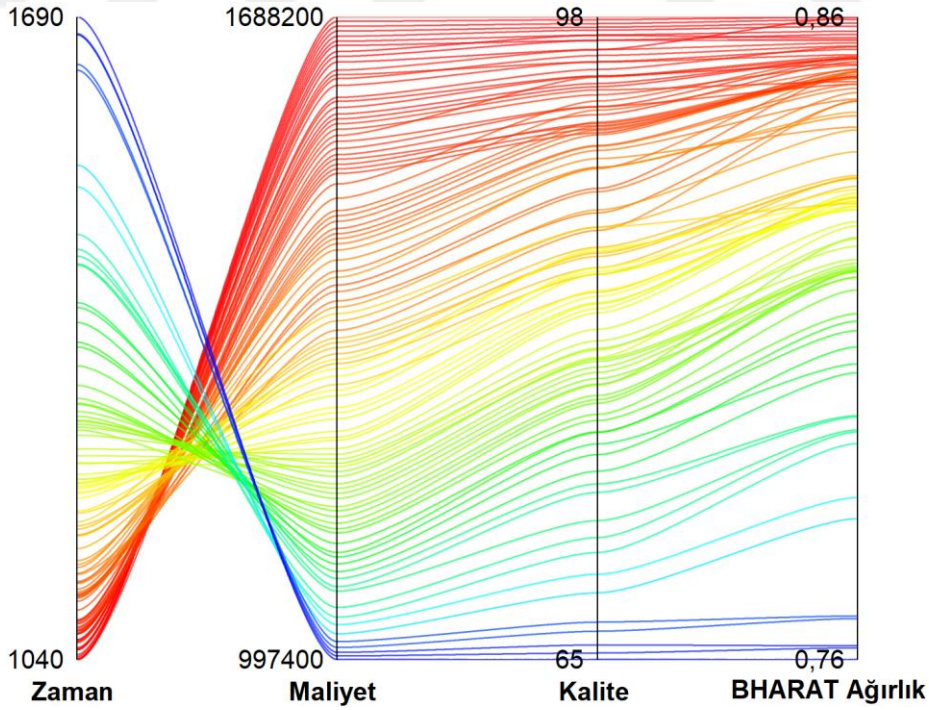


Şekil 58. 60 aktiviteli TCQTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 61. 60 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	BHARAT Ağrılık
1	2,2,2,2,3,2,2,2,3,4,2,3,2,3,2,2,2,2,2,2,2,3,2,3,3,2,2,2,3,2,2,2,3,2,3,2,3,2,2,2,3,2,2,2,2,2,2,2,5,2,2,2,2,4,2,2,4,2,3,4	557	4353300	97,16	0,9115
2	2,2,2,2,2,2,2,2,2,4,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,3,3,2,3,2,2,2,2,2,2,2,2,3,4,4,3,2,2,2,2,3,2,4,2,3,2,2,5,2,3,3,2,2,4,2,4,2,2,4	550	4423500	97,08	0,9104
3	2,2,2,2,4,2,2,2,2,4,2,3,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,3,2,2,2,3,2,2,2,3,2,2,2,3,2,2,2,2,2,4,2,2,2,2,2,2,3,5,2,2,2,2,3,2,2,5,2,2,5	552	4344250	95,76	0,9101

Şekil 59'da, 180 aktiviteli TCQTP problemi için SPWOA algoritması tarafından üretilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet ve kalite değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, zaman değerlerinin 1040-1690 gün arasında, maliyet değerlerinin 997400-1688200 arasında ve kalite değerlerinin %65-98 aralığında değiştiği görülmektedir. Grafikte her bir çizgi bir pareto çözümünü temsil etmekte olup, bu çizgilerin kesişim noktaları çözümlerin birbirleriyle olan ilişkisini göstermekte ve BHARAT yöntemi sonucunda elde edilen ağırlık değerlerine (0.76-0.86) ulaşmaktadır. BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 62'de sunulmuştur. Tabloda her bir alternatif için kullanılan modlar, projenin tamamlanma süresi, toplam maliyeti, kalite değeri ve BHARAT ağırlık değerleri yer almaktadır. Değerlendirme sonucunda ilk sırada yer alan alternatif, 1040 günde tamamlanmakta, 1639700$ maliyet gerektirmekte ve %95.96 kalite değeri sağlamakta olup, 0.9115 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü en iyi alternatifler de aynı sürede (1040 gün) tamamlanmasına rağmen, maliyet ve kalite değerleri açısından farklılık göstermektedir. Bu durum, proje yöneticilerine aynı sürede farklı maliyet ve kalite dengelerine sahip alternatifler sunmaktadır.



Şekil 59. 180 aktiviteli TCQTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 62. 180 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	BHARAT Ağrılık
1	1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1

operatörleri ile birleştirilmiştir. Böylece, optimizasyon algoritmalarının ve çok amaçlı seçim-eleme operatörlerinin pareto çözümler üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada, zaman-maliyet-çevresel etki ödünleşim problemi (TCETP) kapsamlı bir şekilde kıyas yapılabilmesi için literatürdeki OMODE algoritması yeniden kodlanarak test edilmiştir. Ancak, Son vd. (2023) tarafından önerilen eMOGOA algoritmasında kullanılan çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri hakkında spesifik bir bilgi bulunmamaktadır. eMOGOA algoritmasında çok amaçlı seçim için turnuva seçiminden bahsedilse de, ele alınan problem çok amaçlı bir problem olduğundan, uygunluk değerlerinin nasıl tek bir uygunluk değeri olarak indirgenmeye çalışıldığına dair açıklamalar eksiktir. Ayrıca, çekirge algoritmasının çok amaçlı optimizasyon bağlamında kullandığı hedef pozisyonun belirlenmesine yönelik bir bilgi sunulmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında eMOGOA algoritması yeniden kodlanmamış, yalnızca literatürdeki sonuçları ile kıyaslama yapılmasının daha doğru olduğu düşünülmüştür. OMODE algoritması, entropi kalabalık mesafesi tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemini kullanmıştır. OMODE algoritması hakkında tüm detaylar için Cheng ve Tran (2015) çalışmasına başvurulabilir.

Son olarak, geliştirilen algoritmaların geniş ölçekli projelerdeki etkinliğini incelemek amacıyla, 25 aktiviteli proje on kat artırılarak 250 aktiviteye genişletilmiş ve algoritmaların büyük ölçekli TCETP problemlerindeki performansı, C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe gibi kriterlere göre değerlendirilmiştir.

3.4.1. 25 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi

25 aktiviteye sahip zaman-maliyet-çevresel etki ödünleşim problemi, ilk olarak Marzouk vd. (2008) tarafından incelenmiştir. Çalışmalarında NSGA algoritmasını kullanarak Pareto çözümü sunmuşlardır. Daha sonra, Cheng ve Tran (2015) bu probleme daha iyi bir çözüm sunmak amacıyla karşıt tabanlı çoklu amaçlı diferansiyel evrim algoritmasını (OMODE) kullanmışlardır.

Bu çalışma kapsamında Rao serileri, Gri kurt algoritması ve Balina algoritmaları, kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), güçlendirilmiş pareto yöntemi (SP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon sayısı 92 iterasyon sayısı 100 olacak şekilde belirlenmiştir. Bu popülasyon ve iterasyon değerleri, literatürde kullanılan OMODE algoritmasına kıyasla yaklaşık %82 daha az fonksiyon değerlendirmesi

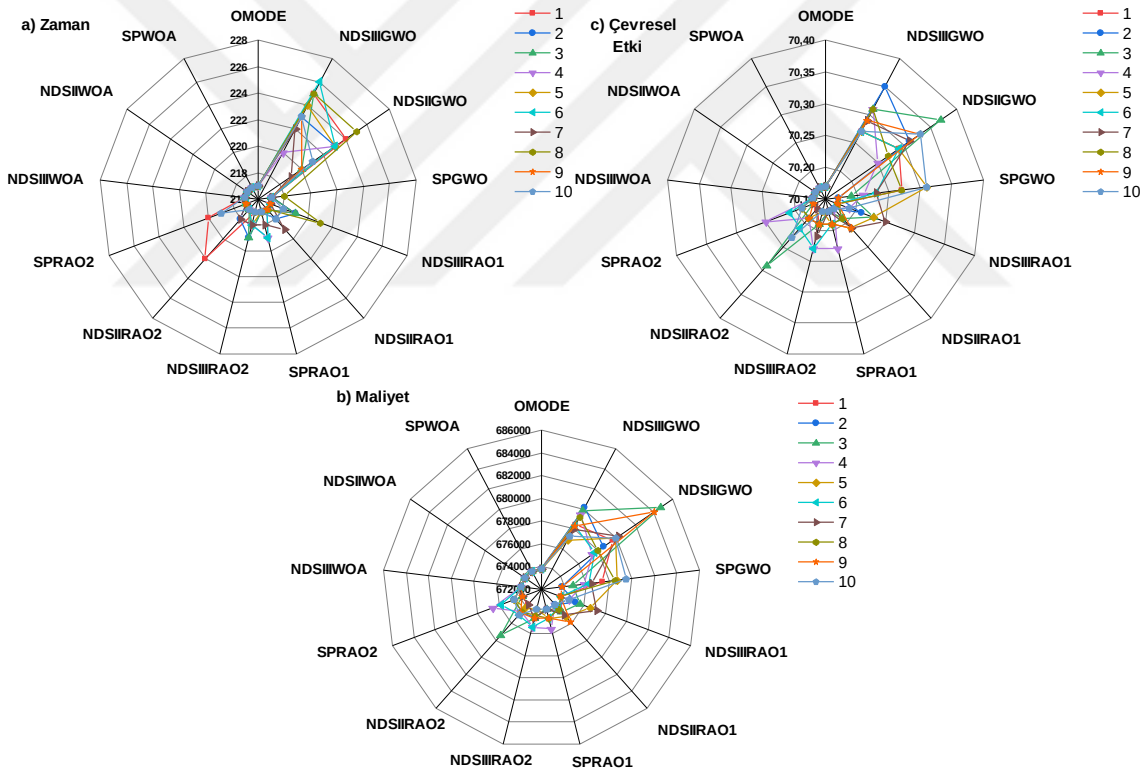
ile analiz edilmiştir. Böylece, literatürde önerilen algoritmaya kıyasla daha az fonksiyon değerlendirmesi ile performansın artırılması hedeflenmiş ve her bir algoritmada kullanılan çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında, OMODE algoritması orijinal çalışmadaki gibi 100 popülasyon 500 jenerasyon kullanılarak yeniden test edilmiştir. OMODE algoritmasında iterasyon yerine jenerasyon kullanılmasındaki amaç algoritmanın karşıt tabanlı öğrenme ile de popülasyonlar oluşturmasıdır.

25 aktiviteli problem, her bir faaliyetin süre, maliyet ve çevresel etki opsiyonları bulunmakta ve toplamda 5,37E+07 farklı proje tamamlanma opsiyonu sunmaktadır. Probleme ait zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları Tablo 63'te gösterilmektedir.

Tablo 63. 25 Aktivite TCETP problemi zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları

Akt.	Öncül Durum	Mod 1			Mod 2			Mod 3			Mod 4		
		Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K	Z	M	K
1		20	40000	4,57	18	50400	5,58	15	54000	5,04	14	58800	5,83
2	1	7	25400	4,33	5	29000	5,35	4	31000	5,68			
3	2	140	15000	1,17									
4	3	3	20000	1,10	1	20800	1,14						
5	4	3	38000	1,14	2	39000	1,16	1	39400	1,18			
6	5	1	28000	4,88									
7	6	5	8000	1,14	3	9000	1,16	2	10000	1,18			
8	7	7	76000	1,14	5	77200	1,16	3	77600	1,18	2	78000	1,20
9	8	4	50000	4,88	3	55000	4,90	2	60000	4,92			
10	9	10	6000	1,14	8	6800	1,16	5	8000	1,18			
11	10	3	26000	1,14	2	26500	1,16	1	27000	1,18			
12	11	1	20000	4,88									
13	12	8	16000	4,16	5	20000	6,00						
14	13	15	30000	4,57	12	34000	5,58	10	36000	5,04			
15	14	5	19000	4,33	3	24000	5,68						
16	15	2	16000	1,10	1	16400	1,12						
17	16	2	35400	1,14	1	36000	1,16						
18	17	1	24000	4,88									
19	18	3	7000	1,14	2	8000	1,16						
20	19	5	70000	1,14	3	72000	1,16	2	75000	1,18			
21	20	3	40000	4,88	2	45000	4,90						
22	21	8	6000	1,14	5	6800	1,16						
23	22	3	24000	1,14	2	24800	1,16						
24	23	1	18000	4,88									
25	24	8	16000	4,16									

Şekil 60'da on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, çevresel etki ve maliyet değerleri sırasıyla gösterilmiştir. Gri Kurt Algoritması (GWO) incelendiğinde, güçlendirilmiş pareto yöntemi ile geliştirilen algoritmanın minimum zaman, maliyet ve çevresel etkiyi bulmada, NDSII ve NDSIII yöntemleri ile geliştirilen versiyonlarına göre tüm bağımsız çözümlerde daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. Ancak, GWO algoritmasının tüm versiyonlarının bağımsız çözümlerde aynı sonuçları bulamaması nedeniyle istikrarsız bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Rao-1 algoritması incelendiğinde, tüm versiyonlarının GWO algoritmasına göre optimum sonuçlara ulaşmada daha başarılı olduğu, ancak Rao-1 algoritmasının da bağımsız çözümlerde istikrarsız bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Rao-2 algoritması da benzer şekilde, bağımsız çözümler arasında tutarlı bir performans sergilemeyerek istikrarsız sonuçlar üretmiştir.



Şekil 60. 25 aktiviteli TCETP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler

Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) incelendiğinde hem SP hem de NDSII ve NDSIII operatörleri ile geliştirilen versiyonlarının maliyeti, zamanı ve çevresel etkiyi minimize etme konusunda tüm bağımsız çözümlerde başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu

sonuçlar, WOA algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Ancak literatürde, Cheng vd. (2014) tarafından önerilen OMODE algoritmasının bu çalışmada geliştirilen algoritmalara göre yaklaşık %443 daha fazla fonksiyon değerlendirilmesi ile sonuç verdiği görülmüştür. OMODE algoritması da tüm bağımsız çözümlerde optimum değerlere ulaşabilmesine rağmen, WOA algoritması tüm versiyonlarında daha az fonksiyon değerlendirmesi ile aynı sonuçlara ulaşmayı başarmıştır.

Algoritmaların her bir bağımsız çözüm sonucunda ürettiği Pareto çözümlerini zaman, maliyet ve çevresel etki açısından kıyaslamak amacıyla, önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, çözümlerin çeşitliliğini ve kalitesini aynı anda değerlendiren hiper hacim (HV) değeri esas alınmış ve en yüksek HV değerine sahip bağımsız çözüm seçilmiştir.

Tablo 64 incelendiğinde, GWO algoritmasının SP, NDSII ve NDSIII yöntemleriyle elde edilen Pareto çözümleri gösterilmektedir. GWO algoritmasının üç farklı yöntemle geliştirilmiş çözümlerine bakıldığında, NDSII ile üretilen çözümlerin, SP ve NDSIII yöntemleriyle elde edilen çözümler tarafından büyük bir çoğunluğunun domine edildiği görülmektedir. Bu durum, SP ve NDSIII operatörlerinin, NDSII'ye kıyasla daha üstün sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Özellikle, güçlendirilmiş pareto (SP) seçme ve eleme operatörü ile geliştirilen GWO algoritması, NDSIII yöntemine kıyasla zaman, maliyet ve çevresel etki açısından daha düşük değerler üretmiştir. Ancak, her iki çözüm birbiri üzerinde baskınlık kuramamıştır. Bu durum NDSIII ile geliştirilen Gri kurt algoritmasının pareto çözümlerinin uç noktalardan ziyade iç kısımlarda daha çok toplandığını göstermektedir.

Tablo 64. 25 aktiviteli TCETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	223	741200	77,36	217	746000	76,9	225	726400	74,66
	2	224	727400	75,68	218	741200	76,11	227	723800	73,30
	3	224	727800	76,76	218	741000	76,88	227	712600	73,33
Mal. Göre	4	259	677400	70,25	268	673800	70,17	262	676900	70,27
	5	257	682800	70,29	267	674200	70,19	258	677700	70,29
	6	250	683400	70,39	266	674600	70,19	256	678500	70,31
Çevresel Etk.	7	259	677400	70,25	268	673800	70,17	262	676900	70,27
	8	257	682800	70,29	267	674200	70,19	258	677700	70,29
	9	256	688800	70,31	266	674600	70,19	256	678500	70,31
Deng.	10	232	721700	72,43	233	706700	71,43	232	706600	72,03
	11	242	703100	70,88	240	693000	70,55	240	688600	70,55
	12	248	689000	71,36	246	687000	70,43	246	683200	70,45

Tablo 65'te ise balina optimizasyon algoritmasının farklı operatörlerle geliştirilmiş çözümlerine yer verilmiştir. WOA algoritması zaman ve maliyet açısından incelendiğinde, farklı operatörlerle geliştirildiğinde bile optimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Ancak, kalabalık mesafe yöntemiyle elde edilen bazı çözümler (örneğin, 5, 8, 11 ve 12 numaralı Pareto çözümleri), SP ile geliştirilmiş olan WOA algoritması (SPWOA) tarafından domine edilmiştir. Ayrıca SP ile geliştirilen versiyon, NDSIII ile geliştirilen versiyondaki 5., 8., 10., 11. ve 12. pareto çözümlerini baskıladığı görülmektedir.

Tablo 65. 25 aktiviteli TCETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	217	746000	76,9	217	746000	76,9	217	746000	76,9
	2	218	741200	76,11	218	741200	76,11	219	741000	75,55
	3	218	741000	76,88	219	741000	75,55	220	736200	74,76
Mal. Göre	4	268	673800	70,17	268	673800	70,17	268	673800	70,17
	5	266	674600	70,19	267	674300	70,19	266	675000	70,19
	6	264	675400	70,21	265	674600	70,19	258	678700	70,29
Çevresel Etk. Göre	7	268	673800	70,17	268	673800	70,17	268	673800	70,17
	8	266	674600	70,19	267	674300	70,19	266	675000	70,19
	9	264	675400	70,21	265	674600	70,19	258	678700	70,29
Deng.	10	231	707200	72,39	231	710400	71,47	231	713000	72,07
	11	236	696200	71	236	693600	71	236	697600	71,02
	12	241	689800	70,92	241	687600	70,53	241	690000	71,48

Tablo 66 incelendiğinde, Rao-1 algoritmasının SP, NDSII ve NDSIII yöntemleriyle elde edilen Pareto çözümleri gösterilmektedir. Minimum maliyet ve zamanı bulma konusunda her üç versiyonunda optimum sonuçlara ulaştığı görülmektedir. Ancak NDSIII ile geliştirilen Rao-1 algoritmasının minimum çevresel etkiyi bulmada diğer algoritmalara göre geride kaldığı görülmektedir. Ancak NDSIIIRAO1'in çevresel etki öncelikli ürettiği hiçbir pareto çözümünün diğer algoritmalar tarafından baskılanamadığı tespit edilmiştir. SP ve NDSIII ile geliştirilen Rao-1 algoritmasının, NDSIIRAO1 algoritmasında yer alan 6., 8., 9. ve 11. Pareto çözümlerini baskıladığı görülmektedir. Ayrıca, SPRAO1 algoritmasının NDSIIIRAO1'de yer alan 5. ve 10. Pareto çözümlerini baskıladığı tespit edilmiştir.

Tablo 66. 25 aktiviteli TCETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	217	746000	76,9	217	746000	76,9	217	746000	76,9
	2	217	746000	76,9	218	741200	76,11	218	741000	76,88
	3	218	741200	76,11	219	741000	75,55	220	736200	74,76
Mal. Göre	4	268	673800	70,17	268	673800	70,17	268	673800	70,17
	5	268	673800	70,17	267	674200	70,19	266	675800	70,19
	6	267	674800	70,19	265	674600	70,19	258	677800	70,25
Çevresel Etk.	7	268	673800	70,17	268	673800	70,17	265	674600	70,19
	8	267	674800	70,19	267	674200	70,19	265	674600	70,19
	9	266	675200	70,21	265	674600	70,19	262	680600	70,23
Deng.	10	237	702800	71,02	225	722200	72,88	225	725000	73,34
	11	244	693300	72,21	232	700200	73,86	232	703200	72,06
	12	248	700000	70,43	244	686000	70,47	245	691900	70,45

Tablo 67 incelendiğinde, Rao-2 algoritmasının SP, NDSII ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri elde edilen pareto çözümleri gösterilmektedir. Rao-2 algoritmasının bu üç farklı yöntemle geliştirilmiş çözümlerine bakıldığında, NDSII ile üretilen çözümlerin zaman öncelikli çözümlerde geride kaldığı ve diğer versiyonlar tarafından baskılandığı görülmektedir. Minimum zaman, maliyet ve çevresel etkiyi bulmada güçlendirilmiş pareto yöntemi ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemini kullanan Rao-2 algoritmalarının optimum çözümlere ulaşmada birbirilerine üstünlük kuramadığı görülmüştür. Ancak SP ile üretilen versiyonun, NDSIII ile geliştirilen versiyondaki 5., 8. ve 10. Pareto çözümlerini baskıladığı görülmektedir.

Tablo 67. 25 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	222	736400	75,02	217	746000	76,9	217	746000	76,9
	2	222	736400	75,02	218	741200	76,11	219	736000	76,86
	3	223	734400	74,69	219	739000	76,55	220	736200	74,76
Mal. Göre	4	268	673800	70,17	268	673800	70,17	268	673800	70,17
	5	267	674200	70,19	267	674200	70,19	265	675200	70,21
	6	265	674600	70,19	265	674600	70,19	264	675500	70,23
Çevresel Etk.	7	268	673800	70,17	268	673800	70,17	268	673800	70,17
	8	267	674200	70,19	267	674200	70,19	265	675200	70,21
	9	265	674600	70,19	265	674600	70,19	264	675500	70,23
Deng.	10	225	726600	72,88	225	722200	72,88	225	726400	73,67
	11	232	723800	71,85	231	715800	71,49	231	712600	71,1
	12	244	688000	70,86	234	701400	72,33	234	696600	72,84

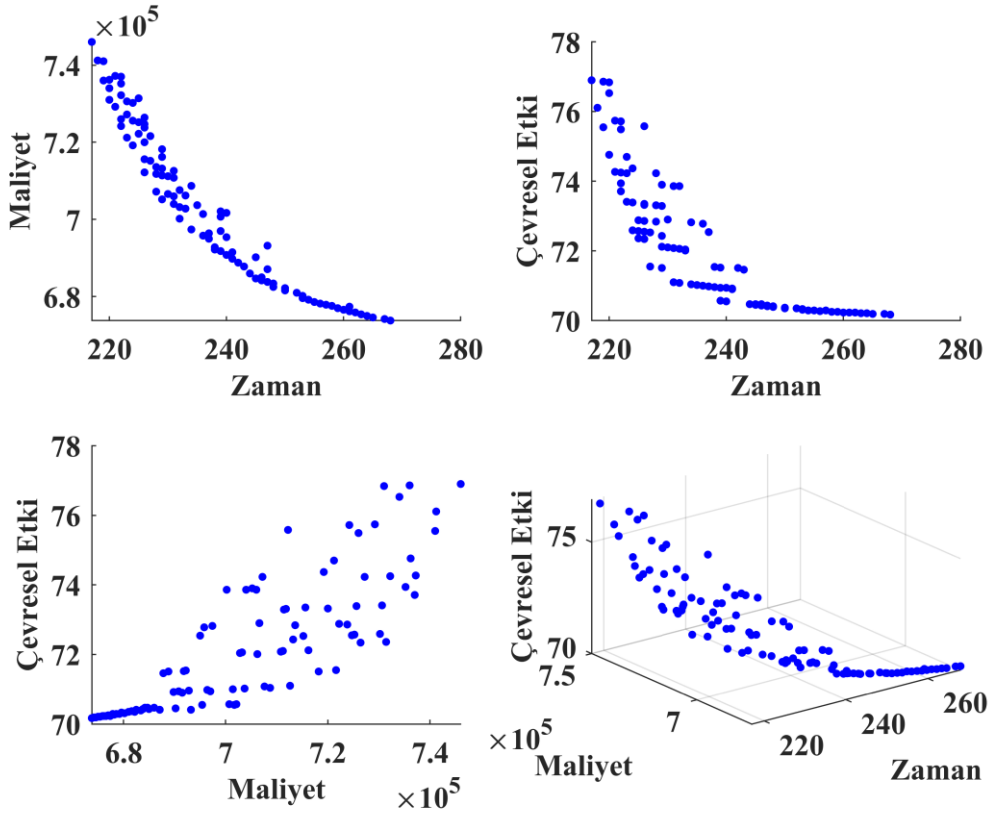
Bir sonraki bölümde performans metrikleri açısından ortalama HV ölçütüne bakıldığında en yüksek değere sahip olan SPRAO1 algoritması olarak görülmektedir. Literatürde, Cheng ve Tran (2015) yaptıkları çalışmalarda OMODE algoritması için en iyi bağımsız çözüm yerine, tüm çözümler arasından elde edilen en iyi sonuçlar sunmuşlardır. Tablo 68'de, SPRAO1 algoritması tarafından üretilen pareto çözümleri, literatürdeki OMODE pareto çözümleri ile karşılaştırmaktadır. SPRAO1 algoritmasının, OMODE algoritması tarafından üretilen 5 ve 6 nolu pareto çözümlerini, SPWOA algoritması tarafından üretilen 5 ve 8. Pareto çözümlerini baskıladığı tespit edilmiştir. Bu çözümler incelendiğinde, SPRAO1 algoritmasının yaklaşık %82 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile OMODE algoritmasına göre benzer sonuçları elde ettiği görülmektedir. Tablo 69'da SPRAO1 algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait pareto çözümleri opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 61'de pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 68. 25 aktiviteli TCETP problemi için SPRAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması

OMODE (2015)			OMODE (Bu çalışma)			SPWOA			SPRAO1		
Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
217	746000	76.9	217	746000	76.9	217	746000	76.9	217	746000	76.9
218	741200	76.11	219	736200	76.09	218	741200	76.11	218	741200	76.11
219	739200	75.78	219	739200	75.78	219	741000	75.55	219	741000	75.55
268	673800	70.35	268	673800	70.17	268	673800	70.17	268	673800	70.17
267	674200	70.37	265	675000	70.23	267	674300	70.19	267	674200	70.19
266	674900	70.39	264	675200	70.21	265	674600	70.19	265	674600	70.19
268	673800	70.35	268	673800	70.17	268	673800	70.17	268	673800	70.17
265	677800	70.36	264	675200	70.21	267	674300	70.19	267	674200	70.19
267	674200	70.37	263	675400	70.21	265	674600	70.19	265	674600	70.19
226	717200	72.86	225	725000	73.34	231	710400	71.47	225	722200	72.88
232	701200	72.24	232	700200	73.86	236	693600	71	232	700200	73.86
243	688000	70.62	245	684700	70.47	241	687600	70.53	244	686000	70.47

Tablo 69. 25 Aktivite TCETP için SPRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	Ç.E.
Minimum Zaman	1	4,3,1,2,3,1,3,4,3,3,3,1,2,3,2,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1	217	746000	76.9
	2	3,3,1,2,3,1,3,4,3,3,3,1,2,3,2,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1	218	741200	76.11
	3	4,3,1,2,3,1,3,4,3,3,3,1,2,3,1,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1	219	741000	75.55
Minimum Maliyet ve Çevresel etki	4	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	268	673800	70.17
	5	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	267	674200	70.19
	6	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1	265	674600	70.19



Şekil 61. SPRAO1 tarafından üretilmiş 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki pareto grafiği

3.4.2. 25 Aktivite TCETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 70'te, 25 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyon problemleri için geliştirilen algoritmaların, OMODE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir. OMODE algoritmasının on bağımsız çözümün sonucunda

elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, NDSIIGWO algoritmasının çözümlerinin ortalama olarak %95'ini baskıladığı, buna karşılık NDSIIGWO algoritmasının OMODE'nin ürettiği çözümlerin sadece %0.65'ini baskılayabildiği görülmektedir. NDSIIIGWO ile karşılaştırıldığında, OMODE'nin çözümlerin %26'sını baskıladığı, NDSIIIGWO'nun ise OMODE çözümlerinin %15'ini baskıladığı görülmektedir. SPGWO algoritmasıyla karşılaştırıldığında ise, OMODE'nin çözümlerin %62'sini baskıladığı, ancak SPGWO'nun OMODE çözümlerinin %7'sini baskıladığı dikkat çekmektedir.

OMODE algoritmasının, NDSIIWOA algoritmasının %61'ini baskılarken, %5'i NDSIIWOA tarafından baskılanmıştır. Balina algoritmasının SP versiyonu incelendiğinde, OMODE'nin çözümlerin %32'sini baskıladığı, buna karşın SPWOA'nın OMODE çözümlerinin %15'ini baskıladığı görülmektedir. NDSIIIWOA versiyonunda ise, OMODE'nin çözümlerin %29'unu baskıladığı, NDSIIIWOA'nın ise OMODE çözümlerinin %7'sini baskıladığı gözlemlenmiştir.

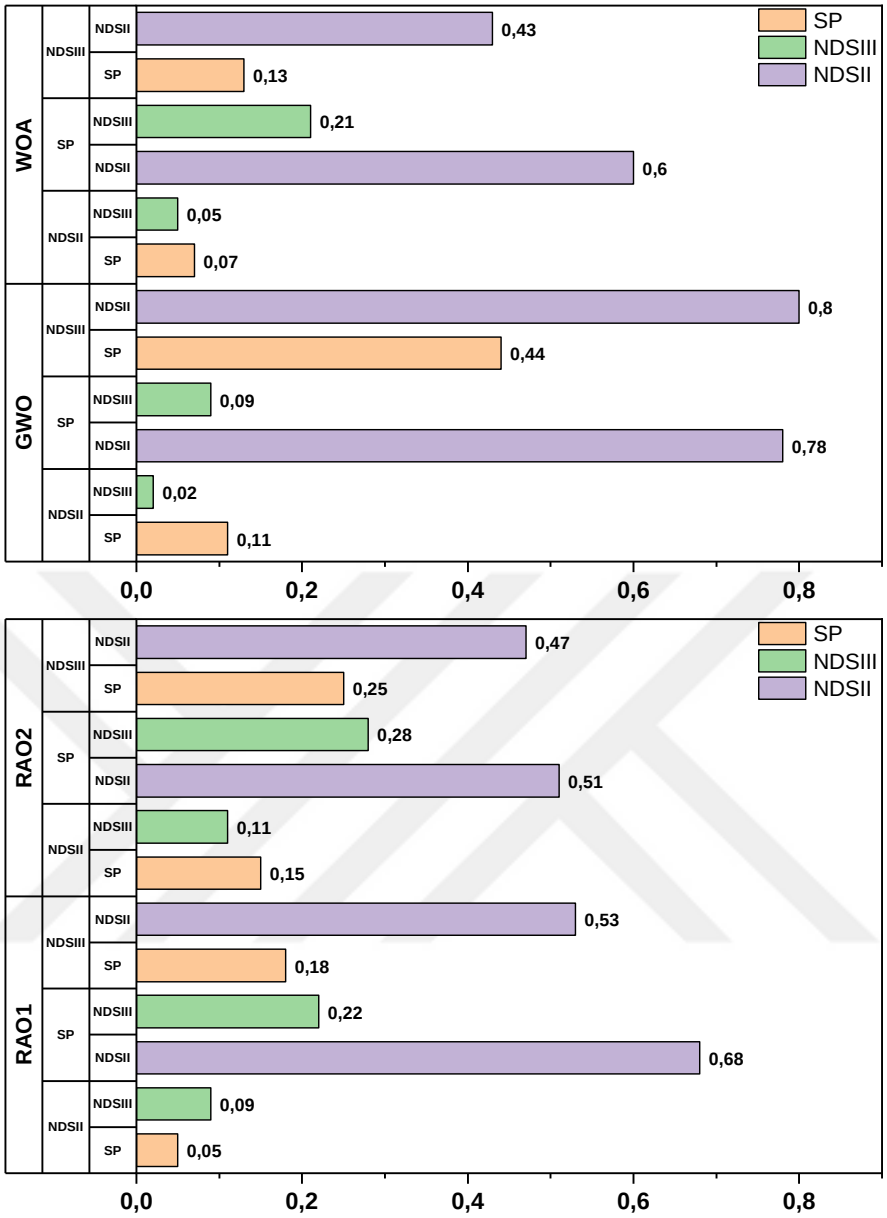
Rao-1 algoritmasının farklı versiyonları incelendiğinde, OMODE'nin NDSIIRAO1 çözümlerinin %65'ini baskıladığı, SPRAO1 versiyonunda çözümlerin %20'sini baskıladığı görülmektedir. NDSIIIRAO1 ile yapılan karşılaştırmada ise OMODE'nin çözümlerin %19'unu baskıladığı, NDSIIIRAO1'in ise çözümlerin %14'ünü baskıladığı görülmektedir. Buna karşılık, NDSIIRAO1'in OMODE çözümlerinin %6'sını, SPRAO1'in ise %28'ini baskıladığı gözlemlenmiştir. Rao-2 algoritmasının farklı versiyonları incelendiğinde, NDSIIRAO2 ile OMODE algoritmasının çözümlerin %61'ini baskıladığı, SPRAO2 versiyonunda çözümlerin %44'ünü baskıladığı görülmektedir. NDSIIIRAO2 sonuçlarına bakıldığında, OMODE'nin çözümlerin %41'ini baskıladığı, NDSIIIRAO2'nin ise çözümlerin %8'ini baskıladığı görülmektedir. Buna karşılık, NDSIIRAO2'nin çözümlerin %8'ini, SPRAO2'nin ise %13'ünü baskıladığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular neticesinde OMODE algoritması ile bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmalar kıyaslandığında sadece güçlendirilmiş pareto cephesi yöntemi ile geliştirilen Rao-1 algoritmasının OMODE algoritmasına karşı baskın geldiği tespit edilmiştir. NDSII ile geliştirilen versiyonların diğer versiyonlara göre oldukça geri kaldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 70. 25 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, OMODE algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(OMODE, NDSIIGWO)	1,0000	0,8500	0,9511	0,0324
C(NDSIIGWO, OMODE)	0,0400	0,0000	0,0065	0,0086
C(OMODE, SPGWO)	0,9400	0,2500	0,6237	0,1898
C(SPGWO, OMODE)	0,2200	0,0000	0,0723	0,0573
C(OMODE, NDSIIIGWO)	0,6923	0,0110	0,2662	0,1295
C(NDSIIIGWO, OMODE)	0,2800	0,0000	0,1526	0,0631
C(OMODE, NDSIIWOA)	0,7600	0,4600	0,6169	0,0687
C(NDSIIWOA, OMODE)	0,1200	0,0100	0,0534	0,0260
C(OMODE, SPWOA)	0,4800	0,1400	0,3246	0,0781
C(SPWOA, OMODE)	0,2700	0,0600	0,1511	0,0478
C(OMODE, NDSIIIWOA)	0,5275	0,0879	0,2970	0,0966
C(NDSIIIWOA, OMODE)	0,1500	0,0100	0,0782	0,0319
C(OMODE, NDSIIRAO1)	0,8000	0,2500	0,6573	0,1121
C(NDSIIRAO1, OMODE)	0,1600	0,0000	0,0684	0,0347
C(OMODE, SPRAO1)	0,3700	0,0600	0,2083	0,0670
C(SPRAO1, OMODE)	0,5000	0,0600	0,2889	0,1054
C(OMODE, NDSIIIRAO1)	0,3187	0,0989	0,1984	0,0449
C(NDSIIIRAO1, OMODE)	0,2300	0,0400	0,1403	0,0447
C(OMODE, NDSIIRAO2)	0,8200	0,3500	0,6171	0,1131
C(NDSIIRAO2, OMODE)	0,2000	0,0100	0,0850	0,0401
C(OMODE, SPRAO2)	0,5700	0,2900	0,4473	0,0676
C(SPRAO2, OMODE)	0,2500	0,0500	0,1390	0,0415
C(OMODE, NDSIIIRAO2)	0,6593	0,2198	0,4179	0,1065
C(NDSIIIRAO2, OMODE)	0,1700	0,0100	0,0848	0,0409

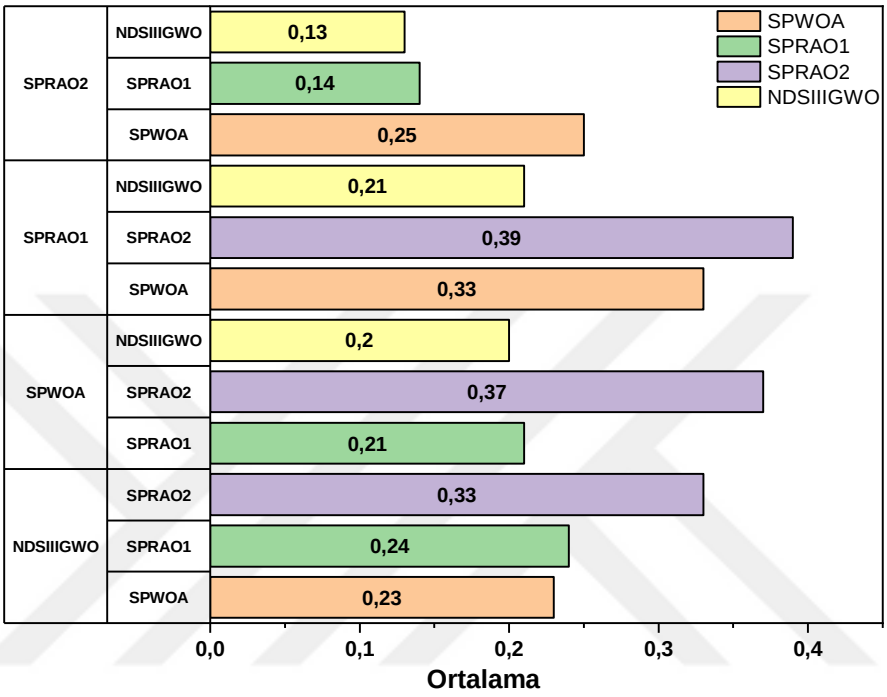
Şekil 62'de, SP,NDSII ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak oluşturulan algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırması sunulmaktadır. Tüm algoritmalar incelendiğinde, NDSII ile geliştirilen algoritmaların diğer algoritmalara göre oldukça geri kaldığı görülmektedir. Gri kurt algoritması incelendiğinde en iyi operatörün NDSIII ile geliştirilen algoritma olduğu görülmektedir. Balina algoritması ve Rao serileri incelendiğinde ise SP ile geliştirilen algoritmaların, NDSIII ile geliştirilen algoritmalara göre daha baskın olduğu görülmüştür. Tüm algoritmalarda kalabalık mesafe ile geliştirilen versiyonların diğer versiyonlara göre oldukça geride kaldığı görülmüştür.



Şekil 62. 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

Şekil 63'te, 25 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen ortalama pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir. NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, SPWOA'nın %23'ünü, SPRAO1'in %24'ünü ve SPRAO2'nin %33'ünü domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması SPWOA tarafından %20, SPRAO1 tarafından %21 ve SPRAO2 tarafından %13 oranında domine edilmiştir. SPWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, SPRAO1'in %21'ini ve SPRAO2'nin %37'sini domine ettiği tespit edilmiştir. Diğer

taraftan, SPWOA algoritması SPRAO1 tarafından %33 ve SPRAO2 tarafından %25 oranında domine edilmiştir. Rao-1 algoritmasının SP versiyonu incelendiğinde, SPWOA'nın %33'ünü ve SPRAO2'nin %39'unu domine ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, SPRAO1 algoritması SPRAO2 tarafından %14 oranında domine edilmiştir.



Şekil 63. 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Algoritmaların performansını değerlendirirken yalnızca C-metrik kullanmak yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bazı algoritmalar, çözüm uzayının belli bir bölgesine yoğunlaşarak diğer algoritmalara göre sayısal anlamda yanıltıcı bir üstünlük sağlayabilir. Bu nedenle, daha kapsamlı ve güvenilir bir analiz yapmak için çözümlerin çözüm uzayındaki dağılımı, çeşitliliği ve kapsadığı alanın genişliği gibi performans kriterlerinin incelenmesi büyük önem taşır. Böylece, farklı algoritmaların optimizasyon kabiliyetleri daha sağlıklı bir biçimde karşılaştırılabilir. Her algoritma için yapılan 10 bağımsız çalışmanın performans metrikleri Tablo 71 ve Tablo 72'de sunulmuştur. Tablo 71, hiper hacim ve yayılım değerlerine, Tablo 72 ise ortalama ideal mesafe sonuçlarına yer vermektedir. Her bir metrik için en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 71. 25 aktivite TCETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
OMODE	0,9824	0,9683	0,9742	0,0037	0,6699	0,9404	0,8077	0,0994
NDSIIGWO	0,9063	0,8234	0,8673	0,0270	0,8538	0,9853	0,942	0,042
NDSIIRAO1	0,9553	0,8832	0,9109	0,0214	0,9402	1,2687	1,1271	0,0922
NDSIIRAO2	0,9549	0,8891	0,9290	0,0216	0,8138	1,1572	1,0389	0,1103
NDSIIWOA	0,9417	0,8867	0,9186	0,0178	1,1937	1,5252	1,367	0,1112
SPGWO	0,9651	0,8951	0,9371	0,0237	0,4381	0,9907	0,6863	0,1839
SPRAO1	0,9869	0,9629	0,9758	0,0084	0,3559	0,5671	0,4669	0,0613
SPRAO2	0,9747	0,9553	0,9673	0,0071	0,42	0,5722	0,4685	0,0442
SPWOA	0,9807	0,9632	0,9730	0,0054	0,4322	0,6621	0,559	0,0816
NDSIIIGWO	0,9502	0,7213	0,9175	0,0692	1,0323	1,2764	1,1455	0,0665
NDSIIIRAO1	0,9687	0,9543	0,9609	0,0047	1,1641	1,56	1,3174	0,1227
NDSIIIRAO2	0,9698	0,9434	0,9601	0,0085	1,1223	1,5782	1,3232	0,1501
NDSIIIWOA	0,9666	0,9398	0,9541	0,0081	1,3227	1,726	1,5674	0,1221

Tablo 72. 25 aktivite TCETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
OMODE	0,8056	0,7629	0,7798	0,0140
NDSIIGWO	0,8158	0,7143	0,7671	0,0325
NDSIIRAO1	0,8509	0,7681	0,8270	0,0230
NDSIIRAO2	0,8588	0,7480	0,8158	0,0287
NDSIIWOA	0,8717	0,8122	0,8338	0,0180
SPGWO	0,8143	0,7645	0,7954	0,0164
SPRAO1	0,7785	0,7229	0,7646	0,0177
SPRAO2	0,7895	0,7211	0,7656	0,0229
SPWOA	0,8026	0,7723	0,7870	0,0095
NDSIIIGWO	0,6504	0,5695	0,6204	0,0229
NDSIIIRAO1	0,7574	0,7355	0,7453	0,0096
NDSIIIRAO2	0,7633	0,7010	0,7368	0,0214
NDSIIIWOA	0,7511	0,7048	0,7326	0,0147

Tablo 73'te performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmaktadır. Performans ölçümlerine ait ortalama değerler, Şekil 64'te grafiksel olarak sunulmaktadır. OMODE algoritmasının ürettiği HV ve yayılım değerleri incelendiğinde, bu çalışma kapsamında yeniden üretilen OMODE algoritması sonuçlarının (HV: 0.9742, SP: 0.8077), Cheng ve Tran (2015)

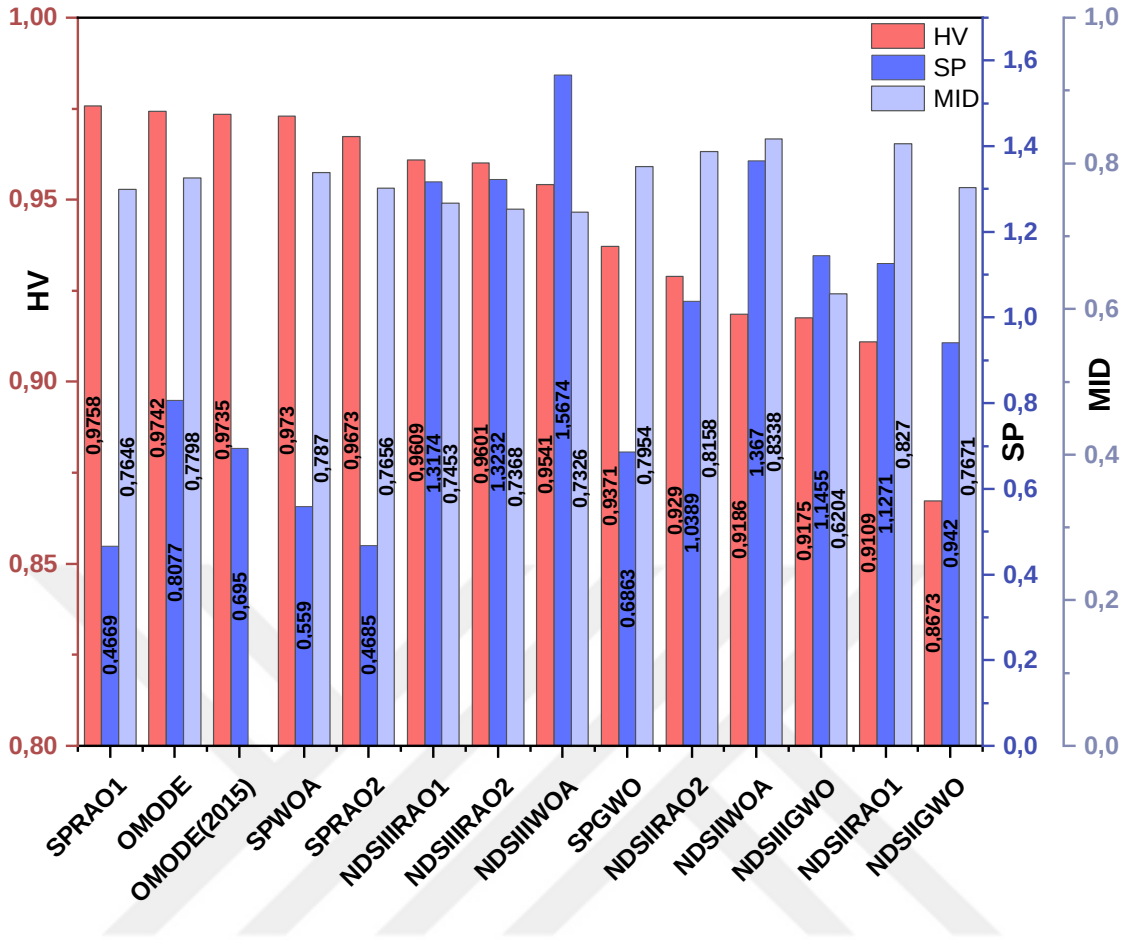
tarafından elde edilen değerlerle (HV: 0.9735, SP: 0.695) oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu da karşılaştırmada kullanılan HV değerlerinin doğru şekilde hesaplandığını göstermektedir.

Hem Şekil 64 hem de Tablo 73'te SPRAO1 algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.9758) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu (0.4669) yine SPRAO1 algoritması vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.6204) daha üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-çevresel etki açısından farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde performans değerlendirmesi yapılırken HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi bakımından, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi diğer ölçütlerden daha öncelikli kabul edilmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen SPRAO1 algoritması %81.6 daha az fonksiyon değerlendirmesi (9200) ile OMODE algoritmasına (50000) kıyasla tüm performans ölçümlerinde daha üstün sonuçlar elde etmiştir. Bu sonuçlar, SPRAO1 algoritmasının zaman-maliyet-çevresel etki problemi için daha verimli ve etkili bir çözüm yöntemi sunduğunu göstermektedir.

Tablo 73. 25 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
SPRAO1	9200	0,9758	0,4669	0,7646
OMODE	50000	0,9742	0,8077	0,7798
OMODE (2015)	50000	0,9735	0,6950	-
SPWOA	9200	0,973	0,5590	0,787
SPRAO2	9200	0,9673	0,4685	0,7656
NDSIIIRAO1	9200	0,9609	1,3174	0,7453
NDSIIIRAO2	9200	0,9601	1,3232	0,7368
NDSIIIWOA	9200	0,9541	1,5674	0,7326
SPGWO	9200	0,9371	0,6863	0,7954
NDSIIRAO2	9200	0,929	1,0389	0,8158
NDSIIWOA	9200	0,9186	1,367	0,8338
NDSIIIGWO	9200	0,9175	1,1455	0,6204
NDSIIRAO1	9200	0,9109	1,1271	0,827
NDSIIGWO	9200	0,8673	0,942	0,7671
*Bu Çalışma				



Şekil 64. 25 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.4.3. 29 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi

29 aktiviteye sahip zaman-maliyet-çevresel eti ödünleşim problemi, ilk olarak Huynh vd. (2021) tarafından tanıtılan zaman-maliyet-kalite-çevresel etki (karbondioksit emisyonu) ödünleşim problemi olarak incelenmiştir. Daha sonra, Son vd. (2023) tarafından zaman-maliyet-çevresel etki problemi olarak yeniden ele alınmış ve turnuva seçimi ile karşıt öğrenme tekniği kullanılarak geliştirilmiş bir çekirge algoritması (eMOGOA) ile çözülmüştür. Çevresel etki değerleri karbondioksit salınımı dikkate alınmış kilogram cinsinden hesaplanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Rao serileri, Gri Kurt algoritması ve Balina algoritması, çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisini araştırmak amacıyla kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), güçlendirilmiş Pareto yöntemi (SP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörleri ile ayrı ayrı

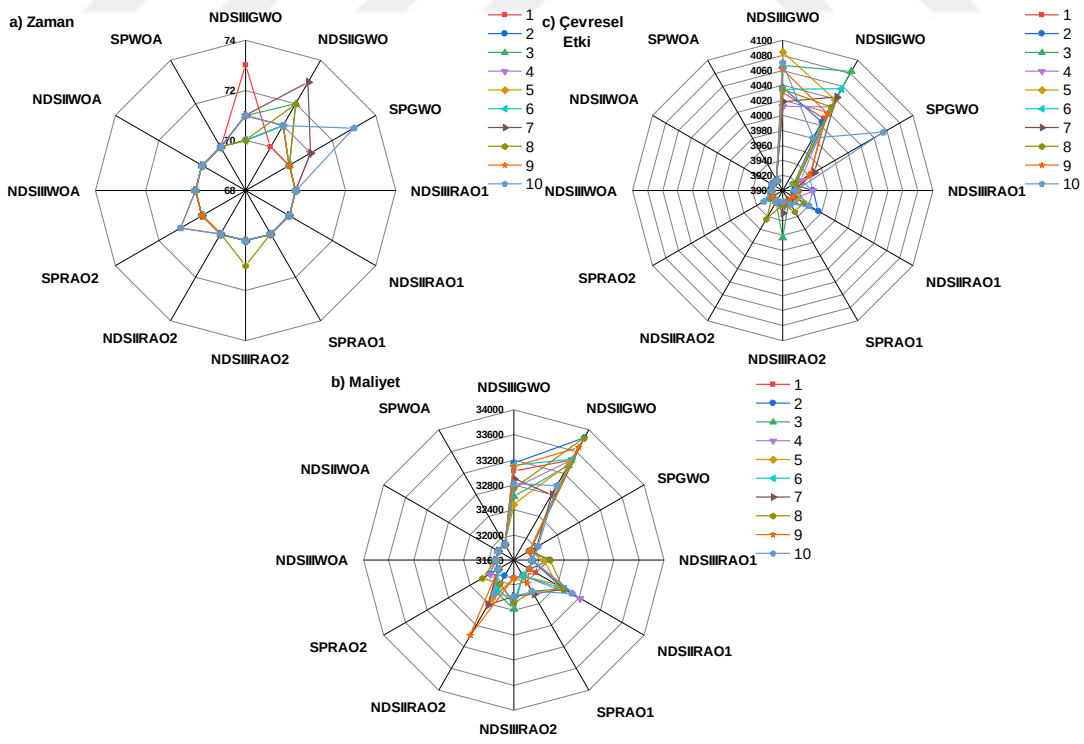
geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon boyutu 92, iterasyon sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatürdeki eMOGOA algoritması ile karşılaştırıldığında %38,6 daha az fonksiyon değerlendirmesi gerektirmekte olup, önerilen algoritmanın daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha yüksek performans göstermesi hedeflenmiştir.

29 aktiviteli problem, toplamda 8,26E+09 farklı proje tamamlanma opsiyonu sahiptir. Probleme ait aktiviteler arası öncülük ilişkileri ve zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları Tablo 74'te gösterilmektedir.

Tablo 74. 29 Aktivite zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları

No	Öncülük ilişkileri	Zaman opsiyonları			Maliyet opsiyonları			Çevresel etki opsiyonları		
		Z1	Z2	Z3	M1	M2	M3	ÇE1	ÇE2	ÇE3
1		5	4		2030	2300		175,43	172,73	
2	1FS-3	8	7	6	1020	1280	1510	106,28	93,2	86,11
3	1;2	8	7	6	1700	1850	2090	236,25	229,24	200,88
4	3	4	3		590	730		197,92	193,97	
5	4SS+1	2			90			140,53		
6	1	4	3		910	1100		117,33	115,89	
7	2;6FS-1	2			250			112,08		
8	3;7	7	6	5	1490	1650	1830	175,52	160,49	144,46
9	4;8	4	3		520	750		132,87	119,33	
10	5;9FF+1	2			90			87,32		
11	5;10	1			50			92,24		
12	11	8	7	6	3260	3580	3710	129,99	129,61	105,67
13	12SS+2	5	4	3	1140	1400	1720	244,36	239,02	199,47
14	13SS+2	4	3		300	450		85,87	76,27	
15	12FS-4 ;14FS-2	8	6	5	1020	1300	1430	131,34	129,81	99,65
16	15FS-6	9	8	6	790	900	1180	162,27	148,99	147,82
17	15SS+4	13	12	11	3340	3750	4060	166,84	159,92	120,91
18	15FS+4	9	8	7	470	650	830	196,37	179,28	172,83
19	15	6	5	4	460	600	810	201,71	190,75	153,89
20	17SS+3	6	5		1280	1430		112,05	94,8	
21	20SS+2	14	12	10	1090	1320	1560	218,89	204,64	167,94
22	21SS+2	14	11	9	900	1140	1400	180,82	178,3	172,48
23	22FS-9	14	12	11	2220	2510	2690	200,77	192,33	183,89
24	23SS+6	3			230			196,33		
25	23FS-4	6	5	4	1590	1790	1990	106,57	95,07	59,81
26	25SS+4	10	9	8	2630	2930	3240	93,86	82,05	49,94
27	26	8	7	6	2060	2450	2660	174,75	162,6	125,81
28	27FS-3	10	9	8	320	440	610	164,01	153,11	129,57
29	28	1			50			193,07		

Şekil 65'te, 29 aktiviteli problemin on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, çevresel etki ve maliyet değerleri karşılaştırılmıştır. GWO algoritması incelendiğinde, zaman açısından tüm versiyonların (NDSIIIGWO, NDSIIGWO ve SPGWO) düzensiz bir performans sergilediği görülmektedir. Çevresel etki ve maliyet parametresinde SPGWO versiyonunun diğer versiyonlara göre daha düşük değerler bulmaya çalıştığı ve optimizasyon açısından daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir, ancak yine de genel olarak tüm versiyonların yüksek değerler ürettiği görülmektedir. Balina algoritması tüm amaçlarda optimumu çözümlere ulaşma başarısı göstermiştir. Rao-1 algoritması incelendiğinde, SP ve NDSIII ile geliştirilen versiyonların üç amaçta da NDSII versiyonuna göre daha düşük değerler üreterek başarılı olduğu görülmektedir. Ancak her üç versiyonda tüm bağımsız çözümlerde aynı değerlere ulaşmakta zorluk çektiği görülmektedir. Rao-2 algoritmasına bakıldığında, güçlendirilmiş pareto yaklaşımı ve referans noktalı baskın olmayan sıralama geliştirilen modellerin, NDSII ile geliştirilen modele göre maliyeti minimize etmede daha başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Geliştirilen modeller incelendiğinde balina algoritmasının uç noktalara ulaşmada tüm bağımsız çözümlerde istikrarlı sonuçlar sunarak daha başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 65. 29 aktiviteli TCETP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler

Tablo 75'te NDSIIGWO, SPGWO ve NDSIIIGWO algoritmaları arasındaki pareto çözümleri karşılaştırıldığında, SPGWO ve NDSIIIGWO algoritmaları, NDSIIGWO algoritmasına göre daha düşük zaman değeri elde etmiştir. Maliyet ve çevresel etki öncelikli çözümler incelendiğinde, SPGWO algoritması diğer algoritmalara göre daha düşük maliyet ve çevresel etki değerleri sunmuştur. Dengeli çözümler incelendiğinde ise, NDSIIIGWO ile üretilen çözümlerin, SPGWO ve NDSIIGWO'nun ürettiği çözümlere karşı baskın geldiği görülmüştür. Balina algoritmasına ait Tablo 76'da NDSIIWO, SPWOA ve NDSIIIWOA algoritmaları arasındaki karşılaştırmada, zaman, maliyet ve çevresel etki öncelikli çözümlerde tüm seriler optimum süreye ulaşmışlardır. Dengeli çözümler incelendiğinde ise, NDSIIWOA ile üretilen tüm çözümlerin, SPWOA tarafından baskılandığı tespit edilmiştir.

Tablo 75. 29 aktiviteli TCETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	73	37560	4127.97	70	40840	3915.69	70	38080	4093.76
	2	73	37160	4283.35	70	40560	3916.86	71	37010	4150.66
	3	74	37950	4086.14	70	40370	3918.3	71	36980	4173.39
Mal. Göre	4	91	32810	4458.44	93	31890	4533.64	89	32490	4477.16
	5	91	32890	4436.25	93	32000	4520.36	88	32670	4461.13
	6	90	32970	4437.4	93	32120	4519.39	86	32730	4474.64
Çevresel Etk.	7	75	38930	4043.49	70	40840	3915.69	75	37240	4085.06
	8	74	37950	4086.14	70	40560	3916.86	73	37760	4088.8
	9	80	37750	4109.76	70	40370	3918.3	70	38080	4093.76
Deng.	10	82	34100	4423.73	84	36450	4171.11	81	34670	4295.83
	11	83	33740	4457.76	85	33630	4470.5	82	33630	4406.62
	12	84	33530	4442.84	86	32800	4498.7	83	33540	4427.71

Tablo 76. 29 aktiviteli TCETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWO			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	70	40250	3943.96	70	40840	3915.69	70	40840	3915.69
	2	70	40840	3915.69	70	40560	3916.86	70	40100	3960.36
	3	70	40560	3916.86	70	40380	3945.02	70	37850	4120.59
Mal. Göre	4	93	31890	4533.64	93	31890	4533.64	93	31890	4533.64
	5	92	32010	4522.74	93	32000	4520.36	92	32120	4520.1
	6	93	32120	4519.39	90	32130	4531.12	93	32120	4519.39
Çevresel Etk.	7	70	40840	3915.69	70	40840	3915.69	70	40840	3915.69
	8	70	40560	3916.86	70	40380	3945.02	70	40700	3919.64
	9	71	40330	3923.95	70	40060	3945.4	70	40100	3960.36

Tablo 76’nın devamı

Deng.	10	81	36070	4211.76	80	35670	4202.53	80	35000	4389
	11	84	34320	4417.38	83	34270	4324.44	85	35380	4230.42
	12	85	34240	4376.51	85	33920	4364.01	86	33430	4473

Tablo 77’de 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-1 algoritmasının NDSIIRAO1, SPRAO1 ve NDSIIIRAO1 versiyonlarının Pareto çözümlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Zaman öncelikli çözümler incelendiğinde, üç versiyonun da en düşük zaman değerini sağladıkları görülmektedir. Ancak, NDSIIIRAO1 tarafından üretilen 1. Pareto çözümü, SPRAO1 tarafından baskılanmıştır. Maliyet öncelikli çözümler incelendiğinde, SP ve NDSIIRAO1 ile geliştirilen çözümlerin optimum zamana ulaşmada NDSIIIRAO1’e göre daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, NDSIIIRAO1’in ürettiği Pareto çözümlerinin diğer versiyonlar tarafından baskılanamadığı da dikkat çekmektedir. Dengeli çözümler açısından bakıldığında, SPRAO1 algoritmasına ait 10. ve 11. Pareto çözümlerinin, NDSIIIRAO1 tarafından domine edildiği görülmüştür. Bu sonuçlar, NDSIIIRAO1’in dengeli çözümler ve çevresel etki öncelikli çözümler açısından güçlü bir seçenek sunduğunu, SPRAO1’in ise bazı zaman ve maliyet öncelikli çözümler açısından avantaj sağladığını göstermektedir.

Tablo 78’de, 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasının NDSIIRAO2, SPRAO2 ve NDSIIIRAO2 versiyonlarının Pareto çözümlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Zaman ve maliyet öncelikli çözümler incelendiğinde, üç versiyonunda optimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Çevresel etki öncelikli pareto çözümlerinde NDSIII ve NDSII ile geliştirilen Rao-2 algoritmalarının SP ile geliştirilen versiyona göre daha iyi sonuçlar ettiği görülmektedir. Dengeli çözümler incelendiğinde ise, NDSIIIRAO2 algoritmasının, NDSII ve SP versiyonlarına göre baskın geldiği görülmektedir.

Özetle tüm algoritmalar incelendiğinde NDSIII ve SP ile geliştirilen algoritmaların, NDSII ile geliştirilen versiyonlarına göre dengeli çözümleri üretmede daha baskın geldiği tablolardan görülmektedir.

Tablo 77. 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	70	39350	3990.76	70	40840	3915.69	70	40390	3940.01
	2	70	39900	3955.12	70	40370	3918.3	70	38160	4174.45
	3	70	39530	3973.67	70	40560	3916.86	70	38950	4021.06
Mal. Göre	4	93	31890	4533.64	93	31890	4533.64	91	32180	4499.2
	5	92	32040	4526.63	92	32010	4522.74	91	32180	4499.2
	6	92	32150	4511.78	91	32170	4507.71	91	32180	4499.2
Çevresel Etk. Göre	7	70	39900	3955.12	70	40840	3915.69	70	40840	3915.69
	8	70	39640	3960.39	70	40560	3916.86	75	39900	3939.74
	9	71	39370	3963.09	70	40370	3918.3	73	39830	3940.19
Dengeli	10	82	34620	4346.91	81	37890	4089.43	81	37820	4059.94
	11	83	34670	4312.76	82	33800	4429.6	82	33660	4420.58
	12	84	33180	4479.32	83	34670	4312.76	83	36280	4154.9

Tablo 78. 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	70	40840	3915.69	71	40570	3918.39	70	37180	4196.83
	2	70	39450	3990.78	71	40290	3919.56	70	37470	4166.46
	3	70	40560	3916.86	71	40150	3923.51	70	38200	4072.77
Mal. Göre	4	93	31890	4533.64	93	31890	4533.64	93	31890	4533.64
	5	93	32030	4529.69	93	32030	4522.68	92	32040	4524.04
	6	92	32040	4524.04	92	32150	4520.56	92	32180	4513.08
Çevresel Etk. Göre	7	70	40840	3915.69	71	40570	3918.39	70	40840	3915.69
	8	70	40560	3916.86	71	40290	3919.56	74	40080	3937.75
	9	70	40380	3923.31	71	40150	3923.51	73	39890	3940
Dengeli	10	82	37700	4098.61	81	37570	4052.14	81	37430	4051.85
	11	83	37660	4087.19	82	37730	4031.15	82	37710	4021.48
	12	86	36600	4198.74	84	34550	4348.41	84	34460	4320.04

Bir sonraki bölümde performans metrikleri açısından ortalama HV ölçütüne bakıldığında en yüksek değere sahip olan NDSIIIRAO2 ve onu takip eden SPRAO2 algoritması olarak görülmektedir. Literatürde, Son vd. (2023) yaptıkları çalışmalarda eMOGOA algoritması için sadece en iyi zaman, maliyet ve çevresel etki değerlerini sunmuşlardır. Tablo 79'da, Rao-2 algoritması ile geliştirilen NDSIII ve SP tarafından

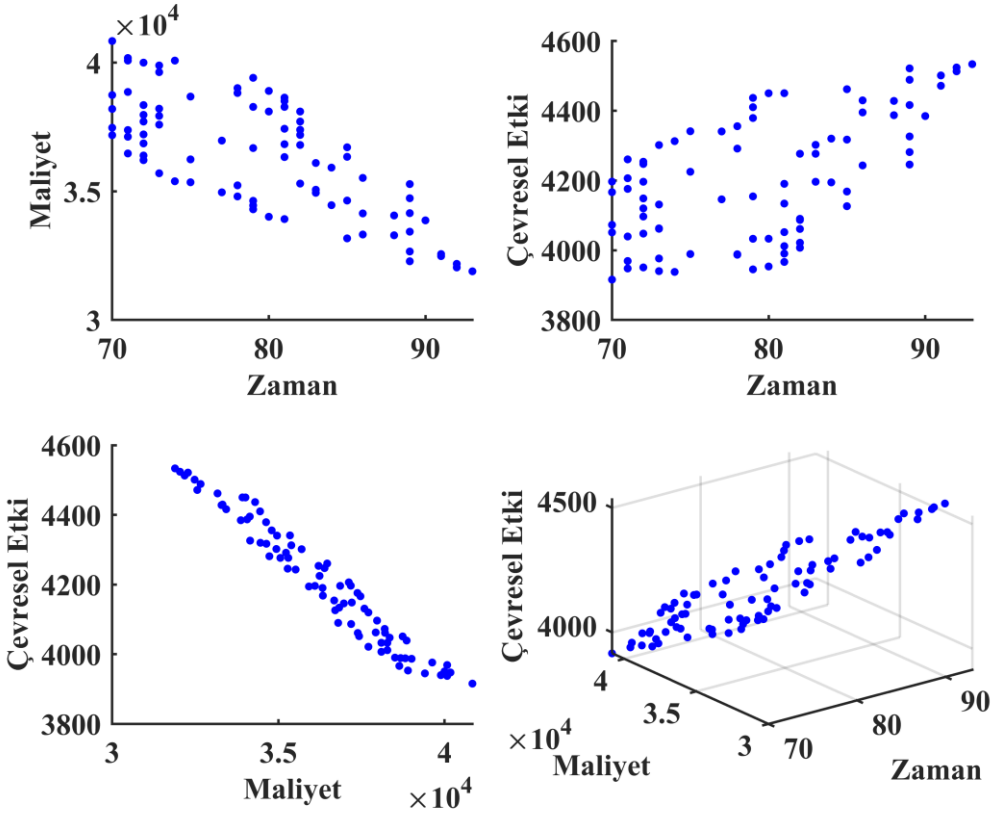
üretilen pareto çözümlerini, literatürdeki eMOGOA pareto çözümleri ile karşılaştırmaktadır. Zaman, maliyet ve çevresel etki öncelikli çözümler incelendiğinde üç algoritmada optimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmalar, optimum değerlere eMOGOA algoritması ile karşılaştırıldığında %38 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile ulaşmıştır. Tablo 80'de, NDSIIIRAO2 algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait pareto çözümleri kullanıp opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 66'da pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 79. 29 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin, eMOGOA algoritması pareto çözümleriyle karşılaştırılması

	No	eMOGOA (2023)			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	70	36670	4250.01	71	40570	3918.39	70	37180	4196,83
	2	70	40410	3918.30	71	40290	3919.56	70	37470	4166,46
	3	-	-	-	71	40150	3923.51	70	38200	4072,77
Mal. Göre	4	93	31890	4533.64	93	31890	4533.64	93	31890	4533.64
	5	92	32010	4522.74	93	32030	4522.68	92	32040	4524.04
	6	-	-	-	92	32150	4520.56	92	32180	4513.08
Çevresel Etk. Göre	7	70	40840	3915.69	71	40570	3918.39	70	40840	3915,69
	8	70	40370	3918.30	71	40290	3919.56	74	40080	3937,75
	9	-	-	-	71	40150	3923.51	73	39890	3940
Dengeli	10	-	-	-	81	37570	4052.14	81	37430	4051.85
	11	-	-	-	82	37730	4031.15	82	37710	4021.48
	12	-	-	-	84	34550	4348.41	84	34460	4320.04

Tablo 80. 25 Aktivite TCETP için NDSIIIRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	Ç.E.
Minimum Zaman	1	2,3,3,1,1,2,1,3,2,1,1,1,2,2,1,1,1,1,3,2,1,3,3,1,1,3,3,3,1	70	37180	4196.83
	2	2,3,3,1,1,2,1,3,2,1,1,1,2,2,1,2,1,2,3,2,1,3,3,1,1,3,3,3,1	70	37470	4166.46
	3	2,3,3,1,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,3,1,1,1,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	38200	4072.77
Minimum Maliyet	4	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	93	31890	4533.64
	5	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	92	32040	4524.04
	6	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	92	32180	4513.08
Minimum Çevresel Etki	7	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	40840	3915.69
	8	1,3,3,2,1,2,1,3,1,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,2,3,1,3,3,3,3,1	74	40080	3937.75
	9	1,1,3,2,1,1,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	73	39890	3940



Şekil 66. NDSIIIRAO2 tarafından üretilmiş 25 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki pareto grafiği

3.4.4. 29 Aktivite TCETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 81'de, 29 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki problemi için algoritmaların kendi içlerinde C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir. GWO algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIGWO ve SPGWO algoritmaları birbirlerinin çözümlerinin yaklaşık %24 ve %25'ini karşılıklı olarak domine ettiği görülmektedir. NDSIIIGWO, NDSIIGWO çözümlerinin %70'ini domine ederken, NDSIIGWO tarafından sadece %1.6 oranında domine edilmiştir. NDSIIIGWO ile SPGWO karşılaştırıldığında ise NDSIIIGWO'nun SPGWO'yu %48 oranında domine ettiği, SPGWO'nun ise NDSIIIGWO'yu %2 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir. WOA algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIWOA ve SPWOA birbirlerinin çözümlerini sırasıyla %17 ve %29 oranlarında domine etmiştir. NDSIIIWOA, NDSIIWOA çözümlerinin %17'sini domine ederken, NDSIIWOA tarafından %18 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA ile SPWOA karşılaştırmasında, NDSIIIWOA'nın SPWOA'yı %14 oranında, SPWOA'nın ise NDSIIIWOA'yı %23 oranında domine ettiği görülmektedir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIRAO1 ve SPRAO1 birbirlerinin çözümlerini sırasıyla %25 ve %22 oranlarında domine etmiştir. NDSIIIRAO1, NDSIIRAO1 çözümlerinin %34'ünü domine ederken, NDSIIRAO1 tarafından %12 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO1 ile SPRAO1 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in SPRAO1'i %35 oranında, SPRAO1'in ise NDSIIIRAO1'i %12 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

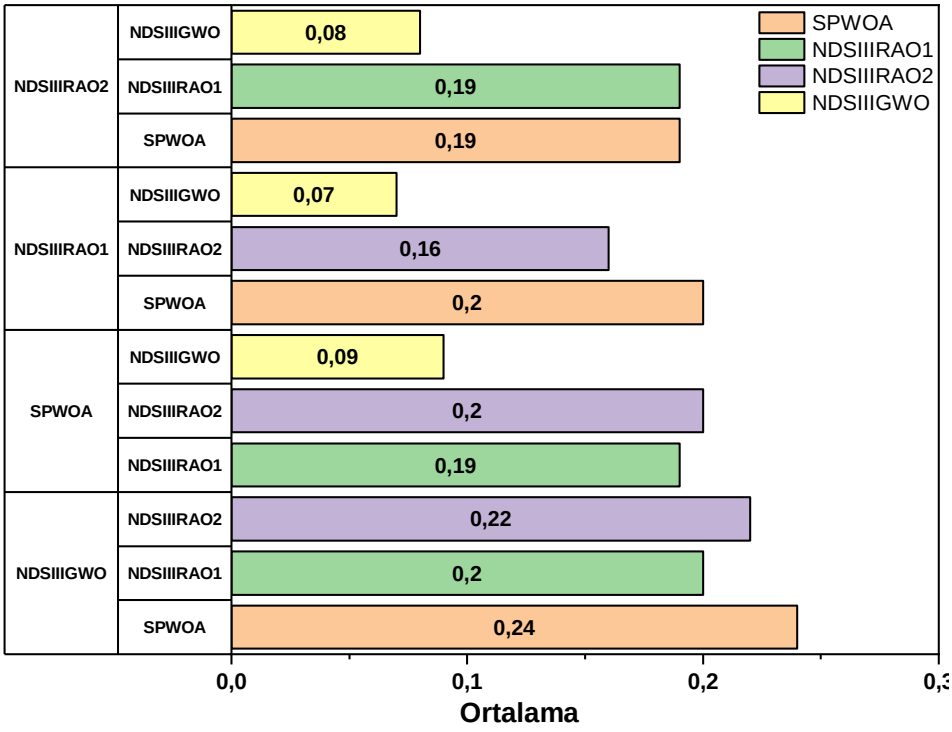
Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIRAO2 ve SPRAO2 birbirlerinin çözümlerini sırasıyla %17 ve %19 oranlarında domine etmiştir. NDSIIIRAO2, NDSIIRAO2 çözümlerinin %28'ini domine ederken, NDSIIRAO2 tarafından %14 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO2 ile SPRAO2 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO2'nin SPRAO2'yi %28 oranında, SPRAO2'nin ise NDSIIIRAO2'yi %12 oranında domine ettiği görülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm algoritmalarda NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların diğer versiyonlara göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. GWO algoritmasında NDSIIIGWO, WOA algoritmasında SPWOA, Rao-1 algoritmasında NDSIIIRAO1 ve Rao-2 algoritmasında NDSIIIRAO2 versiyonları daha baskın çözümler sunmaktadır. SP operatörü ile geliştirilen versiyonlar ise genellikle NDSII versiyonlarına göre daha iyi, NDSIII versiyonlarına göre daha düşük performans sergilemiştir.

29 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) Şekil 67'de gösterilmektedir. NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, SPWOA'nın %24'ünü, NDSIIIRAO1'in %20'sini ve NDSIIIRAO2'nin %22'sini domine ettiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık NDSIIIGWO algoritması SPWOA tarafından %9, NDSIIIRAO1 tarafından %7 ve NDSIIIRAO2 tarafından %8 oranında domine edilmiştir. SPWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in %19'unu ve NDSIIIRAO2'nin %20'sini domine ettiği görülmektedir. Diğer taraftan, SPWOA algoritması NDSIIIRAO1 tarafından %20 ve NDSIIIRAO2 tarafından %19 oranında domine edilmiştir. Rao-1'in NDSIII versiyonu incelendiğinde, NDSIIIRAO2'nin %16'sını domine ettiği ancak NDSIIIRAO2 tarafından %19 oranında domine edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm NDSIII versiyonları birbirlerine yakın performans sergilemiştir.

Tablo 81. 29 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(NDSIIGWO,SPGWO)	0,5500	0,0600	0,2407	0,0969
C(SPGWO, NDSIIGWO)	0,5500	0,0600	0,2482	0,1025
C(NDSIIGWO,NDSIIIGWO)	0,1209	0,0000	0,0163	0,0226
C(NDSIIIGWO,NDSIIGWO)	0,9100	0,2900	0,7011	0,1312
C(SPGWO, NDSIIIGWO)	0,1758	0,0000	0,0212	0,0286
C(NDSIIIGWO,SPGWO)	0,7800	0,2700	0,4878	0,1030
C(NDSIIWOA,SPWOA)	0,3800	0,0500	0,1754	0,0803
C(SPWOA, NDSIIWOA)	0,5500	0,1000	0,2932	0,1042
C(NDSIIWOA,NDSIIIWOA)	0,5385	0,0110	0,1867	0,1032
C(NDSIIIWOA,NDSIIWOA)	0,4000	0,0300	0,1757	0,0807
C(SPWOA, NDSIIIWOA)	0,5385	0,0110	0,2345	0,1180
C(NDSIIIWOA,SPWOA)	0,4000	0,0000	0,1429	0,0715
C(NDSIIRAO1,SPRAO1)	0,4700	0,0200	0,2559	0,0946
C(SPRAO1, NDSIIRAO1)	0,5700	0,0100	0,2286	0,1203
C(NDSIIRAO1,NDSIIIRAO1)	0,2967	0,0220	0,1275	0,0670
C(NDSIIIRAO1,NDSIIRAO1)	0,6200	0,0800	0,3450	0,1254
C(SPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,3077	0,0110	0,1202	0,0702
C(NDSIIIRAO1,SPRAO1)	0,5200	0,1300	0,3583	0,0851
C(NDSIIRAO2,SPRAO2)	0,3800	0,0200	0,1795	0,0901
C(SPRAO2, NDSIIRAO2)	0,3400	0,0800	0,1952	0,0557
C(NDSIIRAO2,NDSIIIRAO2)	0,3626	0,0110	0,1429	0,0656
C(NDSIIIRAO2,NDSIIRAO2)	0,5700	0,0500	0,2878	0,1223
C(SPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,2857	0,0000	0,1225	0,0673
C(NDSIIIRAO2,SPRAO2)	0,5000	0,1500	0,2894	0,0678



Şekil 67. 29 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Her algoritma için yapılan 10 bağımsız çalışmanın sonucunda elde edilen performans metrikleri değerlendirilmiştir. Tablo 82 hiper hacim ve yayılım değerlerini içerirken, Tablo 83'de ortalama ideal mesafe sonuçları yer almaktadır. Her bir metrik için en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir.

Tablo 82. 29 aktivite TCETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0.8222	0.7366	0.7707	0.0294	0.6228	0.7904	0.7041	0.0523
NDSIIRAO1	0.8971	0.8496	0.8731	0.0173	0.5089	0.6666	0.5782	0.0486
NDSIIRAO2	0.9016	0.8763	0.8857	0.0067	0.4702	0.7036	0.5801	0.0807
NDSIIWOA	0.8881	0.8722	0.8802	0.0056	0.6852	0.9989	0.817	0.1025
SPGWO	0.8816	0.7484	0.8562	0.0404	0.185	0.4265	0.2532	0.0777
SPRAO1	0.9090	0.8849	0.8958	0.0077	0.1409	0.2219	0.1707	0.0292
SPRAO2	0.9218	0.8849	0.9099	0.0120	0.1298	0.1946	0.1614	0.0202
SPWOA	0.9132	0.8706	0.8973	0.0135	0.1805	0.2834	0.2225	0.0267
NDSIIIGWO	0.8496	0.7815	0.8172	0.0236	0.7884	1.1141	0.9324	0.1287
NDSIIIRAO1	0.9264	0.8824	0.9076	0.0153	0.6446	1.0583	0.7471	0.119
NDSIIIRAO2	0.9231	0.9029	0.9146	0.0066	0.5571	0.7861	0.6594	0.0724
NDSIIIWOA	0.8865	0.8368	0.8691	0.0146	1.2742	1.8636	1.5735	0.1829

Tablo 83. 29 aktivite TCETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0.8293	0.9058	0.8667	0.0242
NDSIIRAO1	0.8862	0.9612	0.9317	0.0264
NDSIIRAO2	0.8950	0.9637	0.9313	0.0208
NDSIIWOA	0.9338	0.9643	0.9483	0.0104
SPGWO	0.9176	0.9505	0.9359	0.0093
SPRAO1	0.9139	0.9617	0.945	0.0163
SPRAO2	0.9169	0.9611	0.9474	0.0125
SPWOA	0.9142	0.966	0.9382	0.0151
NDSIIIGWO	0.7827	0.8709	0.8267	0.0321
NDSIIIRAO1	0.8712	0.9536	0.9112	0.0261
NDSIIIRAO2	0.8512	0.9291	0.8965	0.0262
NDSIIIWOA	0.8809	0.9425	0.9205	0.0191

Tablo 84'te performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmaktadır. Tabloda yer alan performans ölçümlerine ait ortalama değerler, Şekil 68'de grafiksel olarak sunulmaktadır. NDSIIIRAO2 algoritmasının ürettiği HV değerleri incelendiğinde, 29 aktiviteli zaman-

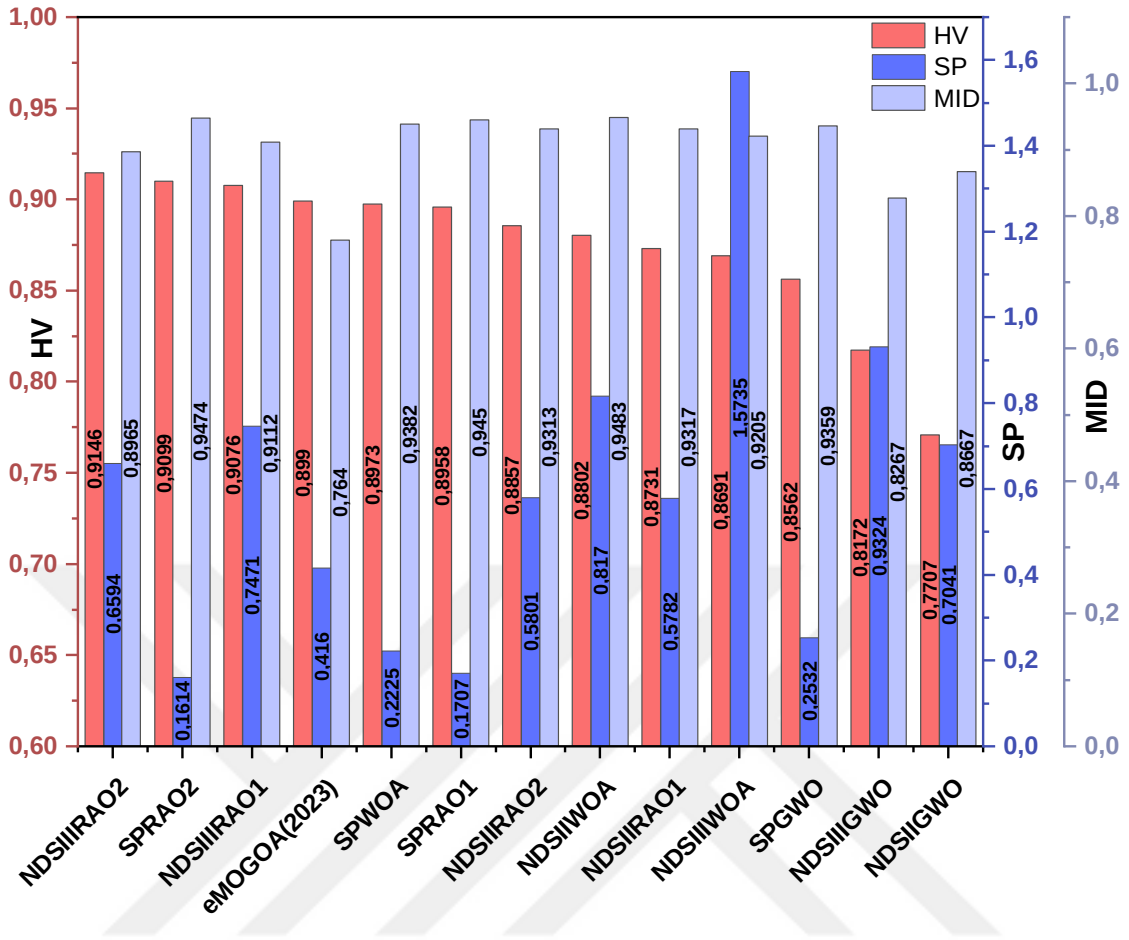
maliyet-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen bu algoritmanın diğer yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir.

Tablo 84 ve Şekil 68'dan görülebileceği gibi, NDSIIIRAO2 algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.9146) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPRAO2 algoritması (0.1614) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, eMOGOA(2023) algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.7640) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, HV metriği çözüm setinin Pareto cephesinde kapsadığı alanın kalitesini ve genişliğini doğrudan ölçerek çözüm çeşitliliği ile karar vericilere geniş bir yelpazede farklı çözüm alternatifleri sunar. Bu özellikleriyle HV, yalnızca çözümlerin ideal noktaya yakınlığını veya homojen dağılımını ölçen MID ve SP gibi metriklerden daha kapsamlı bilgi sunmaktadır. eMOGOA (2023) algoritması diğer algoritmalara göre %63 daha fazla fonksiyon değerlendirmesi (15000) kullanmasına rağmen, HV ve SP metrikleri açısından NDSIIIRAO2 ve SPRAO2 algoritmalarının gerisinde kalmıştır. Bu durum, NDSIIIRAO2 algoritmasının zaman-maliyet-çevresel etki probleminin çözümünde daha kapsamlı ve dengeli bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Tablo 84. 29 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
NDSIIIRAO2	9200	0,9146	0,6594	0,8965
SPRAO2	9200	0,9099	0,1614	0,9474
NDSIIIRAO1	9200	0,9076	0,7471	0,9112
eMOGOA(2023)	15000	0,8990	0,4160	0,7640
SPWOA	9200	0,8973	0,2225	0,9382
SPRAO1	9200	0,8958	0,1707	0,9450
NDSIIRAO2	9200	0,8857	0,5801	0,9313
NDSIIWOA	9200	0,8802	0,817	0,9483
NDSIIRAO1	9200	0,8731	0,5782	0,9317
NDSIIIWOA	9200	0,8691	1,5735	0,9205
SPGWO	9200	0,8562	0,2532	0,9359
NDSIIIGWO	9200	0,8172	0,9324	0,8267
NDSIIGWO	9200	0,7707	0,7041	0,8667



Şekil 68. 29 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.4.5. 250 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi

Bu çalışmada, çok amaçlı optimizasyonda kullanılan operatörlerin, küçük ve orta ölçekli zaman-maliyet-çevresel etki problemlerinin yanı sıra büyük ölçekli inşaat projelerine etkileri de değerlendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, Tablo 63'te opsiyonlarıyla sunulan 25 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki problemi 10 kat büyütülerek, 250 aktiviteli çok amaçlı zaman- zaman-maliyet-çevresel etki problemine dönüştürülmüştür. Bu proje toplamda 2,012E+77 farklı proje tamamlama kombinasyonu içermektedir. Tüm algoritmalar, 92 popülasyon ve 200 iterasyon ile çözüme ulaştırılmıştır.

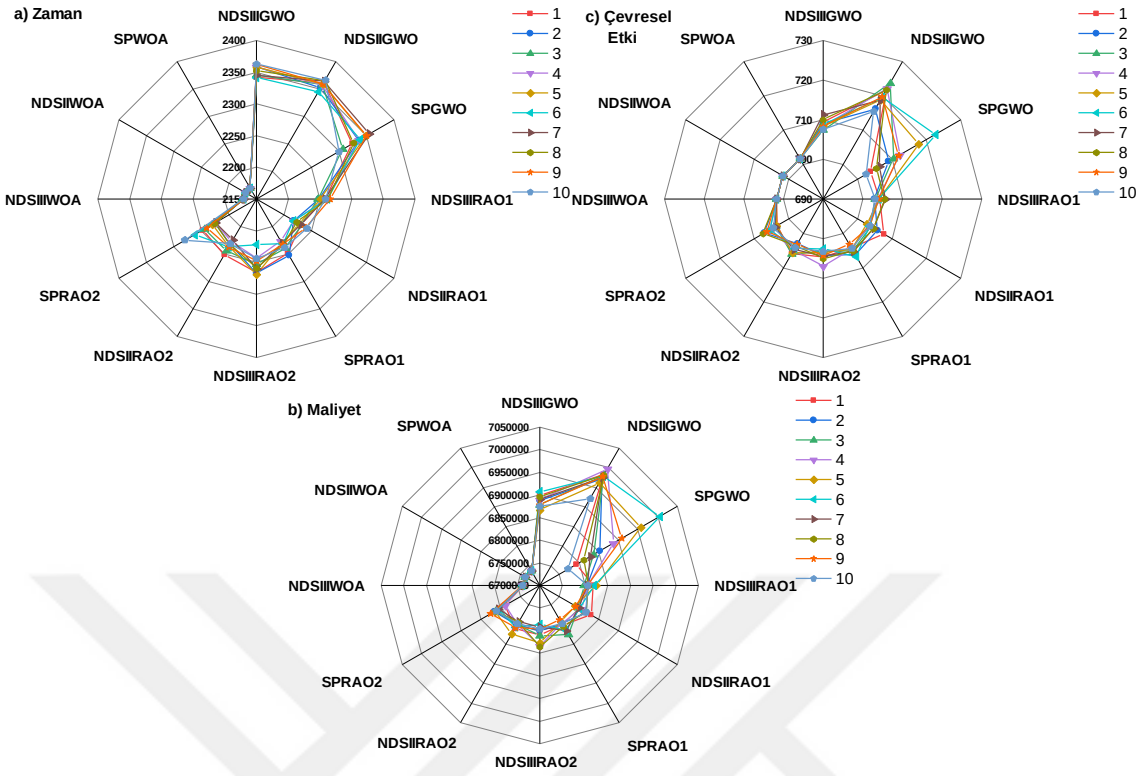
Şekil 69'da on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliye ve minimum çevresel etki değerleri karşılaştırılmıştır. GWO algoritması değerlendirildiğinde,

zaman açısından tüm versiyonların (NDSIIIGWO, NDSIIGWO ve SPGWO) yüksek değerler ürettiği ve optimizasyon açısından başarısız olduğu görülmektedir. Çevresel etki parametresinde SPGWO versiyonunun diğer versiyonlara göre daha düşük değerler bulmaya çalıştığı ve optimizasyon açısından daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir, ancak yine de genel olarak tüm versiyonların yüksek değerler ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından da GWO'nun tüm versiyonları istenilen minimum değerlere ulaşamamıştır.

WOA algoritması incelendiğinde, tüm versiyonların (SPWOA, NDSIIWOA ve NDSIIIWOA) üç parametrede de benzer değerler üreterek istikrarlı bir performans sergilediği gözlemlenmektedir. Zaman, çevresel etki ve maliyet optimizasyonunda versiyonlar arasında belirgin bir fark olmadığı ve algoritmanın kararlı bir yapıda çalıştığı görülmektedir. Rao-1 ve Rao-2 algoritması analiz edildiğinde, tüm versiyonların (SP, NDSII ve NDSIII) benzer performans gösterdiği görülmektedir. Zaman, çevresel etki ve maliyet optimizasyonunda versiyonlar arasında önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

Genel değerlendirmede, GWO algoritması tüm parametrelerde en yüksek değerleri üreterek diğer algoritmalara göre daha başarısız bir performans sergilemiştir. Rao-1 ve Rao-2 algoritmaları ise benzer performans göstererek birbirlerine yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Balina algoritması ise optimum zaman, maliyet ve çevresel etki değerlerine tüm bağımsız koşumlarda ulaşmayı başarmıştır. Bu sonuçlar, 250 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki ödünleşim probleminde amaç sadece uç noktalara ulaşmak ise, WOA algoritmasının diğer algoritmalara göre çok daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Tablo 85'te, 250 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki problemi için Gri kurt algoritmasının farklı versiyonları ile geliştirilmiş pareto çözümleri gösterilmektedir. Zaman, maliyet ve çevresel etki öncelikli çözümlerde, güçlendirilmiş pareto cephesi ile geliştirilen GWO algoritmasının diğer versiyonlara göre daha düşük değerler elde ettiği tablodan görülebilmektedir. Üretilen pareto çözümleri incelendiğinde NDSIIGWO ile üretilen tüm çözümlerin diğer versiyonlar tarafından baskılandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, dengeli çözümler incelendiğinde NDSIIIGWO algoritmasının çözümlerinin, SPGWO tarafından üretilen çözümlere karşı baskın olduğu görülmektedir. Özetle uç noktaları elde etmede SP algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği, ancak NDSIII ile geliştirilen hiçbir pareto çözümü diğer algoritmalar tarafından baskılanamadığı da tespit edilmiştir.



Şekil 69. 250 aktiviteli TCETP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler

Tablo 85. 250 aktiviteli TCETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	2367	7147000	746.58	2300	7244500	736.05	2358	7158300	738.35
	2	2368	7133700	740.07	2301	7239700	735.26	2363	7150200	738.41
	3	2380	7128000	746.25	2302	7234900	734.47	2365	7136300	735.63
Mal. Göre	4	2500	6922100	720.29	2608	6772100	702.56	2510	6865900	712.80
	5	2495	6926100	722.35	2601	6775500	702.62	2498	6867000	708.62
	6	2486	6935700	723.23	2595	6778200	702.70	2476	6872400	711.89
Çevresel Etk. Göre	7	2482	6980100	715.58	2608	6772100	702.56	2467	6898000	708.42
	8	2482	6964400	716.42	2601	6775500	702.62	2456	6904400	708.58
	9	2476	6988500	717.87	2595	6778200	702.70	2498	6867000	708.62
Dengeli	10	2435	7021400	722.74	2440	7018200	724.4	2380	7013600	722.72
	11	2446	7004100	720.61	2448	7000400	723.03	2445	6883700	710.33
	12	2461	6983400	720.35	2463	6965300	724.79	2461	6881200	708.98

Balina optimizasyon algoritmasının üç versiyonu (NDSIIWOA, SPWOA ve NDSIIIWOA) incelendiğinde, zaman öncelikli çözümlerde tüm versiyonların minimum süre olan 2170 güne ulaştığı görülmektedir. Maliyet optimizasyonunda da benzer şekilde her üç

versiyon 6738000$ değerine ulaşarak optimum sonucu elde etmiştir. Çevresel etki açısından da tüm versiyonların optimum sonuca ulaştığı Tablo 86'da görülebilmektedir. Dengeli çözümler incelendiğinde SPWOA algoritması, özellikle 10. ve 11. pareto çözümlerinde daha düşük maliyet ve çevresel etki değerleri üreterek diğer versiyonlardaki, NDSII'de 10. ve 11. Pareto, NDSIII'de 10., 11. ve 12. Pareto çözümlerine karşı baskınlık kurmuştur.

Tablo 86. 250 aktiviteli TCETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	2170	7460000	769	2170	7460000	769	2170	7460000	769
	2	2173	7450000	767.4	2171	7455200	768.21	2225	7350400	751.53
	3	2174	7440800	765.84	2172	7450400	767.42	2243	7303600	744.24
Mal. Göre	4	2680	6738000	701.70	2680	6738000	701.70	2680	6738000	701.70
	5	2672	6742800	701.78	2672	6742800	701.78	2662	6776400	704.85
	6	2663	6747600	701.94	2664	6747600	701.86	2631	6781700	705.20
Çevresel Etk. Göre	7	2680	6738000	701.70	2680	6738000	701.70	2680	6738000	701.70
	8	2672	6742800	701.78	2672	6742800	701.78	2647	6794200	702.22
	9	2663	6747600	701.94	2664	6747600	701.86	2587	6839000	703.68
Dengeli	10	2389	7075200	730.27	2387	7065200	729.41	2400	7071900	734.56
	11	2435	7012400	724.21	2433	6993400	716.41	2440	7004000	723.15
	12	2503	6898400	716.75	2451	6987000	717.43	2505	6924500	721.48

Tablo 87'de Rao-1 algoritmasının farklı versiyonlarına bakıldığında, zaman ve çevresel etki öncelikli çözümlerde NDSII ile üretilen Rao-1 algoritması ön plana çıkarken, maliyet öncelikli pareto çözümlerinde ise SP ile geliştirilen versiyonun ön plana çıktığı görülmektedir. Dengeli çözümler incelendiğinde ise NDSIIIRAO1 versiyonu, özellikle 10. ve 11. pareto çözümlerinde, diğer versiyonlara göre hem maliyet hem de çevresel etki açısından daha iyi bir denge kurmuştur. Bu durum, NDSIII operatörünün dengeli çözümler üretmedeki etkinliğini göstermektedir. Tablo 88'de Rao-2 algoritması incelendiğinde, zaman, maliyet ve çevresel etki öncelikli çözümlerde NDSIII ile geliştirilen versiyonun diğer versiyonlara göre daha düşük değerler ürettiği görülmektedir.

Tablo 87. 250 aktiviteli TCETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	2228	7357800	762.97	2233	7386300	761.8	2247	7364700	760.41
	2	2228	7354800	764.28	2235	7380000	761.38	2250	7361400	760.39
	3	2234	7352400	763.43	2235	7367300	764.6	2267	7330400	758.94
Mal. Göre	4	2608	6789600	702.66	2602	6787600	703.27	2587	6796700	704.01
	5	2597	6794200	702.76	2593	6792000	703.37	2581	6798900	708.17
	6	2589	6798300	702.84	2590	6795000	703.39	2578	6806500	709.75
Çevresel Etk. Göre	7	2608	6789600	702.66	2602	6787600	703.27	2587	6806900	703.12
	8	2597	6794200	702.76	2593	6792000	703.37	2572	6844400	703.69
	9	2589	6798300	702.84	2590	6795000	703.39	2587	6796700	704.01
Dengeli	10	2396	7095000	730.72	2386	7125500	734.53	2381	7064800	719.65
	11	2439	7025300	725.38	2452	7008400	726.26	2444	6959100	715.22
	12	2228	7357800	762.97	2233	7386300	761.8	2247	7364700	760.41

Tablo 88. 250 aktiviteli TCETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.	Z	M	Ç.E.
Zam. Göre	1	2225	7381800	760.16	2225	7398400	761.9	2222	7408800	768.16
	2	2227	7371800	760.12	2227	7392300	762.87	2222	7413000	766.96
	3	2228	7377800	758.32	2231	7387800	759.18	2258	7377600	762.4
Mal. Göre	4	2592	6793000	704.7	2598	6787800	705.48	2626	6786400	705.32
	5	2577	6804500	704.92	2596	6793400	705.52	2633	6788700	702.5
	6	2566	6809800	705.04	2590	6799700	705.56	2622	6789800	702.58
Çevresel Etk. Göre	7	2592	6793000	704.7	2598	6787800	705.48	2633	6788700	702.5
	8	2574	6811600	704.9	2596	6793400	705.52	2622	6789800	702.58
	9	2577	6804500	704.92	2590	6799700	705.56	2572	6833000	703.73
Dengeli	10	2403	7044000	735.8	2385	7139700	732.36	2383	7099600	730.02
	11	2458	6975200	721.65	2445	7023800	720.54	2435	7015800	718.7
	12	2467	6945100	722.99	2470	6998000	718.66	2461	6955100	718.53

Ürettiği Pareto çözümlerinin uç noktaları bulma kabiliyeti, çözüm uzayında daha iyi dağılması ve kaliteli çözümler üretmesi nedeniyle, performans ölçütlerinde en iyi ortalama HV değerini sağlayan SPWOA algoritması, 250 aktivite TCETP problemi için diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Tablo 89'da SPWOA algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait Pareto çözümleri ve kullandığı opsiyonlar sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 70'te pareto çözümlerinin grafiksel dağılımını göstermektedir.

Tablo 89. 180 aktivite TCQTP için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K
Minimum Zaman	4,3,1,2,3,1,3,4,3,3,3,1,2,3,2,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1,4,3,1,2,3,1,3,4,3,3,3,3,1,2,3,2,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1,4,3,1,2,3,1,3,4

3.4.6. 250 Aktivite TCETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 90'da, 250 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki problemi için algoritmaların kendi içlerinde C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

GWO algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIGWO algoritması SPGWO'nun çözümlerinin %12'sini domine ederken, SPGWO tarafından %47 oranında domine edilmiştir. NDSIIIGWO, NDSIIGWO çözümlerinin %99'unu domine ederken, NDSIIGWO tarafından hiç domine edilememiştir (%0). NDSIIIGWO ile SPGWO karşılaştırıldığında ise NDSIIIGWO'nun SPGWO'yu %81 oranında domine ettiği, SPGWO'nun ise NDSIIIGWO'yu sadece %0.08 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

WOA algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIWOA algoritması SPWOA'nın %16'sını domine ederken, SPWOA tarafından %36 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA, NDSIIWOA çözümlerinin %7'sini domine ederken, NDSIIWOA tarafından %30 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA ile SPWOA karşılaştırmasında, NDSIIIWOA'nın SPWOA'yı %5 oranında, SPWOA'nın ise NDSIIIWOA'yı %45 oranında domine ettiği görülmektedir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIRAO1 algoritması SPRAO1'in %11'ini domine ederken, SPRAO1 tarafından %45 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO1, NDSIIRAO1 çözümlerinin %51'ini domine ederken, NDSIIRAO1 tarafından %9 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO1 ile SPRAO1 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in SPRAO1'i %56 oranında, SPRAO1'in ise NDSIIIRAO1'i %8 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir. Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIRAO2 algoritması SPRAO2'nin %22'sini domine ederken, SPRAO2 tarafından %37 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO2, NDSIIRAO2 çözümlerinin %23'ünü domine ederken, NDSIIRAO2 tarafından %21 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO2 ile SPRAO2 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO2'nin SPRAO2'yi %32 oranında, SPRAO2'nin ise NDSIIIRAO2'yi %16 oranında domine ettiği görülmektedir.

Şekil 71'de, 250 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir.

NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, SPWOA'nın %27'sini, NDSIIIRAO1'in %47'sini ve NDSIIIRAO2'nin %52'sini domine ettiği

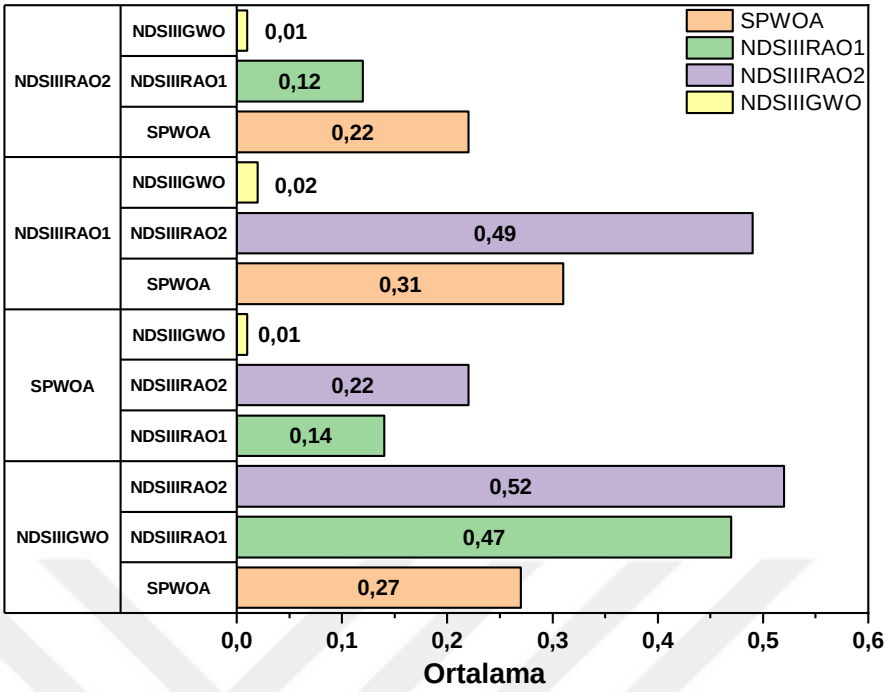
gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması SPWOA tarafından %1, NDSIIIRAO1 tarafından %2 ve NDSIIIRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir.

SPWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in %14'ünü ve NDSIIIRAO2'nin %22'sini domine ettiği, ayrıca NDSIIIGWO'nun %1'ini domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, SPWOA algoritması NDSIIIRAO1 tarafından %31 ve NDSIIIRAO2 tarafından %22 oranında domine edilmiştir. Rao-1'in NDSIII versiyonu incelendiğinde, SPWOA'nın %31'ini, NDSIIIRAO2'nin %49'unu ve NDSIIIGWO'nun %2'sini domine ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, NDSIIIRAO1 algoritması NDSIIIRAO2 tarafından %12, SPWOA tarafından %22 ve NDSIIIGWO tarafından %47 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, NDSIIIGWO algoritmasının diğer algoritmalara göre daha üstün performans sergilediği görülmektedir. Özellikle NDSIIIRAO1 ve NDSIIIRAO2 üzerinde sırasıyla %47 ve %52'lik yüksek baskınlık oranları elde etmiştir.

Tablo 90. 250 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(NDSIIGWO,SPGWO)	0,5000	0,0000	0,1288	0,1083
C(SPGWO, NDSIIGWO)	1,0000	0,0100	0,4738	0,2687
C(NDSIIGWO,NDSIIIGWO)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C(NDSIIIGWO,NDSIIGWO)	1,0000	0,9400	0,9950	0,0090
C(SPGWO, NDSIIIGWO)	0,0220	0,0000	0,0008	0,0032
C(NDSIIIGWO,SPGWO)	1,0000	0,5100	0,8150	0,1502
C(NDSIIWOA,SPWOA)	0,6300	0,0000	0,1612	0,1377
C(SPWOA, NDSIIWOA)	0,7300	0,0400	0,3658	0,1741
C(NDSIIWOA,NDSIIIWOA)	0,8352	0,0879	0,3703	0,1496
C(NDSIIIWOA,NDSIIWOA)	0,3800	0,0000	0,0711	0,0695
C(SPWOA, NDSIIIWOA)	0,8462	0,1099	0,4545	0,1692
C(NDSIIIWOA,SPWOA)	0,4000	0,0000	0,0554	0,0775
C(NDSIIRAO1,SPRAO1)	0,8100	0,0000	0,1881	0,1942
C(SPRAO1, NDSIIRAO1)	0,9400	0,0000	0,4516	0,2394
C(NDSIIRAO1,NDSIIIRAO1)	0,2637	0,0000	0,0953	0,0585
C(NDSIIIRAO1,NDSIIRAO1)	0,8600	0,2800	0,5179	0,1318
C(SPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,2857	0,0000	0,0858	0,0676
C(NDSIIIRAO1,SPRAO1)	0,9300	0,1400	0,5679	0,1445
C(NDSIIRAO2,SPRAO2)	0,7900	0,0000	0,2234	0,1819
C(SPRAO2, NDSIIRAO2)	0,8400	0,0000	0,3779	0,2185
C(NDSIIRAO2,NDSIIIRAO2)	0,5275	0,0110	0,2163	0,1213
C(NDSIIIRAO2,NDSIIRAO2)	0,6800	0,0000	0,2353	0,1844
C(SPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,4505	0,0000	0,1670	0,1008
C(NDSIIIRAO2,SPRAO2)	0,7000	0,0000	0,3268	0,1822



Şekil 71. 250 aktivite zaman-maliyet-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Her algoritma için yapılan 10 bağımsız çalışmanın sonucunda elde edilen performans metrikleri değerlendirilmiştir. Tablo 91 hiper hacim ve yayılım değerlerini içerirken, Tablo 92'de ortalama ideal mesafe sonuçları yer almaktadır. Her bir metrik için en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir.

Tablo 91. 250 aktivite TCETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,6241	0,5525	0,5795	0,0225	0,9612	1,0339	0,9782	0,0220
NDSIIRAO1	0,8619	0,8094	0,8322	0,0149	0,7130	0,8309	0,7542	0,0422
NDSIIRAO2	0,8526	0,8220	0,8353	0,0105	0,7151	0,8298	0,7714	0,0395
NDSIIWOA	0,9079	0,8818	0,8961	0,0095	0,8576	1,2076	0,9947	0,1049
SPGWO	0,8162	0,5668	0,7072	0,0761	0,6306	0,9498	0,8191	0,1133
SPRAO1	0,8559	0,8010	0,8402	0,0168	0,4409	0,5700	0,4890	0,0392
SPRAO2	0,8615	0,8266	0,8433	0,0133	0,3878	0,6778	0,5130	0,0765
SPWOA	0,9256	0,8767	0,9041	0,0144	0,1825	0,2580	0,2102	0,0274
NDSIIIGWO	0,7691	0,7275	0,7439	0,0122	1,0188	1,1060	1,0523	0,0287
NDSIIIRAO1	0,8977	0,8510	0,8637	0,0151	0,8665	0,9597	0,9023	0,0318
NDSIIIRAO2	0,8731	0,8206	0,8496	0,0205	0,8336	0,9775	0,9046	0,0422
NDSIIIWOA	0,8929	0,8643	0,8800	0,0104	1,5488	1,7916	1,6844	0,0742

Tablo 92. 250 aktivite TCETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,7638	0,8376	0,8073	0,0209
NDSIIRAO1	0,8087	0,8821	0,8523	0,0224
NDSIIRAO2	0,8208	0,8857	0,8495	0,0230
NDSIIWOA	0,9062	0,9493	0,9277	0,0131
SPGWO	0,7775	0,8197	0,7927	0,0132
SPRAO1	0,8183	0,8981	0,8601	0,0224
SPRAO2	0,7772	0,8766	0,8398	0,0341
SPWOA	0,9162	0,9489	0,9302	0,0114
NDSIIIGWO	0,5510	0,6069	0,5752	0,0188
NDSIIIRAO1	0,7154	0,7753	0,7574	0,0183
NDSIIIRAO2	0,7489	0,8275	0,7876	0,0271
NDSIIIWOA	0,8512	0,9042	0,8723	0,0154

Tablo 93'te performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmaktadır. Tabloda yer alan performans ölçümlerine ait ortalama değerler, Şekil 72'de grafiksel olarak sunulmaktadır. SPWOA algoritmasının ürettiği HV değerleri incelendiğinde, 250 aktiviteli zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen bu algoritmanın diğer yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir.

Hem Tablo 93 hem de Şekil 72, SPWOA algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.9041) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu yine SPWOA algoritması (0.2102) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.5752) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Hiper hacim ölçütü, çözüm setinin Pareto cephesinde kapsadığı alanı değerlendirdiğinden, daha geniş bir alana sahip olan çözümler HV açısından daha başarılı görünmektedir. Bu bağlamda, SPWOA'nın 0.9041 gibi yüksek bir HV değerine ulaşması, onun Pareto cephesinde daha fazla alan kapladığını ve bu sayede geniş bir çözüm çeşitliliği sunduğunu göstermektedir.

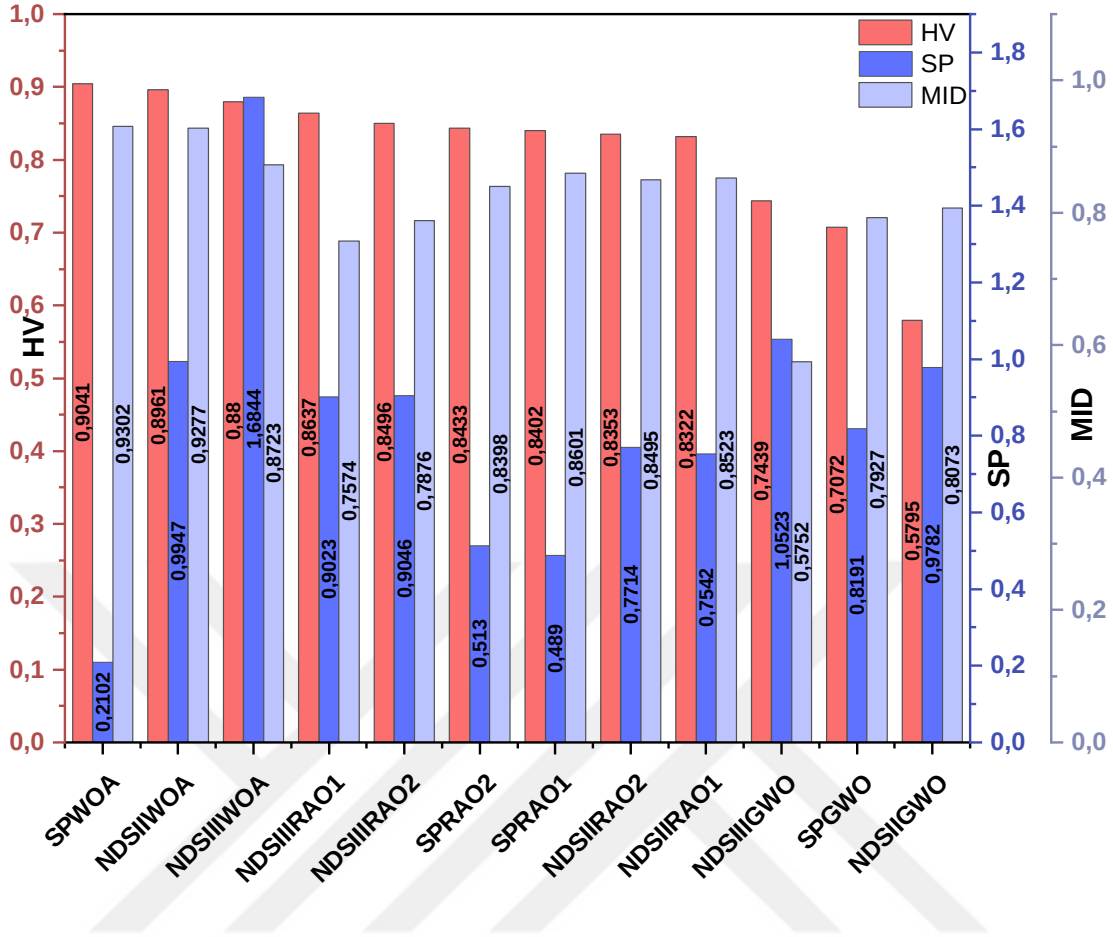
Ancak, Şekil 71'de görülebileceği gibi, NDSIIIGWO algoritması, SPWOA algoritmasına göre C-metrik ölçütü bazında daha baskın sonuçlar elde etmiştir. Bu durum NDSIIIGWO'nun C-metrik performansının, ortalama ideal mesafe ölçütü ile bağlı olduğunu göstermektedir. C-metrik ölçütü, bir algoritmanın diğerine göre baskınlık yüzdesini değerlendirdiği için çözüm setinin belirli bölgelerde yoğunlaşmasına duyarlı olabilir.

NDSIIIGWO'nun C-metrik performansının daha iyi olması, bu algoritmanın çözüm setinin daha dar bir bölgede yoğunlaşarak diğer algoritmalara karşı daha yüksek bir baskınlık elde ettiğini göstermektedir. NDSIIIGWO'nun MID değeri (0.5752) ideal noktaya daha yakın çözümler sunduğunu gösterirken, SPWOA'nın geniş bir çözüm dağılımı sağladığı halde çözümlerinin ideal noktadan daha uzak kaldığı anlaşılmaktadır. SPWOA'nın geniş bir çözüm dağılımına sahip olması, HV değerini olumlu etkilerken MID ve C-metrik değerlerini olumsuz etkilemiştir. Bu durum, C-metrik, MID ve HV ölçütlerinin algoritma performansını farklı açılardan değerlendirdiğini ve aralarındaki uyumsuzluğun önemini vurgulamakta olup, algoritmaların farklı çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirilmesinin gerekliliğini öne çıkarmaktadır.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, daha önceki bölümde de belirtildiği üzere, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde performans değerlendirmesi yapılırken HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi bakımından, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi diğer ölçütlerden daha öncelikli kabul edilmektedir. SPWOA algoritması, özellikle hem HV hem de SP metriklerinde en iyi performansı sergileyerek, büyük ölçekli zaman-maliyet-çevresel etki problemi için etkili bir çözüm yaklaşımı sunduğunu kanıtlamıştır.

Tablo 93. 250 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
SPWOA	18400	0,9041	0,2102	0,9302
NDSIIWOA	18400	0,8961	0,9947	0,9277
NDSIIIWOA	18400	0,8800	1,6844	0,8723
NDSIIIRAO1	18400	0,8637	0,9023	0,7574
NDSIIIRAO2	18400	0,8496	0,9046	0,7876
SPRAO2	18400	0,8433	0,5130	0,8398
SPRAO1	18400	0,8402	0,4890	0,8601
NDSIIRAO2	18400	0,8353	0,7714	0,8495
NDSIIRAO1	18400	0,8322	0,7542	0,8523
NDSIIIGWO	18400	0,7439	1,0523	0,5752
SPGWO	18400	0,7072	0,8191	0,7927
NDSIIGWO	18400	0,5795	0,9782	0,8073



Şekil 72. 250 aktivite TCETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.4.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Problemleri Genel Değerlendirme

Çok amaçlı zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyon problemlerinin çözümünde, farklı metasezgisel algoritmaların performansları detaylı olarak incelenmiştir. Rao serileri, Gri Kurt optimizasyonu ve Balina optimizasyonu algoritmaları, NDSII, SP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleriyle ayrı ayrı geliştirilmiştir. Analizler, küçük (25 aktivite), orta (29 aktivite) ve büyük (250 aktivite) ölçekli projeler üzerinde gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar algoritmaların ve operatörlerin etkinliğini ortaya koymuştur.

Küçük ölçekli problemlerde (25 aktivite), SPRAO1 algoritması 0.9758 hiper hacim değeri ve 0.4669 yayılım değeri ile en iyi performansı sergilemiştir. SPRAO1 algoritması, literatürdeki OMODE algoritmasına göre %81.6 daha az fonksiyon değerlendirmesi (9200 NFE'ye karşı 50000 NFE) kullanmasına rağmen, tüm performans metriklerinde daha üstün

sonuçlar elde etmiştir. OMODE algoritmasının 0.9735 hiper hacim ve 0.6950 yayılım değerleri göz önüne alındığında, SPRAO1'in hem çözüm kalitesi hem de çeşitlilik açısından daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, SP operatörünün küçük ölçekli projelerde hesaplama verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Orta ölçekli problemlerde (29 aktivite), NDSIIIRAO2 algoritması 0.9146 hiper hacim değeri ile en iyi performansı göstermiştir. Geliştirilen algoritmalar, eMOGOA algoritmasına kıyasla %26.4 daha az fonksiyon değerlendirmesi (9200 NFE'ye karşı 15000 NFE) kullanarak üstün sonuçlar elde etmiştir. eMOGOA algoritmasının HV değeri 0.899 ve yayılım değeri 0.416 olarak raporlanmıştır. SPRAO2 algoritması ise 0.9099 HV değeri ve 0.1614 yayılım değeri ile daha dengeli çözümler sunmuştur. NDSIII operatörü ile geliştirilen algoritmaların özellikle dengeli çözümlerin üretilmesinde etkili olmuştur.

Büyük ölçekli problemlerde (250 aktivite), SPWOA algoritması 0.9041 hiper hacim ve 0.2102 yayılım değerleri ile en iyi performansı sergilemiştir. WOA algoritması tüm versiyonlarında minimum zaman (2170 gün), minimum maliyet (6738000$) ve minimum çevresel etki (701.70) değerlerini yakalamada istikrarlı bir performans göstermiştir. Bu durum, algoritmanın büyük ölçekli problemlerde bile uç noktaları bulabilmede güvenilir sonuçlar üretebileceğini kanıtlamaktadır.

Metasezgisel algoritmaların özellikleri incelendiğinde, WOA algoritmasının tüm problem boyutlarında tutarlı ve yüksek performans gösterdiği, Rao serilerinin özellikle küçük ve orta ölçekli problemlerde etkili sonuçlar verdiği, GWO algoritmasının ise dengeli çözümler üretmede başarılı olmasına rağmen büyük ölçekli problemlerde çeşitlilik açısından zorlandığı gözlemlenmiştir. SP ve NDSIII operatörlerinin, NDSII'ye kıyasla çok daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

Hesaplama verimliliği açısından, geliştirilen algoritmaların literatürdeki mevcut yöntemlere göre daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha kaliteli sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Özellikle çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin algoritmaların performansı üzerindeki etkisi dikkat çekicidir. Her problem boyutunda farklı algoritmaların öne çıkması, sadece algoritma seçiminin değil, aynı zamanda bu algoritmaların hangi çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirildiğinin de büyük önem taşıdığını göstermektedir. Örneğin, küçük ölçekli problemlerde SP operatörü ile geliştirilen RAO1 algoritması (SPRAO1), orta ölçekli problemlerde NDSIII operatörü ile geliştirilen RAO2 algoritması (NDSIIIRAO2) ve büyük ölçekli problemlerde SP operatörü ile geliştirilen WOA algoritması (SPWOA) en iyi sonuçları vermiştir. Bu durum, aynı algoritmanın farklı

operatörlerle geliştirildiğinde önemli performans farklılıkları gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde sadece uygun algoritmanın seçilmesinin değil, aynı zamanda bu algoritmaların hangi çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirileceğinin de kritik bir karar olduğunu vurgulamaktadır. Bu çalışma, proje yöneticilerine, algoritma seçiminin ötesinde operatör seçiminin de optimizasyon performansını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermekte ve çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde algoritma ve operatör etkileşiminin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

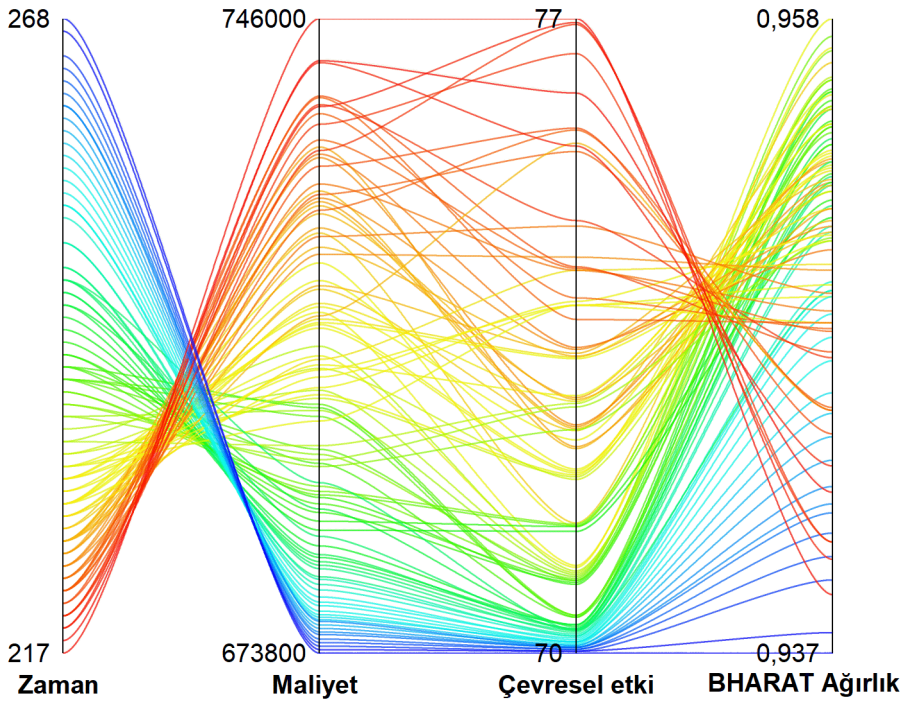
3.4.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Çevresel Etki Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi

Bu bölümde, 25, 29 ve 250 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-çevresel etki optimizasyon problemlerinin çözümleri neticesinde elde edilen pareto çözümleri arasından en uygun alternatiflerin belirlenmesi amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Her bir problem kategorisinde en iyi performansı gösteren algoritmanın pareto çözümleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu doğrultuda, 25 aktiviteli problem için SPRAO1, 29 aktiviteli problem için NDSIIIRAO2 ve 250 aktiviteli problemler için SPWOA algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümleri kullanılmıştır. Analiz sürecinde zaman, maliyet ve çevresel etki kriterlerine eşit önem verilmiş ve her üç kriter eşit ağırlıkta (wt=wc=we=0.33) değerlendirilmiştir. BHARAT yöntemi kullanılarak her bir problem kategorisi için en iyi üç alternatif belirlenmiştir. Bu sayede proje yöneticilerine yönelik sistematik bir karar destek mekanizması oluşturulmuştur.

Şekil 73'te 25 aktiviteli TCETP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet ve çevresel etki değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümlerine bakıldığında, zaman değerlerinin 217-268 gün arasında, maliyet değerlerinin 673800-746000 arasında ve çevresel etki değerlerinin 70-77 aralığında değiştiği görülmektedir. Grafikte her bir çizgi bir pareto çözümünü temsil etmekte olup, bu çizgilerin kesişim noktaları çözümlerin birbirleriyle olan ilişkisini göstermekte ve BHARAT yöntemi sonucunda elde edilen ağırlık değerlerine (0.91-0.97) ulaşmaktadır.

BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 94'te sunulmuştur. Tabloda her bir alternatif için kullanılan modlar, projenin tamamlanma süresi, toplam maliyeti, çevresel etki değeri ve BHARAT ağırlık

değerleri yer almaktadır. Değerlendirme sonucunda ilk sırada yer alan alternatif, 232 günde tamamlanmakta, 707600$ maliyet gerektirmekte ve 71.08 çevresel etki değeri sağlamakta olup, 0.9583 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü en iyi alternatifler sırasıyla 238 ve 231 günde tamamlanırken, maliyet ve çevresel etki değerleri açısından farklılıklar göstermektedir.



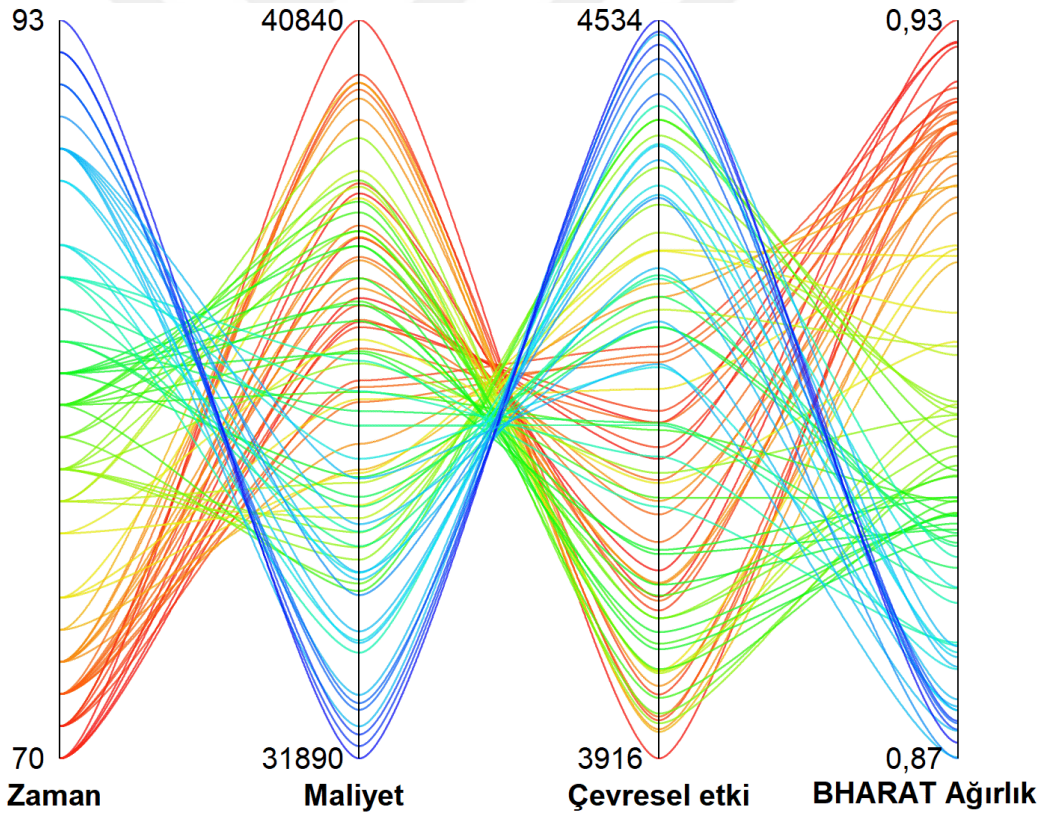
Şekil 73. 25 aktiviteli TCETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 94. 25 aktiviteli TCETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Çevresel Etki	BHARAT Ağrılık
1	1,1,1,2,3,1,3,4,2,3,3,1,1,3,1,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1	232	707600	71.08	0.9583
2	1,1,1,2,1,1,3,4,1,3,3,1,1,3,1,1,2,1,2,2,1,2,2,1,1	238	692800	70.96	0.9577
3	1,1,1,2,3,1,3,4,3,3,3,1,1,3,1,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1	231	712600	71.1	0.9573

Şekil 74'te 29 aktiviteli TCETP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları, zaman, maliyet ve çevresel etki değerleri arasındaki ilişki

sunulmaktadır. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 70-93 gün aralığında, maliyetlerin 31890-40840 aralığında ve çevresel etki değerlerinin 3915.69-4533.64 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmek ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.85-0.93) ilişkilendirilmektedir. BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 95'te gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen modlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, çevresel etki değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, kriterlerin eşit ağırlıkta kullanılması durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 70 gün sürede tamamlanıp 38200$ maliyet ve 4072.77 çevresel etki değeri ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.9321 olarak hesaplanmıştır. İkinci en iyi alternatif 70 günde tamamlanmakta, 37470$ maliyet gerektirmekte ve 4166.46 çevresel etki değeri sağlamakta olup, 0.9303 BHARAT ağırlık değerine sahiptir.



Şekil 74. 29 aktiviteli TCETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 95. 29 aktiviteli TCETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Çevresel Etki	BHARAT Ağrılık
1	2,3,3,1,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,3,1,1,1,3,2, 3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	38200	4072,77	0,9321
2	2,3,3,1,1,2,1,3,2,1,1,1,2,2,1,2,1,2,3,2, 1,3,3,1,1,3,3,3,1	70	37470	4166,46	0,9303
3	2,3,3,1,1,2,1,3,2,1,1,1,2,2,1,1,1,1,3,2, 1,3,3,1,1,3,3,3,1	70	37180	4196,83	0,9302

Şekil 75'te, 250 aktiviteli TCETP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet ve çevresel etki değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, zaman değerlerinin 2170-2680 gün arasında, maliyet değerlerinin 6738000-7460000 arasında ve çevresel etki değerlerinin 702-769 aralığında değiştiği görülmektedir. Grafikte her bir çizgi bir pareto çözümünü temsil etmekte olup, bu çizgilerin kesişim noktaları çözümlerin birbirleriyle olan ilişkisini göstermekte ve BHARAT yöntemi sonucunda elde edilen ağırlık değerlerine (0.91-0.97) ulaşmaktadır.

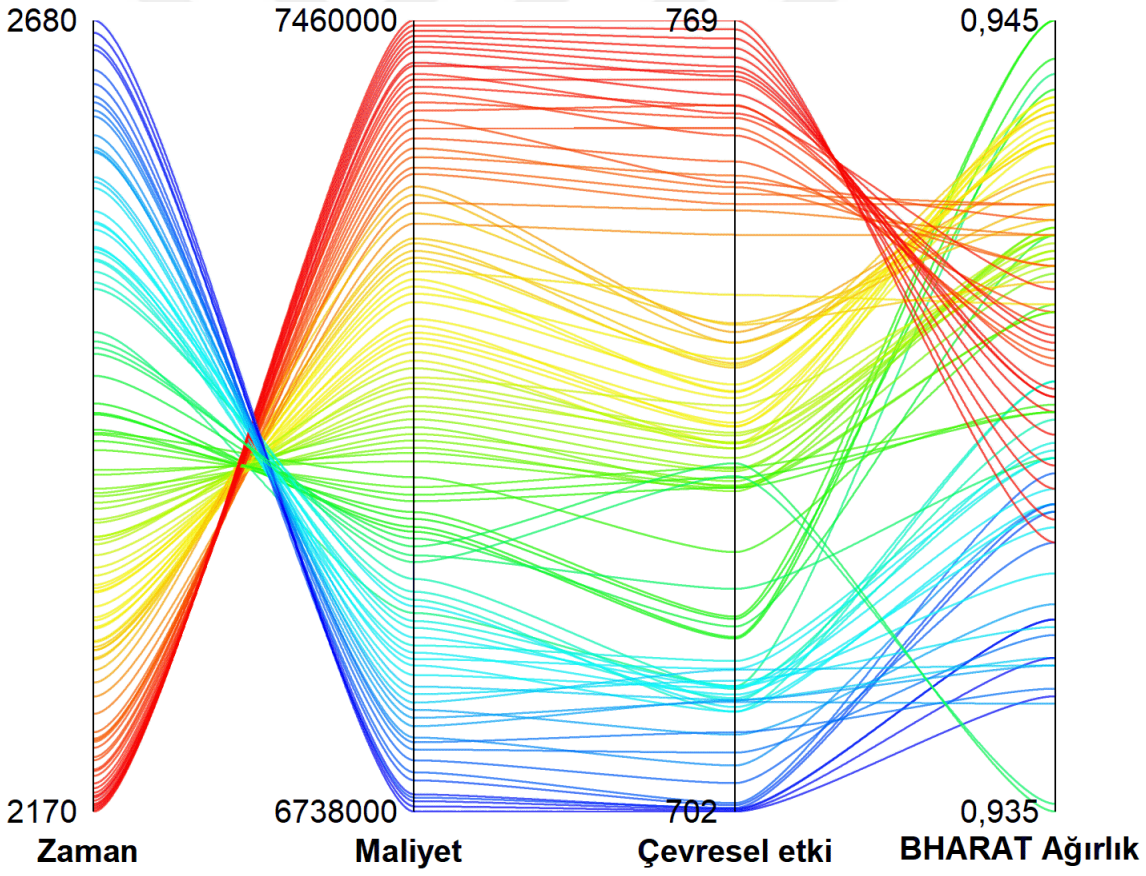
BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 96'te sunulmuştur. Tabloda her bir alternatif için kullanılan opsiyonlar, projenin tamamlanma süresi, toplam maliyeti, çevresel etki değeri ve BHARAT ağırlık değerleri yer almaktadır. Değerlendirme sonucunda ilk sırada yer alan alternatif, 2427 günde tamamlanmakta, 6997800$ maliyet gerektirmekte ve 716.53 çevresel etki değeri sağlamakta olup, 0.94584 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir.

Tablo 96. 250 aktiviteli TCETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	BHARAT Ağrılık
1	1,1,1,1,3,1,1,1,1,3,3,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,1,1,2, 3,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,3,3, 3,3,3,1,1,3,1,2,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,3,1,2,1,1,3,3,1,3,3,1, 1,1,1,2,2,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,3,1,3,3,1,3,1,1,1,3,1,1, 1,1,2,3,2,1,2,1,1,3,3,1,2,3,1,1,3,1,3,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3, 1,1,2,1,1,1,3,1,1,3,1,3,3,3,3,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,2,1,1, 1,1,1,1,1,1,1,3,3,1,3,3,1,1,1,2,1,2,1,1,1,1,1,2,1,1,1,3,1, 2,3,1,3,3,1,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,1,3,3,1,1,1,1,1, 3,1,3,3,1,1,3,1,1,2,1,1,3,1,1,1,1,1	2427	6997800	716,53	0,9454

Tablo 96'nın devamı

2	1,1,1,1,3,1,1,1,1,3,3,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,1,1,2, 3,1,3,4,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,3,4, 3,3,3,1,1,3,1,2,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,3,1,2,1,1,3,4,1,3,3,1, 1,1,1,2,2,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,3,1,3,4,1,3,1,1,1,3,1,1, 1,1,2,3,2,1,2,1,1,4,3,1,2,3,1,1,4,1,3,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3, 1,1,2,1,1,1,3,1,1,3,1,3,4,3,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,2,1,1, 1,1,1,1,1,1,1,3,4,1,3,3,1,1,1,2,1,2,1,1,1,1,1,2,1,1,1,3,1, 2,3,1,3,4,1,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,1,4,3,1,1,1,1,1, 4,1,3,3,1,1,3,1,1,2,1,1,3,1,1,1,1,1	2416	7011000	718,29	0,9454
3	1,1,1,1,3,1,1,1,1,3,2,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,1,1,2, 3,1,2,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,3,3, 3,3,3,1,1,3,1,2,2,1,1,3,1,2,1,1,1,1,3,1,2,1,1,3,3,1,3,2,1, 1,1,1,2,2,1,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,2,1,3,3,1,3,1,1,1,3,1,1, 1,1,2,3,2,1,2,1,1,3,3,1,2,3,1,1,3,1,3,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3, 1,1,2,1,1,1,3,1,1,3,1,2,3,3,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,2,1,1, 1,1,1,1,1,1,1,2,3,1,3,3,1,1,1,2,1,2,1,1,1,1,1,2,1,1,1,3,1, 2,3,1,3,3,1,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,1,3,3,1,1,1,1,1, 3,1,3,3,1,1,3,1,1,2,1,1,3,1,1,1,1,1	2433	6993400	716,41	0,9449



Şekil 75. 250 aktiviteli TCETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

3.5. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemleri

Çok amaçlı zaman-maliyet-güvenlik riski ödünleşim (TCSRTP) problemlerinin incelenmesi kapsamında, 18 ve 180 aktiviteli projeler üzerinde geliştirilen algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. İlk olarak Afshar ve Dolabi (2014) tarafından direkt olmayan maliyetin 200$ (ICR=200$) olarak alındığı on sekiz aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski problemi literatüre kazandırılmış ve genetik algoritma ile çözülmüştür. Bu çalışmada aynı problem ayrıca direkt olmayan maliyetin 0$ (ICR=0$) olduğu durum için de incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, zaman-maliyet-güvenlik riski ödünleşim problemlerini incelemek amacıyla Rao serileri, Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve Balina Optimizasyonu Algoritması (WOA), sırasıyla NDSII, SP ve NDSIII çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. Böylece hem optimizasyon algoritmaları hem de çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin pareto çözümleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Geliştirilen algoritmaların 18 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski problemi üzerindeki performanslarını literatürdeki algoritma ile doğru bir şekilde karşılaştırabilmek amacıyla Afshar ve Dolabi (2014) tarafından önerilen çok amaçlı genetik algoritması (MOGA) yeniden kodlanmıştır. MOGA algoritmasında seçim operatörü olarak, çözümlerin baskınlık derecesine göre seçilme olasılığını belirleyen uygunluk orantılı seçim (FPS) kullanılmıştır. Çaprazlama operatörü olarak 0.4 olasılık değeri ile tek noktalı çaprazlama uygulanmıştır. Algoritma ayrıca başlangıçta 0.8 değerinden başlayan ve iterasyonlar ilerledikçe azalan adaptif bir mutasyon stratejisi kullanmaktadır. Her iterasyonda bir güncellenen elit arşivleme stratejisi ile baskın olmayan çözümler saklanmaktadır. MOGA algoritmasının detayları için Afshar ve Dolabi (2014) çalışmasına başvurulabilir.

Son olarak, geliştirilen algoritmaların büyük ölçekli projelerdeki performansını değerlendirmek amacıyla, 18 aktiviteli proje on kat artırılarak 180 aktiviteye genişletilmiş ve direkt olmayan maliyet 0$ olarak alınmıştır. Böylece, kullanılan optimizasyon algoritmalarının ve çok amaçlı seçme ile eleme operatörlerinin performans değişiklikleri büyük ölçekli TCSRTP problemi üzerinde incelenmiş ve algoritmaların performansı C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

3.5.1. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski (ICR=200$) Ödünleşim Problemi

18 aktiviteye sahip zaman-maliyet-güvenlik riski ödünleşim problemi, Afshar ve Dolabi (2014) tarafından çok amaçlı genetik algoritma kullanılarak çözülmüştür. Problemde direkt olmayan maliyet 200$ olarak alınmış ve 100 popülasyon, 100 iterasyon ile çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında Rao serileri, Gri kurt algoritması ve Balina algoritmaları, kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII), güçlendirilmiş pareto yöntemi (SP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon sayısı 48, iterasyon sayısı 100 olacak şekilde belirlenmiştir. Popülasyon ve iterasyon değerleri, literatürde kullanılan MOGA algoritmasına kıyasla yaklaşık %50 daha az fonksiyon değerlendirmesi sağlamıştır. Böylece, literatürde önerilen algoritmaya kıyasla daha az fonksiyon değerlendirmesi ile performansın artırılması hedeflenmiş ve her bir algoritmada kullanılan çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında, MOGA algoritması orijinal çalışmadaki gibi 100 popülasyon, 100 iterasyon kullanılarak yeniden test edilmiştir.

18 aktiviteli problemde, her bir faaliyetin süre, maliyet ve güvenlik riski opsiyonları bulunmakta ve toplamda 5,90E+09 farklı proje tamamlanma opsiyonu sunulmaktadır. Probleme ait zaman-maliyet-güvenlik riski opsiyonları Tablo 97'de gösterilmektedir.

Tablo 97. 18 Aktivite TCSRTP problemi zaman-maliyet-güvenlik riski opsiyonları

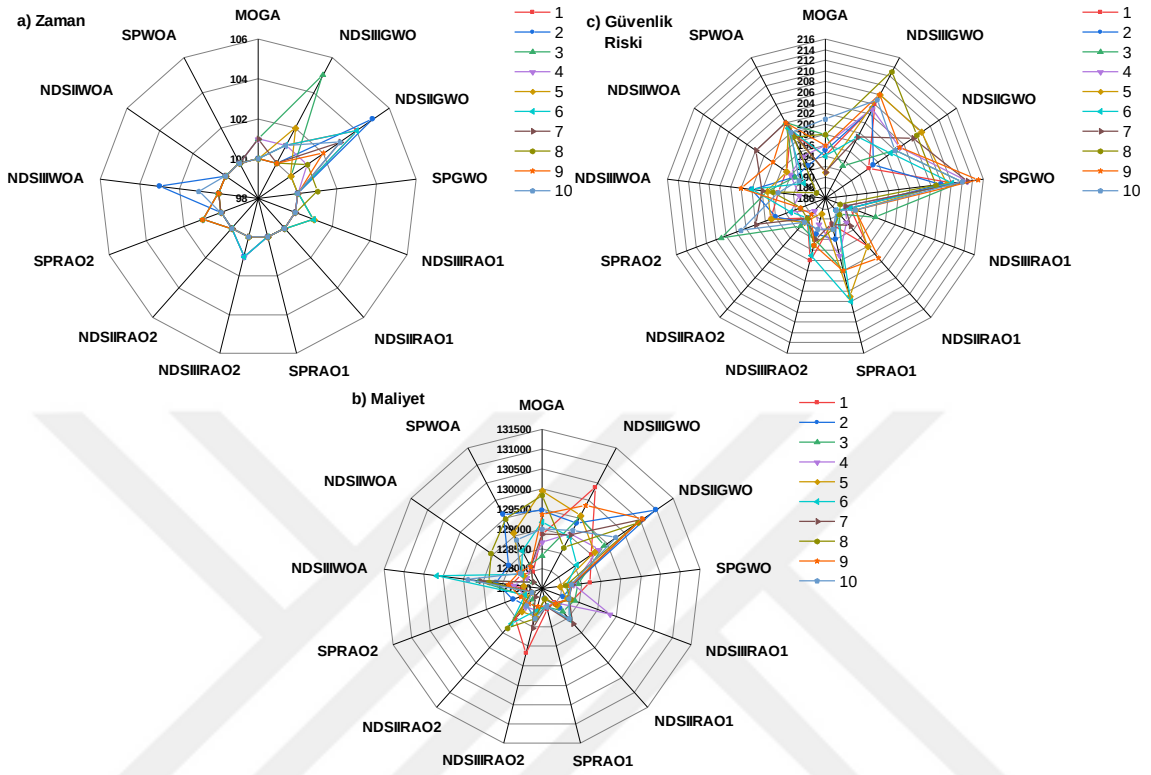
No	Öncül	Zaman					Maliyet (x100$)					Güvenlik Riski				
		Opsiyon					Opsiyon					Opsiyon				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1		14	15	16	21	24	24	21.5	19	15	12	12	9	12	8	5
2		15	18	20	23	25	30	24	18	15	10	30	24	20	20	18
3		15	22	33			45	40	32			20	24	14		
4		12	16	20			450	350	300			5	5	4		
5	1	22	24	28	30		200	175	150	100		12	8	5	9	
6	1	14	18	24			400	320	180			12	5	9		
7	5	9	15	18			300	240	220			24	20	12		
8	6	14	15	16	21	24	2.2	2.15	2	2.08	1.2					
9	6	15	18	20	21	25	3	2.4	1.8	1.5	1	6	4	8	3	4
10	2;6	15	22	33			4.5	4	3.2			9	12	8		
11	7;8	12	16	20			4.5	3.5	3			3	5	4		
12	5;9;10	22	24	28	30		20	17.5	15	10		30	36	24	20	
13	3	14	18	24			40	32	18			15	18	24		
14	4;10	9	15	18			30	24	22			16	15	16		
15	12	12	16				45	35				25	30			

Tablo 97'nin devamı

16	13;14	20	22	24	28	30	30	20	17.5	15	10	10	3	6	8	6
17	11;14;15	14	18	24			40	32	18			36	36	20		
18	16;17	9	15	18			30	24	22			20	18	12		

On bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliyet ve güvenlik riski değerleri sırasıyla Şekil 76'da gösterilmiştir. Gri kurt algoritması incelendiğinde, güçlendirilmiş pareto yöntemiyle geliştirilen SPGWO versiyonunun hem maliyet hem de zaman kriterleri açısından diğer versiyonlara kıyasla optimum çözüme daha yakın ve istikrarlı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski açısından değerlendirildiğinde NDSIII ile geliştirilen versiyonun en düşük risk değerlerini ürettiği, SPGWO'nun ise diğer iki versiyona göre daha yüksek güvenlik riski değerleri ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, GWO algoritmasının tüm versiyonlarının 10 bağımsız çözümde minimum ve maksimum değerler arasındaki farkın yüksek olması, yani uç noktalarda sonuçlar üretmesi, algoritmanın genel olarak istikrarsız bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Rao-1 ve Rao-2 algoritmaları incelendiğinde, her iki algoritmanın maliyet açısından SPRAO1 ve SPRAO2 versiyonlarının, NDSII ve NDSIII versiyonlarına göre daha düşük değerler ürettiği görülmektedir. Güvenlik riskleri incelendiğinde ise, Rao-1 algoritması için NDSIIIRAO1 operatörü ile geliştirilen versiyonun diğer versiyonlara göre daha düşük risk değerleri ürettiği, benzer şekilde Rao-2 algoritmasında da NDSIIRAO2 versiyonunun diğer versiyonlara kıyasla daha düşük güvenlik riski sonuçları ürettiği gözlemlenmiştir. Tüm versiyonların 10 bağımsız çözümde minimum ve maksimum değerler arasındaki farkın düşük olması, Rao serilerinin istikrarlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Balina algoritması (WOA) incelendiğinde, NDSIIWOA versiyonunun hem maliyet hem de güvenlik riski kriterleri açısından diğer versiyonlara kıyasla daha düşük değerler ürettiği gözlemlenmiştir. Algoritmanın zaman kriteri açısından performansı değerlendirildiğinde ise, SP ve NDSII operatörleri ile geliştirilen versiyonlarının daha istikrarlı ve birbirine yakın sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. WOA algoritmasının tüm versiyonlarının 10 bağımsız çözümde minimum ve maksimum değerler arasındaki farkın makul seviyelerde olması, algoritmanın kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde, Afshar ve Dolabi (2014) tarafından önerilen MOGA algoritması, diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında minimum zaman kriterinde benzer performans göstermesine rağmen, minimum güvenlik riski ve maliyet kriterlerinde çoğu algoritmanın gerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu

durum, algoritmanın %100 daha fazla fonksiyon değerlendirmesi kullanmasına rağmen optimum çözümlere ulaşmada yetersiz kaldığını göstermektedir.



Şekil 76. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler

Algoritmaların her bir bağımsız çözüm sonucunda ürettiği Pareto çözümlerini zaman, maliyet ve güvenlik riski açısından kıyaslamak amacıyla, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, çözümlerin çeşitliliğini ve kalitesini aynı anda değerlendiren hiper hacim (HV) değeri esas alınmış ve en yüksek HV değerine sahip bağımsız çözüm seçilmiştir.

Tablo 98 incelendiğinde, GWO algoritmasının SP, NDSII ve NDSIII yöntemleriyle elde edilen Pareto çözümleri gösterilmektedir. Zaman ve maliyet açısından bakıldığında SPGWO algoritması diğer versiyonlara göre optimum sonuçlara daha yakın değerler elde ettiği görülmektedir. Güvenlik riski açısından incelendiğinde, NDSIII ile geliştirilen Gri kurt algoritmasının, NDSII ve SP versiyonlarına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Pareto sonuçları incelendiğinde NDSII tarafından üretilen 3., 5., 8., 10., 11. ve 12. Pareto çözümlerinin diğer versiyonlar tarafından baskılandığı görülmektedir. Bu durum SP ve

NDSIII versiyonların gri kurt algoritmasında NDSII'ye göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tablo 98. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	104	150600	244	100	160658	247	105	143315	242
	2	105	144370	238	101	155865	240	105	149800	236
	3	107	143508	247	101	161665	238	105	149850	234
Mal. Göre	4	124	128558	242	125	127950	241	115	129550	255
	5	118	128670	258	119	128250	255	121	130000	245
	6	131	129400	228	115	128550	251	123	130415	237
Güvenlik Risk.	7	138	145608	201	121	154965	209	141	157155	193
	8	147	141908	205	133	146290	216	140	138490	205
	9	144	134058	207	115	154165	217	126	145590	205
Dengeli	10	121	142658	229	121	135565	222	121	130500	229
	11	127	133000	231	125	127950	241	124	130760	228
	12	128	150700	220	127	134070	227	127	131465	220

Tablo 99'da ise balina optimizasyon algoritmasının farklı operatörlerle geliştirilmiş çözümlerine yer verilmiştir. Zaman açısından pareto çözümleri incelendiğinde, NDSIIWOA algoritmasına ait 1. Pareto çözümü ve NDSIIIWOA algoritmasına ait 1., 2. ve 3. Pareto çözümünün SPWOA tarafından domine edildiği görülmektedir. Maliyet açısından incelendiğinde NDSIIWOA en düşük maliyeti elde ettiği görülmektedir. SPWOA algoritması tarafından maliyet açısından üretilen 4 ve 5. Pareto çözümünün NDSIIIWOA algoritması tarafından domine edildiği tespit edilmiştir. Güvenlik riski açısından incelendiğinde SPWOA ile üretilen pareto çözümlerinin NDSII ve NDSIII versiyonlarından üretilen pareto çözümlerini baskıladığı tespit edilmiştir. WOA algoritması tarafından üretilen dengeli çözümler NDSII algoritmasının diğer algoritmalar tarafından baskılandığı tespit edilmiştir. NDSII algoritması en düşük maliyeti elde ettiği halde pareto çözümlerinde diğer versiyonların oldukça gerisinde kaldığı Tablo 99'dan görülebilmektedir.

Tablo 99. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	100	155700	243	100	155620	243	100	157615	243
	2	101	150915	247	104	154520	234	101	151715	247
	3	103	151240	245	104	148508	236	104	153120	243
Mal. Göre	4	126	127770	243	140	129610	231	122	127970	238
	5	124	127870	243	135	130010	240	130	128570	228
	6	121	128020	235	117	130420	254	118	128870	244
Güvenlik Risk.	7	159	153740	193	141	151860	193	157	139670	197
	8	159	148790	196	147	139060	197	152	139170	198
	9	165	140940	197	150	138210	198	155	134270	200
Dengeli	10	129	131270	221	129	144220	210	128	130965	219
	11	130	163410	212	130	158560	204	129	136150	212
	12	140	129370	230	135	130010	240	130	128570	228

Tablo 100'de Rao-1 algoritmasına ait farklı versiyonların ürettiği pareto çözümleri sunulmaktadır. Maliyet açısından güçlendirilmiş pareto yönteminin daha düşük değerler elde ettiği görülmektedir. Ancak güvenlik riski ve dengeli çözümler açısından NDSIIIRAO1 algoritmasının diğer iki versiyona göre hem daha düşük değerler ürettiği hem de NDSII'ye pareto çözümlerini baskıladığı görülmektedir.

Tablo 100. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	100	154820	246	100	153620	253	100	153600	253
	2	100	153420	252	100	157415	241	101	148520	258
	3	101	150820	247	100	156420	244	104	148700	236
Mal. Göre	4	121	128170	234	126	127770	243	110	128270	254
	5	111	129770	244	111	128370	250	121	128520	237
	6	139	131358	219	125	128955	234	115	128798	252
Güvenlik Risk.	7	149	153970	189	141	152610	194	144	152455	189
	8	149	152565	191	146	140170	198	144	152348	191
	9	146	152265	194	144	146255	200	150	139455	194
Dengeli	10	123	149520	224	118	144310	224	118	143598	223
	11	126	144608	219	126	127770	243	124	136210	219
	12	129	144320	212	128	159215	206	128	137300	210

Tablo 101'de ise Rao-2 algoritması tarafından üretilen pareto çözümleri incelendiğinde maliyet ve güvenlik riski açısından NDSII ve SP yöntemleri daha iyi sonuçlar

vermelerine rağmen NDSII ile üretilen güvenlik riski çözümlerinin SP'ye göre baskın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dengeli çözümler incelendiğinde ise NDSIII ile üretilen pareto çözümlerinin diğer iki versiyona göre daha baskın sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Tablo 101. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

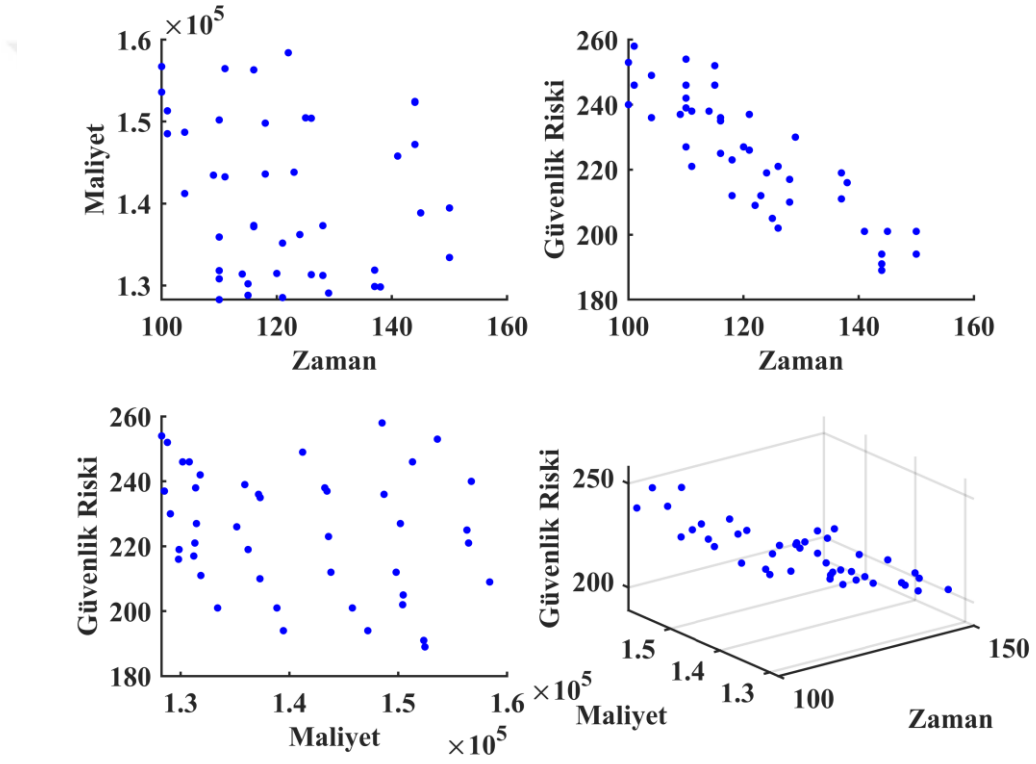
	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	100	157170	250	101	161570	238	100	156070	261
	2	100	154720	258	101	159270	249	101	158420	246
	3	100	157970	247	104	149600	245	101	158815	244
Mal. Göre	4	126	127770	243	126	127770	243	116	127970	259
	5	116	127970	259	134	128670	236	123	128170	241
	6	121	128570	255	140	129370	230	110	128270	254
Güvenlik Risk.	7	149	153870	191	159	170540	191	141	150670	195
	8	157	140670	194	159	168890	193	138	151065	199
	9	144	166910	197	151	158220	194	141	144770	203
Dengeli	10	120	147470	224	120	150415	231	119	150370	225
	11	124	128870	252	124	147170	225	122	141570	224
	12	133	137900	210	135	151820	217	133	150470	203

Bir sonraki bölümde performans metrikleri açısından ortalama HV ölçütüne bakıldığında en yüksek değere sahip olan NDSIIIRAO1 algoritması olarak görülmektedir.

Tablo 102'de NDSIIIRAO1 ve SPRAO1 algoritmalarına ait pareto çözümleri, Afshar ve Dolabi (2014) tarafından MOGA algoritması kullanılarak üretilen pareto çözümü ve bu çalışma kapsamında tekrar geliştirilen MOGA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar neticesinde, Rao-1 algoritması ile geliştirilen algoritmaların, MOGA algoritmasına göre maliyet ve güvenlik riskinde daha düşük değerleri %50 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile ulaştıkları görülmektedir. Tablo 103'te, NDSIIIRAO1 algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait pareto çözümleri opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 77'de pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 102. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması

MOGA (2014)			MOGA			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
Z	M	G.R	Z	M	G.R	Z	M	G.R	Z	M	G.R
100	156908	239	100	156900	239	100	153620	253	100	153600	253
112	129720	247	112	144170	234	100	157415	241	101	148520	258
118	132070	232	118	131255	244	100	156420	244	104	148700	236
120	128308	237	121	128315	234	126	127770	243	110	128270	254
123	143765	213	123	143348	227	111	128370	250	121	128520	237
127	137165	212	127	136200	220	125	128955	234	115	128798	252
132	132605	210	132	148920	203	141	152610	194	144	152455	189
144	153158	193	156	155010	191	146	140170	198	144	152348	191



Şekil 77. NDSIIIRAO1 tarafından üretilmiş 18 aktivite (ICR=200$) zaman-maliyet-güvenlik riski pareto grafiği

Tablo 103. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=200$) için NDSIIIRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	G.R.
Min. Zam.	1	1,5,3,3,3,1,3,3,1,1,2,1,3,2,1,5,1,1	100	153600	253
Min. Mal.	2	1,5,3,3,4,3,3,5,1,1,3,1,3,3,1,5,1,1	110	128270	254
Min. G.R.	3	5,5,3,3,3,2,3,2,2,1,1,4,1,2,1,2,3,3	144	152455	189

3.5.2. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=200$) İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 104'te, 18 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOGA algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir. MOGA algoritması ile GWO versiyonları karşılaştırıldığında, MOGA algoritması NDSIIGWO'nun çözümlerinin %70'ini domine ederken, NDSIIGWO tarafından %11 oranında domine edilmiştir. MOGA ile SPGWO karşılaştırıldığında, MOGA çözümlerin %9'unu domine ederken, SPGWO tarafından %42 oranında domine edilmiştir. MOGA ile NDSIIIGWO karşılaştırmasında ise, MOGA çözümlerin %4'ünü domine ederken, NDSIIIGWO tarafından %55 oranında domine edildiği gözlemlenmiştir.

WOA algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MOGA algoritması NDSIIWOA'nın %32'sini domine ederken, NDSIIWOA tarafından %26 oranında domine edilmiştir. MOGA ile SPWOA karşılaştırmasında, MOGA çözümlerin %20'sini domine ederken, SPWOA tarafından %38 oranında domine edilmiştir. MOGA ile NDSIIIWOA karşılaştırıldığında ise, MOGA çözümlerin %11'ini domine ederken, NDSIIIWOA tarafından %46 oranında domine edildiği görülmektedir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, MOGA algoritması NDSIIRAO1'in %29'unu domine ederken, NDSIIRAO1 tarafından %27 oranında domine edilmiştir. MOGA ile SPRAO1 karşılaştırmasında, MOGA çözümlerin %17'sini domine ederken, SPRAO1 tarafından %40 oranında domine edilmiştir. MOGA ile NDSIIIRAO1 karşılaştırıldığında ise, MOGA çözümlerin %5'ini domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %58 oranında domine edildiği gözlemlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MOGA algoritması NDSIIRAO2'nin %28'ini domine ederken, NDSIIRAO2 tarafından %31 oranında domine edilmiştir. MOGA ile SPRAO2 karşılaştırmasında, MOGA çözümlerin %24'ünü domine ederken, SPRAO2 tarafından %40 oranında domine edilmiştir. MOGA ile NDSIIIRAO2 karşılaştırıldığında ise, MOGA çözümlerin %15'ini domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %47 oranında domine edildiği görülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, NDSIII ve SP operatörleri ile geliştirilen versiyonların MOGA algoritmasına karşı daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Özellikle NDSIIIRAO1'in %58, NDSIIIGWO'nun %55 ve NDSIIIRAO2'nin %47 oranında

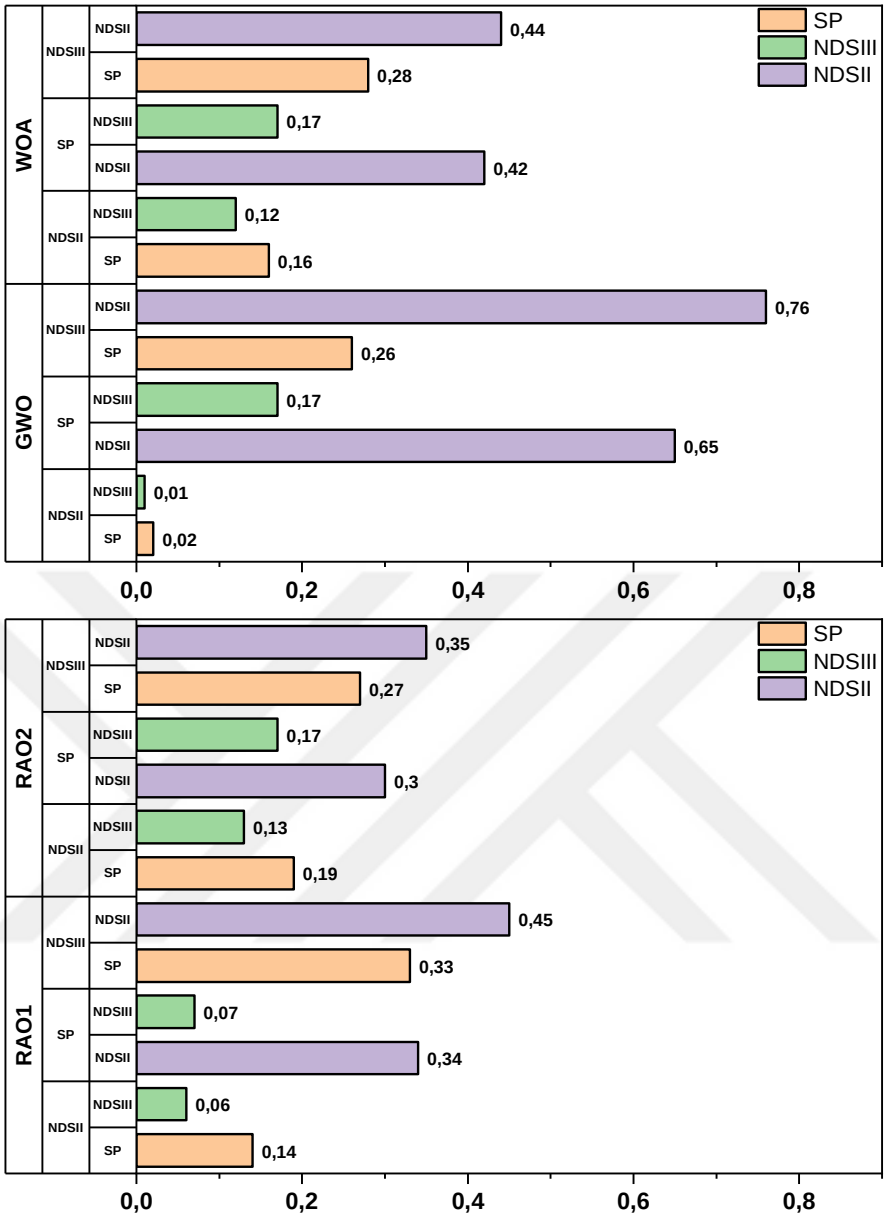
MOGA'yı domine ettiği tespit edilmiştir. NDSII operatörü ile geliştirilen versiyonlar ise MOGA'ya karşı daha düşük baskınlık oranlarına sahip olmuştur.

Tablo 104. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOGA algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MOGA, NDSIIGWO)	1,0000	0,2400	0,7022	0,2103
C(NDSIIGWO, MOGA)	0,3402	0,0000	0,1138	0,0944
C(MOGA, SPGWO)	0,2400	0,0000	0,0928	0,0513
C(SPGWO, MOGA)	0,5789	0,3034	0,4267	0,0556
C(MOGA, NDSIIIGWO)	0,1778	0,0000	0,0482	0,0425
C(NDSIIIGWO, MOGA)	0,7071	0,4045	0,5595	0,0652
C(MOGA, NDSIIWOA)	0,7000	0,0600	0,3260	0,1568
C(NDSIIWOA, MOGA)	0,5052	0,0273	0,2626	0,1201
C(MOGA, SPWOA)	0,6600	0,0200	0,2072	0,1531
C(SPWOA, MOGA)	0,7010	0,0818	0,3816	0,1363
C(MOGA, NDSIIIWOA)	0,3556	0,0000	0,1173	0,0818
C(NDSIIIWOA, MOGA)	0,7113	0,2360	0,4676	0,1079
C(MOGA, NDSIIRAO1)	0,4800	0,1000	0,2994	0,0963
C(NDSIIRAO1, MOGA)	0,5842	0,0532	0,2797	0,1092
C(MOGA, SPRAO1)	0,4400	0,0000	0,1700	0,0896
C(SPRAO1, MOGA)	0,5567	0,1596	0,4092	0,0829
C(MOGA, NDSIIIRAO1)	0,2222	0,0000	0,0547	0,0564
C(NDSIIIRAO1, MOGA)	0,8812	0,2857	0,5814	0,1314
C(MOGA, NDSIIRAO2)	0,6400	0,0200	0,2852	0,1322
C(NDSIIRAO2, MOGA)	0,6139	0,0659	0,3138	0,1117
C(MOGA, SPRAO2)	0,6000	0,0400	0,2452	0,1373
C(SPRAO2, MOGA)	0,6566	0,0636	0,4008	0,1265
C(MOGA, NDSIIIRAO2)	0,6222	0,0222	0,1593	0,1423
C(NDSIIIRAO2, MOGA)	0,7216	0,0727	0,4732	0,1627

Şekil 78'de, 18 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) problemi için algoritmaların kendi içlerinde C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

GWO algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIGWO algoritması SPGWO'nun çözümlerinin %2'sini domine ederken, SPGWO tarafından %64 oranında domine edilmiştir. NDSIIIGWO, NDSIIGWO çözümlerinin %75'ini domine ederken, NDSIIGWO tarafından sadece %1 oranında domine edilmiştir. NDSIIIGWO ile SPGWO karşılaştırıldığında ise NDSIIIGWO'nun SPGWO'yu %26 oranında domine ettiği, SPGWO'nun ise NDSIIIGWO'yu %16 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 78. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

WOA algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIWOA algoritması SPWOA'nın %16'sını domine ederken, SPWOA tarafından %41 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA, NDSIIWOA çözümlerinin %44'ünü domine ederken, NDSIIWOA tarafından %11 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA ile SPWOA karşılaştırmasında, NDSIIIWOA'nın SPWOA'yı %28 oranında, SPWOA'nın ise NDSIIIWOA'yı %16 oranında domine ettiği görülmektedir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIRAO1 algoritması SPRAO1'in %14'ünü domine ederken, SPRAO1 tarafından %34 oranında domine

edilmiştir. NDSIIIRAO1, NDSIIRAO1 çözümlerinin %45'ini domine ederken, NDSIIRAO1 tarafından %6 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO1 ile SPRAO1 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in SPRAO1'i %32 oranında, SPRAO1'in ise NDSIIIRAO1'i %7 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIRAO2 algoritması SPRAO2'nin %18'ini domine ederken, SPRAO2 tarafından %30 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO2, NDSIIRAO2 çözümlerinin %35'ini domine ederken, NDSIIRAO2 tarafından %13 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO2 ile SPRAO2 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO2'nin SPRAO2'yi %26 oranında, SPRAO2'nin ise NDSIIIRAO2'yi %7 oranında domine ettiği görülmektedir.

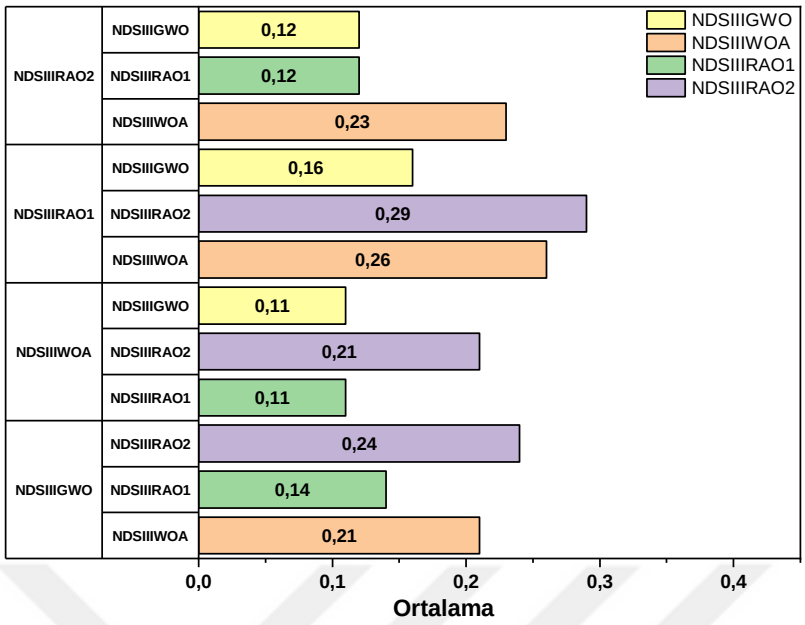
Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm algoritma ailelerinde NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların diğer versiyonlara göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. NDSIII versiyonları, NDSII ve SP versiyonlarına göre daha yüksek baskınlık oranlarına sahip olmuştur.

Şekil 79'da, 18 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) problemi için her algoritmanın NDSIII versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir.

NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, NDSIIIWOA'nın %21'ini, NDSIIIRAO1'in %14'ünü ve NDSIIIRAO2'nin %24'ünü domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması NDSIIIWOA tarafından %11, NDSIIIRAO1 tarafından %16 ve NDSIIIRAO2 tarafından %12 oranında domine edilmiştir.

NDSIIIWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in %11'ini ve NDSIIIRAO2'nin %21'ini domine ettiği, ayrıca NDSIIIGWO'nun %11'ini domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, NDSIIIWOA algoritması NDSIIIRAO1 tarafından %26 ve NDSIIIRAO2 tarafından %23 oranında domine edilmiştir. Rao-1'in, NDSIII versiyonu incelendiğinde, NDSIIIWOA'nın %26'sını, NDSIIIRAO2'nin %29'unu ve NDSIIIGWO'nun %16'sını domine ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, NDSIIIRAO1 algoritması NDSIIIRAO2 tarafından %12, NDSIIIWOA tarafından %11 ve NDSIIIGWO tarafından %14 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, NDSIII versiyonlarının birbirine yakın performans gösterdiği, ancak NDSIIIRAO1 ve NDSIIIRAO2'nin diğer algoritmalara göre nispeten daha yüksek baskınlık oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Özellikle NDSIIIRAO1'in NDSIIIWOA'yı %26 ve NDSIIIRAO2'yi %29 oranında domine etmesi dikkat çekicidir.



Şekil 79. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=200$) problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Her algoritma için yapılan 10 bağımsız çalışmanın performans metrikleri Tablo 105 ve Tablo 106'da sunulmuştur. Tablo 105, hiper hacim ve yayılım değerlerine, Tablo 106 ise ortalama ideal mesafe sonuçlarına yer vermektedir. Her bir metrik için en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 105. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOGA	0,8795	0,8466	0,8623	0,0124	0,7712	1,0617	0,9136	0,0991
NDSIIGWO	0,8258	0,6891	0,7654	0,0392	0,6803	1,1050	0,8588	0,1422
NDSIIRAO1	0,8883	0,8477	0,8648	0,0144	0,5440	1,0459	0,8086	0,1489
NDSIIRAO2	0,8998	0,8234	0,8667	0,0232	0,6484	0,9980	0,8169	0,1057
NDSIIWOA	0,8880	0,7707	0,8426	0,0435	0,7792	1,0614	0,9264	0,1095
SPGWO	0,8206	0,7505	0,7901	0,0233	0,4516	0,9098	0,6423	0,1537
SPRAO1	0,9101	0,8252	0,8764	0,0239	0,2528	0,6956	0,4263	0,1459
SPRAO2	0,9082	0,8475	0,8796	0,0199	0,2787	0,6717	0,4307	0,1082
SPWOA	0,8827	0,8177	0,8558	0,0220	0,3333	0,5050	0,4253	0,0529
NDSIIIGWO	0,8607	0,7819	0,8285	0,0234	0,9549	1,3656	1,1288	0,1354
NDSIIIRAO1	0,9326	0,8964	0,9167	0,0128	0,7544	1,2231	1,0696	0,1411
NDSIIIRAO2	0,9181	0,8129	0,8918	0,0317	0,8503	1,2510	1,0009	0,1087
NDSIIIWOA	0,8885	0,8486	0,8688	0,0135	0,9249	1,2986	1,1394	0,1036

Tablo 106. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

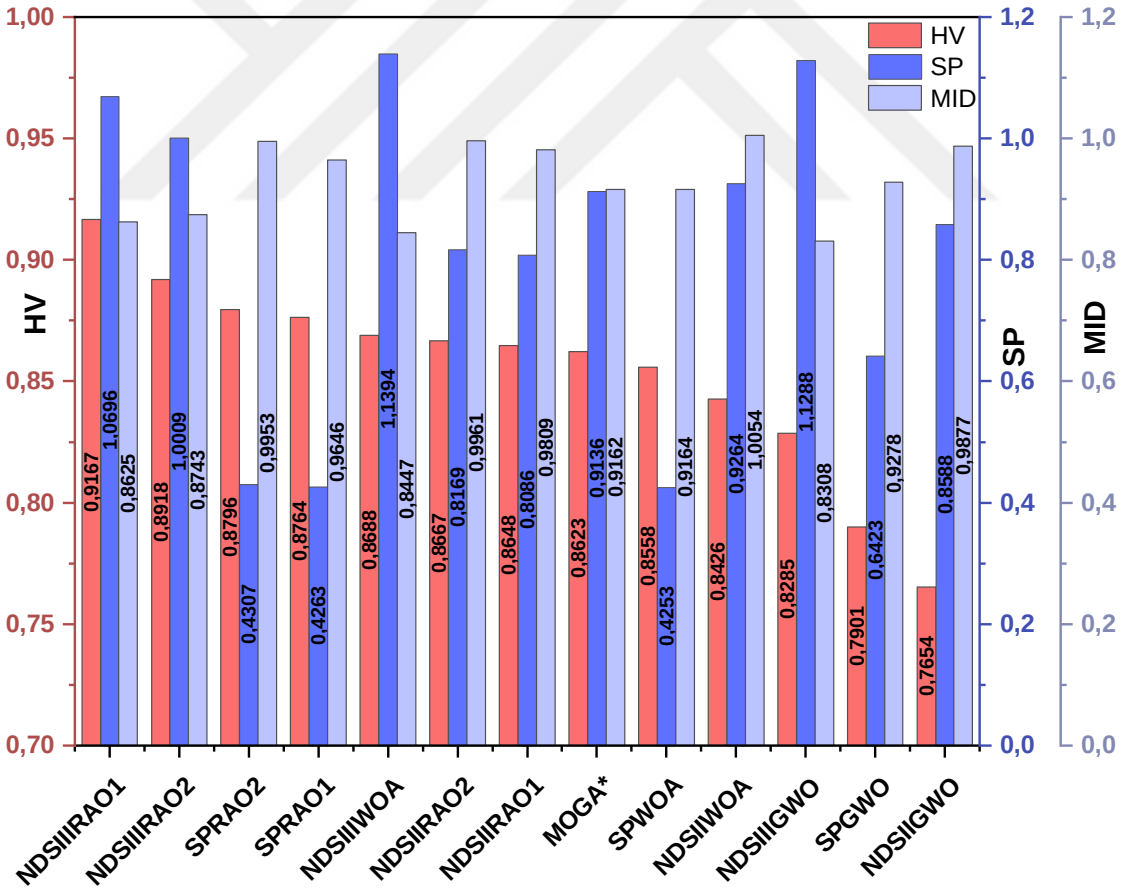
Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOGA	0,8671	0,9423	0,9162	0,0239
NDSIIGWO	0,8769	1,062	0,9877	0,0560
NDSIIRAO1	0,9147	1,0667	0,9809	0,0532
NDSIIRAO2	0,9233	1,0859	0,9961	0,0497
NDSIIWOA	0,9318	1,1299	1,0054	0,0600
SPGWO	0,8855	0,9994	0,9278	0,0377
SPRAO1	0,9152	1,0578	0,9646	0,0424
SPRAO2	0,9108	1,0871	0,9953	0,0483
SPWOA	0,855	0,9833	0,9164	0,0451
NDSIIIGWO	0,7968	0,863	0,8308	0,0243
NDSIIIRAO1	0,8122	0,9401	0,8625	0,0435
NDSIIIRAO2	0,8216	0,9504	0,8743	0,0516
NDSIIIWOA	0,7908	0,8774	0,8447	0,0313

Tablo 107'de performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmaktadır. Ayrıca, Şekil 80'de grafiksel olarak sunulmaktadır. NDSIIIRAO1 algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.9167) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPRAO2 algoritması (0.4307) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.8308) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-güvenlik riski optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, daha önceki bölümler de belirtildiği üzere, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde performans değerlendirmesi yapılırken HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi bakımından, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi diğer ölçütlerden daha öncelikli kabul edilmektedir. Literatürde kullanılan MOGA algoritmasına göre %50 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle, NDSIII ile geliştirilen algoritmalar özellikle HV ve MID metriklerinde üstün performans göstermiştir. Öte yandan, SP ile geliştirilen algoritmalar hiper hacim ve yayılım metrikleri açısından daha iyi sonuçlar sunarak, zaman-maliyet-güvenlik riski probleminin çözümü için MOGA algoritmasına göre daha iyi bir seçenek olmuştur.

Tablo 107. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
NDSIIIRAO1	4800	0,9167	1,0696	0,8625
NDSIIIRAO2	4800	0,8918	1,0009	0,8743
SPRAO2	4800	0,8796	0,4307	0,9953
SPRAO1	4800	0,8764	0,4263	0,9646
NDSIIIWOA	4800	0,8688	1,1394	0,8447
NDSIIRAO2	4800	0,8667	0,8169	0,9961
NDSIIRAO1	4800	0,8648	0,8086	0,9809
MOSGO*	10000	0,8623	0,9136	0,9162
SPWOA	4800	0,8558	0,4253	0,9164
NDSIIWOA	4800	0,8426	0,9264	1,0054
NDSIIIGWO	4800	0,8285	1,1288	0,8308
SPGWO	4800	0,7901	0,6423	0,9278
NDSIIGWO	4800	0,7654	0,8588	0,9877
*Bu Çalışma				

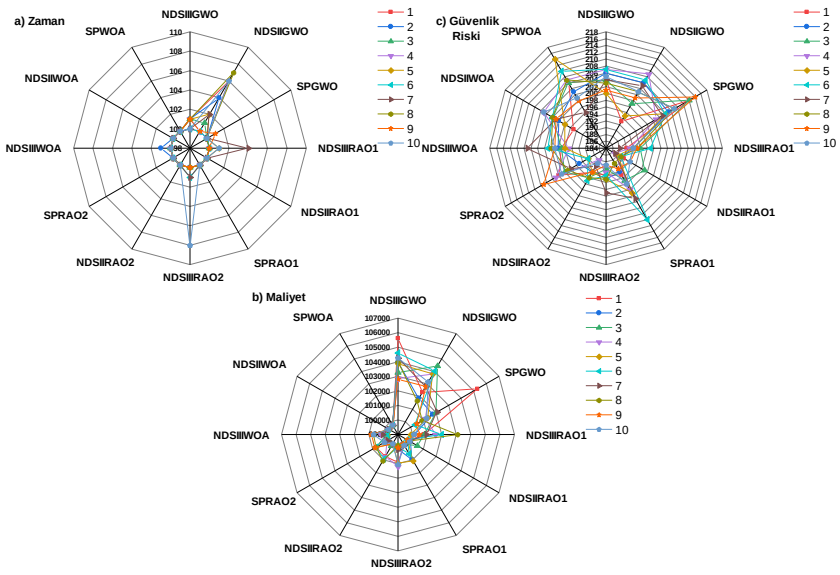


Şekil 80. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.5.3. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski (ICR=0$) Ödünleşim Problemi

Tablo 97'de zaman-maliyet-güvenlik risk opsiyonları verilen 18 aktiviteli problem direkt olmayan maliyeti 200$'a ek olarak bu bölümde ayrıca direkt olmayan maliyeti 0$ (ICR=0$) alınarak algoritmaların performansları incelenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen NDSII, SP ve NDSIII operatörlerini kullanan Rao serileri, Gri kurt algoritması ve Balina algoritması popülasyon sayısı 48 iterasyon sayısı 100 alınarak performansları değerlendirilmiştir.

Şekil 81'de 10 bağımsız çözüm neticesinde algoritmaların uç noktalarda bulduğu minimum değerler gösterilmiştir. Gri kurt algoritması incelendiğinde, NDSIIGWO algoritması zaman ve maliyet açısından, SPGWO algoritmasına göre daha kötü sonuçlar üretmiştir. Ancak, minimum güvenlik riski değerleri incelendiğinde SP ile geliştirilen Gri kurt algoritmasının, NDSIII ve NDSII serilerine göre daha yüksek değerler ürettiği görülmüştür. WOA algoritması incelendiğinde, optimum zaman ve maliyet açısından tüm serilerin istikrarlı bir sonuç gösterdiği görülmüştür. Ancak, güvenlik riski açısından incelendiğinde tüm serilerin daha rastgele davrandığı tespit edilmiştir. Rao-1 algoritması ve Rao-2 algoritması incelendiğinde, NDSIII ile geliştirilen algoritmaların diğer serilere göre güvenlik riski açısından daha optimuma yakın sonuçlar üretme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 81. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler

Gri kurt algoritmasına ait pareto çözümleri incelendiğinde, NDSIII ile üretilen pareto çözümlerinin hiçbir seri tarafından domine edilemediği tespit edilmiştir. NDSII tarafından üretilen (1., 2., 3., 4., 5, 6., 10., 11., 12.) ve SP tarafından üretilen (7., 11. ve 12.) pareto çözümlerinin domine edildiği görülmektedir. SP ile üretilen çözümler maliyet ve zaman açısından NDSII algoritmasına göre daha iyi sonuçlar üretirken, uç noktalardan ziyade dengeli çözümlerde NDSIII ile geliştirilen Gri kurt algoritmalarının daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Tablo 108. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	106	152250	242	100	141900	240	101	137020	251
	2	107	150898	248	100	141120	243	104	129015	238
	3	108	140365	246	101	142265	238	105	142308	235
Mal. Göre	4	151	102350	219	151	100350	217	151	102810	209
	5	153	103270	212	145	100850	226	131	103355	230
	6	151	104600	211	143	101400	231	136	103700	220
Güvenlik Risk.	7	144	124055	193	146	137480	204	133	129855	201
	8	140	129350	194	121	125608	212	141	110105	202
	9	137	124545	197	147	109115	213	136	123740	203
Dengeli	10	119	137090	220	117	108515	253	118	124598	217
	11	131	120045	222	131	119100	217	129	110950	212
	12	136	105805	233	135	116965	218	135	104050	215

Balina algoritması tarafından üretilen pareto çözümleri incelendiğinde minimum zaman ve maliyet açısından tüm sersileri aynı değerlere ulaşabilse de NDSII tarafından ilk üç pareto çözümünün SP tarafından domine edildiği tespit edilmiştir. Güvenlik riski öncelikli pareto çözümleri incelendiğinde, balina algoritması serilerinin benzer sonuçlar ürettiği Tablo 109'dan görülebilmektedir. Dengeli çözümler açısından incelediğinde NDSIIIWOA algoritmasının, SP ve NDSII ile geliştirilen WOA algoritmalarında göre daha baskın sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Tablo 110 ve Tablo 111'de Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarının farklı çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri kullanılarak elde ettiği Pareto çözümleri, zaman, maliyet ve güvenlik riski kriterlerine göre sıralanmış olarak sunulmaktadır. Hem Rao-1 hem de Rao-2 algoritmaları incelendiğinde NDSII ile geliştirilen Rao algoritmalarının, SP ve NDSIII ile geliştirilen algoritmalar tarafından bazı pareto çözümlerinin domine edildiği görülmektedir.

Yapılan incelemeler neticesinde her iki Rao algoritmasında da dengeli çözümleri üretme açısından NDSIII ile geliştirilen versiyonların daha öne çıktığı, uç noktalar için çözüm üretmede ise SP serilerinin daha öne çıktığı görülmüştür.

Tablo 109. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	100	142920	262	100	136915	239	100	142570	255
	2	100	157220	253	100	135900	242	106	122970	247
	3	101	138800	277	101	135670	239	110	115058	240
Mal. Göre	4	169	99740	215	169	99740	215	169	99740	215
	5	161	100520	226	166	100090	217	150	102000	224
	6	164	100590	221	164	100590	221	165	102190	203
Güvenlik Risk.	7	159	117140	195	146	123358	196	159	116940	197
	8	156	117528	198	151	117220	197	149	117120	197
	9	159	116240	200	151	116420	200	165	102990	200
Dengeli	10	119	136680	240	118	111805	238	118	133350	215
	11	130	112148	216	129	110700	216	129	105770	216
	12	138	125920	208	135	123838	205	130	123800	204

Tablo 110. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	100	143700	248	100	142520	241	100	140720	256
	2	101	155270	247	100	137170	245	102	131470	263
	3	101	138350	257	101	135758	252	104	127720	248
Mal. Göre	4	169	99890	214	169	99740	215	169	99740	215
	5	166	102390	208	150	100720	232	151	100320	217
	6	169	103090	202	161	101220	213	148	100620	220
Güvenlik Risk. G.	7	159	123340	187	159	128518	189	159	123740	190
	8	146	123770	191	141	137948	196	165	109140	193
	9	159	118290	192	152	109180	201	159	123490	193
Dengeli	10	120	109250	279	118	139758	227	118	105400	245
	11	127	118920	232	132	106130	251	126	114970	227
	12	135	112798	237	136	104740	240	135	109670	210

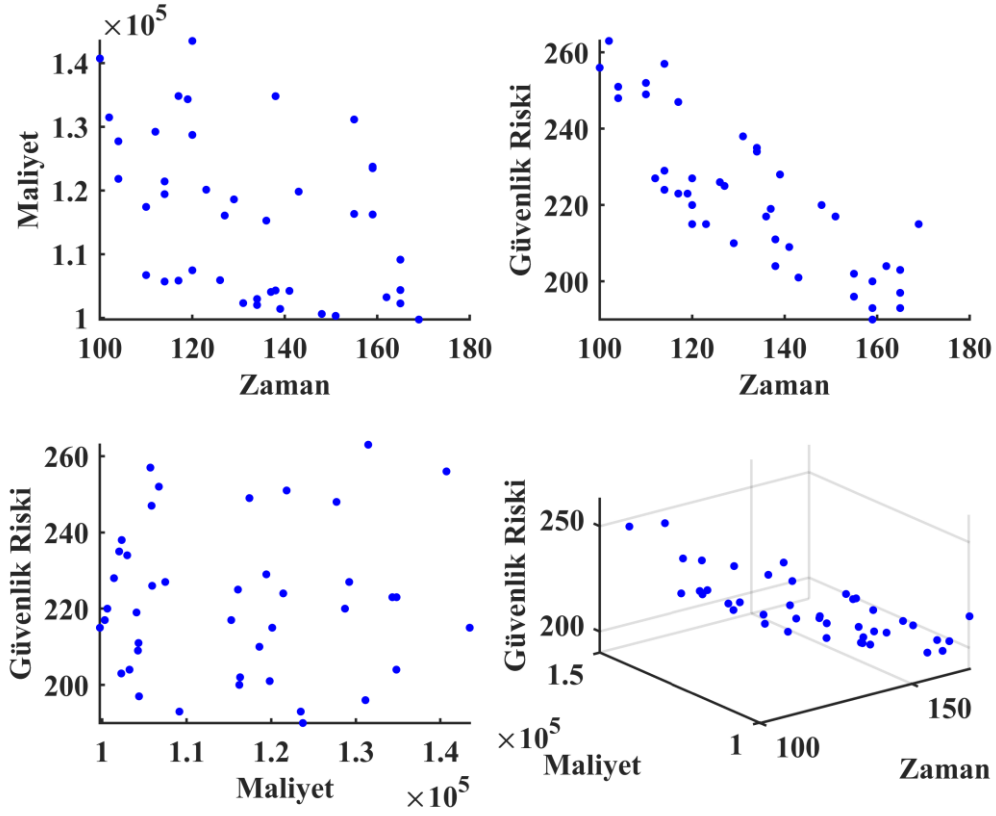
Tablo 111. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	100	135420	256	100	137520	240	100	134720	258
	2	100	135820	243	100	137020	245	101	129800	262
	3	101	130420	260	100	135720	246	104	121720	255
Mal. Göre	4	165	100740	210	169	99740	215	169	99740	215
	5	162	100940	216	158	100170	223	153	100430	225
	6	142	102010	221	169	101140	209	169	101990	205
Güvenlik Risk.	7	159	122140	192	159	122080	193	159	122828	193
	8	159	118140	193	165	102940	201	151	122870	194
	9	150	123170	196	138	112970	203	141	123170	196
Dengeli	10	119	107720	249	118	106720	268	118	105520	243
	11	128	112220	236	126	105915	244	128	106670	226
	12	132	103770	244	133	103938	229	132	103215	243

Bir sonraki bölümde hiper hacim metriği açısından en yüksek değeri veren NDSIIIRAO1 algoritması olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple NDSIIIRAO1 algoritmasının uç noktalarda ürettiği pareto çözümlerine ait opsiyon kullanımı ve zaman, maliyet ve güvenlik riski değerleri Tablo 112'de gösterilmiştir. Ayrıca, Şekil 82'de pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 112. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=0$) için NDSIIIRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	G.R.
Minimum Zaman	1	1,5,1,2,3,1,3,5,1,1,1,1,3,3,1,2,1,1	100	140720	256
	2	2,5,1,3,4,1,3,5,1,1,1,1,3,3,1,1,1,1	102	131470	263
	3	1,5,1,3,3,2,3,5,1,1,1,1,3,3,1,2,1,1	104	127720	248
Minimum Maliyet	4	5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,2,5,3,3	169	99740	215
	5	5,5,3,3,4,3,3,1,1,1,1,4,3,3,2,5,3,3	151	100320	217
	6	4,5,3,3,4,3,3,1,1,1,1,4,3,3,2,5,3,3	148	100620	220
Minimum Güvenlik Riski	7	5,5,3,3,3,2,3,5,5,3,3,4,1,1,1,2,3,3	159	123740	190
	8	5,5,3,3,3,3,3,5,5,3,3,4,1,2,1,2,3,3	165	109140	193
	9	5,5,3,3,3,2,3,5,5,3,3,4,1,1,1,3,3,3	159	123490	193



Şekil 82. NDSIIIRAO1 tarafından üretilmiş 18 aktivite (ICR=0$) zaman-maliyet-güvenlik riski pareto grafiği

3.5.4. 18 Aktivite TCSRTP (ICR=0$) İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 113'te, 18 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=0$) problemi için algoritmaların kendi içlerinde C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

Gri kurt algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIGWO algoritması SPGWO'nun çözümlerinin %10'unu domine ederken, SPGWO tarafından %47 oranında domine edilmiştir. NDSIIIGWO, NDSIIGWO çözümlerinin %68'ini domine ederken, NDSIIGWO tarafından sadece %1 oranında domine edilmiştir. NDSIIIGWO ile SPGWO karşılaştırıldığında, NDSIIIGWO algoritmasının SPGWO'yu %37 oranında domine ettiği, SPGWO'nun ise NDSIIIGWO'yu %9 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

Balina algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIWOA algoritması SPWOA'nın %6'sını domine ederken, SPWOA tarafından %60 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA, NDSIIWOA pareto çözümlerinin %62'sini domine ederken, NDSIIWOA

tarafından %4 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA ile SPWOA karşılaştırmasında, NDSIIIWOA'nın SPWOA'yı %25 oranında, SPWOA'nın ise NDSIIIWOA'yı %19 oranında domine ettiği görülmektedir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, NDSIIRAO1 algoritması SPRAO1'in %12'sini domine ederken, SPRAO1 tarafından %43 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO1, NDSIIRAO1 çözümlerinin %60'ını domine ederken, NDSIIRAO1 tarafından %3 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO1 ile SPRAO1 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1 algoritması SPRAO1'i %42 oranında, SPRAO1'in ise NDSIIIRAO1'i %6 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NDSIIRAO2 algoritması SPRAO2'nin %18'ini domine ederken, SPRAO2 tarafından %32 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO2, NDSIIRAO2 çözümlerinin %47'sini domine ederken, NDSIIRAO2 tarafından %7 oranında domine edilmiştir. NDSIIIRAO2 ile SPRAO2 karşılaştırmasında, NDSIIIRAO2'nin SPRAO2'yi %39 oranında, SPRAO2'nin ise NDSIIIRAO2'yi %8 oranında domine ettiği görülmektedir.

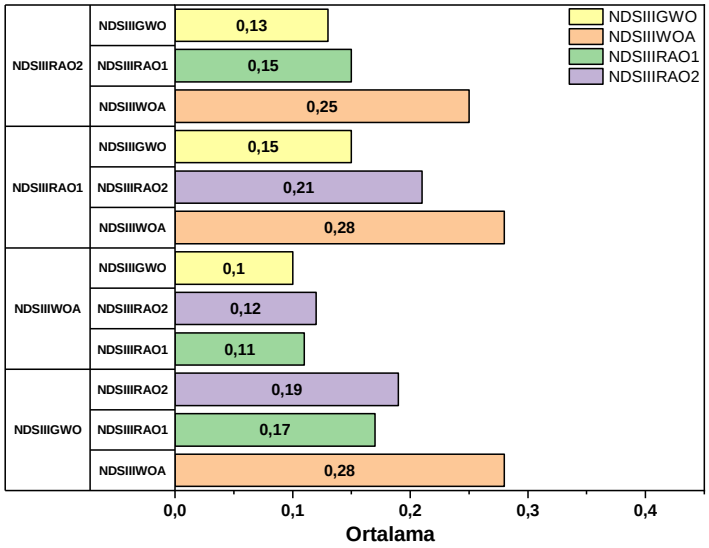
Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm algoritma ailelerinde NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların diğer versiyonlara göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. NDSIII versiyonları, NDSII ve SP versiyonlarına göre daha yüksek baskınlık oranlarına sahip olmuştur.

Şekil 83'te, 18 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=0$) problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metric) gösterilmektedir. NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, NDSIIIWOA'nın %28'ini, NDSIIIRAO1'in %17'sini ve NDSIIIRAO2'nin %19'unu domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması NDSIIIWOA tarafından %10, NDSIIIRAO1 tarafından %15 ve NDSIIIRAO2 tarafından %13 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in %11'ini ve NDSIIIRAO2'nin %12'sini domine ettiği, ayrıca NDSIIIGWO'nun %10'unu domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, NDSIIIWOA algoritması NDSIIIRAO1 tarafından %28 ve NDSIIIRAO2 tarafından %25 oranında domine edilmiştir. Rao-1'in NDSIII versiyonu incelendiğinde, NDSIIIWOA'nın %28'ini, NDSIIIRAO2'nin %21'ini ve NDSIIIGWO'nun %15'ini domine ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, NDSIIIRAO1 algoritması NDSIIIRAO2 tarafından %15, NDSIIIWOA tarafından %11 ve NDSIIIGWO tarafından %17 oranında domine edilmiştir. Genel olarak

değerlendirildiğinde, NDSIII versiyonları birbirine yakın performans oranları göstermişlerdir.

Tablo 113. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=0$) problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(NDSIIGWO,SPGWO)	0,5600	0,0000	0,1050	0,1134
C(SPGWO, NDSIIGWO)	0,8800	0,0600	0,4788	0,1996
C(NDSIIGWO,NDSIIIGWO)	0,1333	0,0000	0,0160	0,0274
C(NDSIIIGWO,NDSIIGWO)	0,9600	0,2600	0,6816	0,1612
C(SPGWO, NDSIIIGWO)	0,3333	0,0000	0,0944	0,0879
C(NDSIIIGWO,SPGWO)	0,6600	0,0400	0,3744	0,1750
C(NDSIIWOA,SPWOA)	0,3200	0,0000	0,0682	0,0735
C(SPWOA, NDSIIWOA)	0,8200	0,2200	0,6054	0,1346
C(NDSIIWOA,NDSIIIWOA)	0,2667	0,0000	0,0473	0,0527
C(NDSIIIWOA,NDSIIWOA)	0,9400	0,2800	0,6216	0,1359
C(SPWOA, NDSIIIWOA)	0,4889	0,0000	0,1953	0,1369
C(NDSIIIWOA,SPWOA)	0,8600	0,0000	0,2534	0,1957
C(NDSIIRAO1,SPRAO1)	0,7200	0,0000	0,1220	0,1348
C(SPRAO1, NDSIIRAO1)	0,7800	0,0000	0,4360	0,1878
C(NDSIIRAO1,NDSIIIRAO1)	0,3333	0,0000	0,0340	0,0498
C(NDSIIIRAO1,NDSIIRAO1)	0,8600	0,1400	0,6068	0,1581
C(SPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,2889	0,0000	0,0693	0,0642
C(NDSIIIRAO1,SPRAO1)	0,8000	0,1000	0,4262	0,1389
C(NDSIIRAO2,SPRAO2)	0,5800	0,0000	0,1834	0,1296
C(SPRAO2, NDSIIRAO2)	0,7000	0,0600	0,3248	0,1553
C(NDSIIRAO2,NDSIIIRAO2)	0,2222	0,0000	0,0782	0,0596
C(NDSIIIRAO2,NDSIIRAO2)	0,7800	0,2000	0,4778	0,1178
C(SPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,2889	0,0000	0,0851	0,0647
C(NDSIIIRAO2,SPRAO2)	0,7200	0,1400	0,3976	0,1464



Şekil 83. 18 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski (ICR=0$) problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Her algoritma için yapılan 10 bağımsız çalışmanın performans metrikleri HV ve SP için Tablo 114'de, MID için Tablo 115'te sunulmuştur. Her bir metrik için en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 114. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,7985	0,6848	0,7462	0,0356	0,7167	1,0408	0,8506	0,1033
NDSIIRAO1	0,8842	0,7309	0,7928	0,0467	0,6713	0,9588	0,7405	0,0814
NDSIIRAO2	0,8480	0,7745	0,8148	0,0249	0,6077	0,8526	0,7331	0,0919
NDSIIWOA	0,7695	0,6722	0,7209	0,0332	0,7883	1,3311	1,0492	0,1796
SPGWO	0,8077	0,6939	0,7600	0,0402	0,3080	0,6590	0,4335	0,1153
SPRAO1	0,8484	0,7696	0,8208	0,0241	0,1714	0,4559	0,3387	0,0929
SPRAO2	0,8501	0,7599	0,8205	0,0258	0,2440	0,4971	0,4035	0,0956
SPWOA	0,8627	0,7008	0,7971	0,0462	0,2350	0,6863	0,3680	0,1284
NDSIIIGWO	0,8266	0,7626	0,7947	0,0185	0,9584	1,1863	1,0734	0,0753
NDSIIIRAO1	0,9150	0,8538	0,8882	0,0181	0,7669	1,2334	1,0095	0,1497
NDSIIIRAO2	0,8951	0,8523	0,8754	0,0145	0,7967	1,0810	0,9149	0,0815
NDSIIIWOA	0,8705	0,8039	0,8292	0,0200	0,8652	1,2066	1,0519	0,1186

Tablo 115. 18 aktivite (ICR=200$) TCSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,936	1,0173	0,9705	0,029
NDSIIRAO1	0,9424	1,1397	1,0575	0,058
NDSIIRAO2	0,9627	1,1534	1,0288	0,0565
NDSIIWOA	1,0108	1,2098	1,1055	0,0707
SPGWO	0,8554	1,0287	0,9422	0,0475
SPRAO1	0,9041	1,1016	0,9983	0,0525
SPRAO2	0,9355	1,0787	1,002	0,0542
SPWOA	0,8703	1,0652	0,9341	0,0582
NDSIIIGWO	0,7877	0,8642	0,8251	0,0217
NDSIIIRAO1	0,8078	0,9431	0,8722	0,0389
NDSIIIRAO2	0,8507	0,9341	0,8891	0,0295
NDSIIIWOA	0,8203	0,9104	0,8743	0,0253

Tablo 116'da performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanarak ve Şekil 84'te grafiksel olarak sunulmaktadır.

NDSIIIRAO1 algoritmasının ürettiği HV değerleri incelendiğinde, ICR=0$ durumu için 18 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski optimizasyon probleminde diğer algoritmalara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPRAO1 algoritması (0.3387) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.8251) ideal noktaya daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın ICR=0$ durumu için zaman-maliyet-güvenlik riski optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Tablo 116 sonuçlarına göre algoritmaların HV, SP ve MID performans ölçütlerinde farklı sonuçlar üretmesi, her bir algoritmanın ve kullandığı operatörün kendine özgü optimizasyon stratejisi ve arama mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. NDSIIIRAO1 algoritmasının HV değerinde üstün performans göstermesi, algoritmanın çözüm uzayını daha geniş ve kapsamlı bir şekilde araştırabilme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. NDSIIIRAO1 algoritması, çözüm uzayında hem çeşitliliği koruyarak hem de optimal çözümlere yakınsayarak daha dengeli bir arama stratejisi izlemektedir.

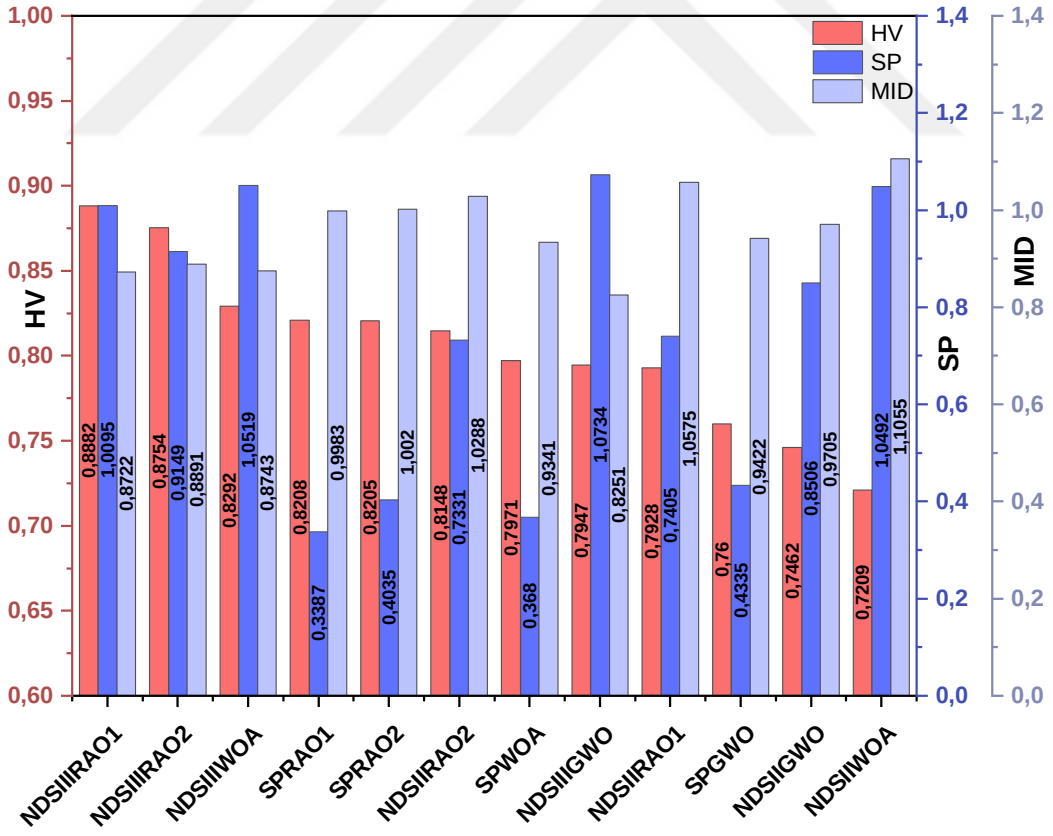
SPRAO1 algoritmasının yayılım (SP) metriğinde daha iyi sonuçlar elde etmesi, bu algoritmanın Pareto cephesi üzerindeki çözümleri daha homojen bir şekilde dağılma sağladığını göstermektedir. Güçlendirilmiş Pareto tabanlı yaklaşımı sayesinde, çözümlerin birbirinden optimum uzaklıkta olmasını sağlayarak, daha düzenli ve homojen bir çözüm dağılımı elde etmektedir. NDSIIIGWO algoritmasının MID metriğinde daha başarılı sonuçlar üretmesi ise, bu algoritmanın ideal noktaya yakınlaşma odaklı bir stratejisi kullanmasıyla açıklanabilir.

Performans ölçütlerindeki bu farklılıklar, her algoritmanın kendine özgü güçlü yönleri, farklı performans metriklerinde öne çıkmalarına neden olmakta, bu da çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde farklı operatör kullanımının önemini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, yayılım (SP) metriği yalnızca çözümlerin Pareto cephesi üzerindeki dağılımını ölçerken, MID (ortalama ideal mesafe) metriği sadece çözümlerin ideal noktaya olan uzaklığını değerlendirir. Ancak HV (hiper hacim) metriği, referans noktasına göre Pareto cephesinin kapladığı hacmi hesaplayarak hem çözümlerin yakınsamasını hem de çeşitliliğini birlikte ele alır. Bu özellik, algoritmanın genel performansını daha bütüncül bir şekilde yansıtmaktadır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde performans değerlendirmesi yapılırken HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem de

çeşitliliğini ölçmesi bakımından, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi diğer ölçütlerden daha öncelikli kabul edilmektedir.

Tablo 116. 18 aktivite (ICR=0$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
NDSIIIRAO1	4800	0,8882	1,0095	0,8722
NDSIIIRAO2	4800	0,8754	0,9149	0,8891
NDSIIIWOA	4800	0,8292	1,0519	0,8743
SPRAO1	4800	0,8208	0,3387	0,9983
SPRAO2	4800	0,8205	0,4035	1,002
NDSIIRAO2	4800	0,8148	0,7331	1,0288
SPWOA	4800	0,7971	0,368	0,9341
NDSIIIGWO	4800	0,7947	1,0734	0,8251
NDSIIRAO1	4800	0,7928	0,7405	1,0575
SPGWO	4800	0,76	0,4335	0,9422
NDSIIGWO	4800	0,7462	0,8506	0,9705
NDSIIWOA	4800	0,7209	1,0492	1,1055



Şekil 84. 18 aktivite (ICR=0$) TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

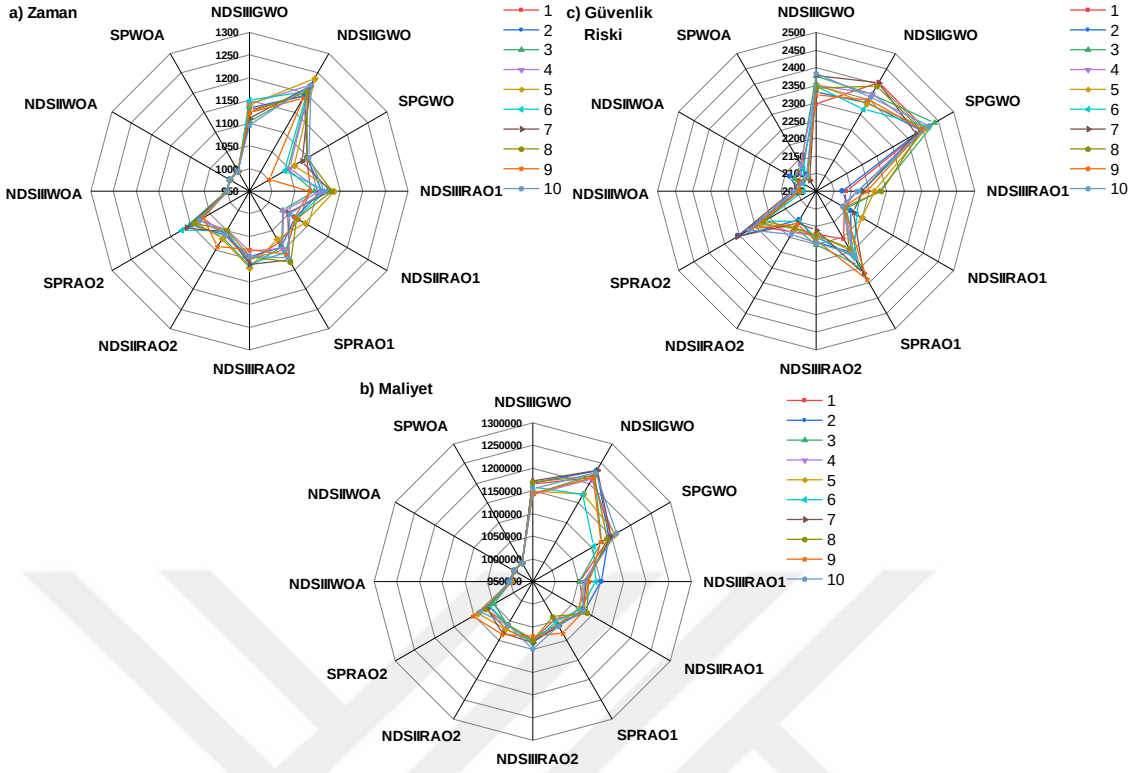
3.5.5. 180 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi

Bu çalışmada, çok amaçlı optimizasyonda kullanılan operatörlerin, küçük ölçekli zaman-maliyet-güvenlik riski problemlerinin yanı sıra büyük ölçekli inşaat projelerine etkileri de değerlendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, Tablo 97'de opsiyonlarıyla sunulan 18 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski problemi 10 kat büyütülerek, 180 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-güvenlik riski problemine dönüştürülmüştür. Bu proje toplamda 5,15E+97 farklı proje tamamlama kombinasyonu içermektedir. Tüm algoritmalar, 92 popülasyon ve 100 iterasyon ile çözüme ulaştırılmıştır. Problemde direkt olmayan maliyet 0$ olarak kabul edilmiştir.

Bağımsız çözümler sonucunda elde edilen en düşük zaman, maliyet ve güvenlik riski değerleri Şekil 85'te sunulmuştur. Gri kurt algoritmasının 10 bağımsız çözümünden elde edilen uç değerler incelendiğinde, SP (güçlendirilmiş pareto) operatörü ile geliştirilen versiyonun zaman ve maliyet amaçlarında düşük değerler üreterek daha başarılı olduğu, ancak güvenlik riskinin düşürülmesinde diğer operatörlerin gerisinde kaldığı görülmüştür. NDSII operatörü, zaman, maliyet ve güvenlik riski kriterlerinde daha yüksek değerler üretirken, NDSIII operatörü tüm kriterlerde ortalama bir performans sergilemiştir. Genel olarak, gri kurt algoritması tüm bağımsız çözümlerde her operatör için farklı sonuçlar üretmiş ve kararsız bir davranış sergilemiştir.

Rao-1 algoritmasında SP operatörü ile geliştirilen versiyonun, özellikle maliyet optimizasyonunda diğer iki versiyona göre daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir. NDSIII operatörü, tüm kriterlerde dengeli bir performans sergilerken, NDSII operatörü zaman açısından daha düşük sonuçlar elde etmiştir. Ancak her üç operatör de kendi içinde düzensiz bir performans sergilemiştir. Rao-2 algoritmasının uç değerlere ulaşmada, tüm operatörlerin birbirine benzer sonuçlar elde ettiği ancak kararsız bir yapı sergilediği görülmektedir.

Balina algoritmasında incelenen tüm algoritmalar arasında en kararlı performansı sergileyen algoritma olmuştur. NDSII,SP ve NDSIII versiyonları uç değerleri elde etmede birbirine yakın sonuçlar üretmiş ve 10 bağımsız çözümde minimum farklılıklar göstermiştir. Versiyonlar arasında belirgin bir performans farkı gözlemlenmemiştir. Algoritmanın özellikle zaman ve maliyet kriterlerinde tutarlı ve optimize edilmiş sonuçlar üretmesi, WOA'nın bu problem özelinde uç noktalar için güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.



Şekil 85. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP için algoritmaların on bağımsız çözümde elde ettiği minimum değerler

Algoritmaların her bir bağımsız çözüm sonucunda ürettiği Pareto çözümlerini zaman, maliyet ve güvenlik riski açısından kıyaslamak için en yüksek HV değerine sahip bağımsız çözüm seçilmiştir. Tablo 117'de Gri kurt algoritması tarafından elde edilen pareto çözümleri incelendiğinde uç noktaların elde edilmesinde SPGWO algoritmasının, NDSII ve NDSIII yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak dengeli çözümler incelendiğinde, NDSIII ile geliştirilen GWO algoritmasının SP algoritmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. NDSIIGWO tarafından üretilen tüm pareto çözümlerinin, diğer seriler tarafından baskılandığı tespit edilmiştir.

Tablo 117. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIGWO			SPGWO			NDSIIIGWO		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	1205	1355876	2548	1039	1500133	2601	1129	1333687	2481
	2	1220	1334283	2503	1042	1486253	2651	1130	1307408	2443
	3	1229	1349574	2493	1046	1494938	2590	1132	1298406	2471

Tablo 117'nin devamı

Mal. Göre	4	1368	1170832	2398	1319	1104808	2481	1207	1165039	2504
	5	1334	1180216	2515	1304	1106918	2447	1198	1170131	2415
	6	1354	1183771	2482	1287	1110126	2454	1222	1172871	2372
Güvenlik Risk.	7	1412	1215751	2319	1322	1147716	2418	1226	1236573	2296
	8	1355	1233617	2335	1318	1165965	2428	1232	1225201	2298
	9	1307	1263258	2340	1309	1118550	2434	1293	1221148	2300
Dengeli	10	1205	1355876	2548	1205	1355876	2548	1203	1181346	2382
	11	1255	1250863	2528	1255	1184106	2510	1238	1188603	2308
	12	1281	1277279	2398	1278	1121121	2506	1281	1220323	2303

Tablo 118'de Balina algoritmasının farklı operatörler ile geliştirilmesi neticesinde elde edilen bazı pareto çözümleri gösterilmektedir. Minimum zaman açısından üretilen pareto çözümleri incelendiğinde tüm seriler optimum zamana ulaşmasına rağmen NDSIIIWOA tarafından üretilen 1. ve 3. Pareto çözümü SPWOA tarafından baskılandığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak uç noktalara ulaşılmasında en iyi çözümün SPWOA tarafından elde edildiği görülmektedir. Güvenlik riski ve dengeli çözümler açısından incelendiğinde NDSIIWOA tarafından üretilen çözümlerden 6., 8., 10., 11. ve 12. Pareto çözümünün diğer seriler tarafından baskılandığı tespit edilmiştir.

Tablo 118. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIWOA			SPWOA			NDSIIIWOA		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	1000	1672200	2846	1000	1687655	2782	1000	1691995	2830
	2	1000	1685990	2815	1002	1679905	2776	1009	1683090	2752
	3	1004	1623500	2861	1005	1668730	2775	1011	1679050	2830
Mal. Göre	4	1690	997400	2150	1690	997400	2150	1674	1001550	2129
	5	1672	1002264	2172	1668	1001030	2190	1650	1007400	2100
	6	1651	1008860	2212	1663	1005066	2186	1647	1008788	2149
Güvenlik Risk.	7	1648	1022900	2092	1636	1034530	2085	1645	1055406	2086
	8	1641	1032988	2109	1632	1057380	2085	1650	1012450	2095
	9	1626	1046690	2133	1636	1029530	2089	1650	1007400	2100
Dengeli	10	1177	1471035	2559	1173	1354360	2562	1160	1389206	2536
	11	1212	1372178	2646	1205	1375810	2487	1212	1269960	2536
	12	1325	1207755	2418	1321	1231741	2445	1319	1149643	2402

Tablo 119'da Rao-1 algoritmasının farklı operatörlerle geliştirilmesi neticesinde elde edilen pareto çözümleri gösterilmektedir. Rao-1 serilerine bakıldığında her üç serininde

birbirine göre avantajları olduğu görülmektedir. Uç noktaların elde edilmesinde SP ve NDSII operatörü daha iyi değerler sağlarken, dengeli çözümler açısından incelendiğinde NDSIII operatörünün, NDSII ve SP tarafından üretilen çözümlere karşı daha baskın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 119. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO1			SPRAO1			NDSIIIRAO1		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	1037	1596580	2804	1131	1567480	2618	1093	1504694	2720
	2	1039	1576565	2805	1133	1530525	2602	1102	1501816	2718
	3	1039	1596528	2802	1138	1573570	2583	1109	1339888	2618
Mal. Göre	4	1554	1067378	2273	1512	1038825	2278	1414	1053588	2409
	5	1568	1067450	2253	1494	1042698	2287	1383	1056731	2441
	6	1536	1074210	2303	1479	1047630	2337	1467	1061275	2370
Güvenlik Risk.	7	1582	1154190	2142	1504	1090930	2237	1441	1313458	2229
	8	1582	1143690	2148	1473	1156870	2248	1471	1208383	2230
	9	1588	1132290	2157	1485	1148500	2250	1499	1186288	2231
Dengeli	10	1232	1307779	2646	1232	1358799	2460	1221	1238823	2407
	11	1339	1275196	2424	1336	1206481	2419	1338	1212066	2282
	12	1404	1370868	2278	1403	1249625	2301	1401	1170325	2272

Tablo 120'de Rao-2 algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümleri incelendiğinde, NDSII tarafından üretilen (10, 11, 12), SP tarafından üretilen (7, 8, 9, 10, 11, 12) ve NDSIIIRAO2 algoritmasının da 7 ve 9. Pareto çözümlerinin baskılandığı tespit edilmiştir.

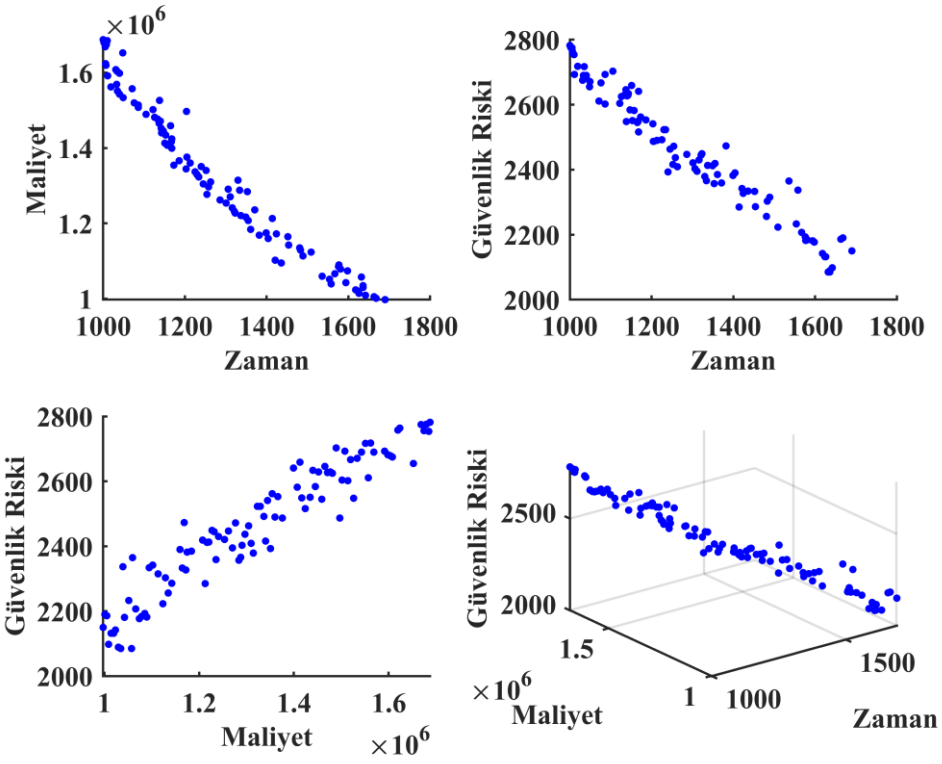
Tablo 120. 180 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	No	NDSIIRAO2			SPRAO2			NDSIIIRAO2		
		Z	M	G.R.	Z	M	G.R.	Z	M	G.R.
Zam. Göre	1	1049	1556420	2743	1093	1546870	2646	1079	1385695	2696
	2	1057	1530595	2754	1093	1536670	2648	1082	1461758	2686
	3	1061	1554110	2736	1097	1579450	2626	1089	1410890	2694
Mal. Göre	4	1554	1059470	2198	1525	1049840	2303	1513	1070360	2278
	5	1554	1059820	2191	1464	1054170	2348	1497	1072734	2329
	6	1540	1065720	2177	1447	1059340	2373	1464	1077260	2328
Güvenlik Risk.	7	1502	1106030	2170	1553	1134120	2238	1517	1166568	2190
	8	1540	1065720	2177	1561	1099980	2243	1488	1231460	2195
	9	1529	1066700	2185	1548	1088800	2268	1539	1152740	2200

Tablo 120’nin

Dengeli	10	1188	1314800	2653	1186	1392076	2683	1113	1289478	2643
	11	1214	1332638	2503	1216	1351653	2516	1172	1284453	2497
	12	1328	1176893	2476	1343	1151691	2456	1307	1151180	2454

Ürettiği Pareto çözümlerinin uç noktaları bulma kabiliyeti, çözüm uzayında daha iyi dağılması ve kaliteli çözümler üretmesi nedeniyle, performans ölçütlerinde en iyi ortalama HV değerini sağlayan SPWOA algoritması, 180 aktivite TCSRTP problemi için diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Tablo 121’de SPWOA algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait Pareto çözümleri ve kullandığı opsiyonlar sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 86’da pareto çözümlerinin grafiksel dağılımını göstermektedir.



Şekil 86. SPWOA tarafından üretilmiş 180 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski pareto grafiği

Tablo 121. 180 aktivite TCSRTP için SPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	G.R.
Min. Zaman	1	1,4,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1

NDSIIRAO1 yalnızca %3 oranında bir baskınlık sağlamıştır. NDSIIIRAO1 ve SPRAO1 karşılaştırıldığında ise, NDSIIIRAO1'in SPRAO1'in %63'ünü baskıladığı, SPRAO1'in ise NDSIIIRAO1'in %4'üne domine ettiği gözlemlenmiştir. Rao-2 algoritması versiyonları için yapılan karşılaştırmada, NDSIIRAO2'nin SPRAO2 çözümlerinin %30'unu baskıladığı, SPRAO2'nin ise NDSIIRAO2 çözümlerinin %28'ini baskıladığı tespit edilmiştir. NDSIIIRAO2 ise NDSIIRAO2 çözümlerinin %45'ini baskılarken, NDSIIRAO2 algoritması NDSIIIRAO2'nin %12'sine baskınlık kurmuştur. NDSIIIRAO2 ile SPRAO2 arasında yapılan karşılaştırmada, NDSIIIRAO2 algoritmasının SPRAO2'nin %44'ünü baskıladığı, SPRAO2'nin ise NDSIIIRAO2'nin %13'ünü baskıladığı gözlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çoğu algoritmada NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Ancak, WOA algoritmasında SP operatörü ile geliştirilen versiyonun daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 87'de, 180 aktiviteli zaman-maliyet-güvenlik riski problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir.

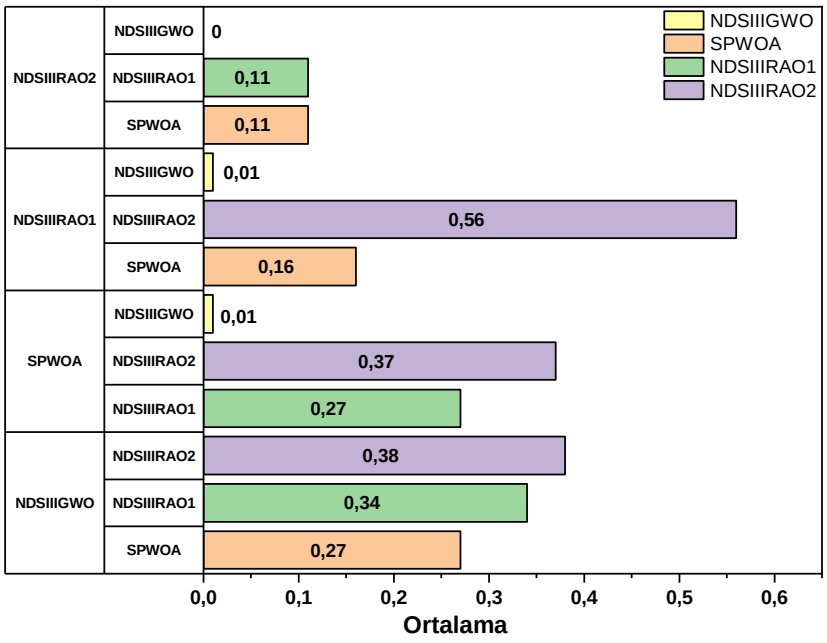
Tablo 122. 180 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(NDSIIGWO,SPGWO)	0,3200	0,0000	0,0117	0,0372
C(SPGWO, NDSIIGWO)	1,0000	0,0800	0,7300	0,2440
C(NDSIIGWO,NDSIIIGWO)	0,0220	0,0000	0,0011	0,0040
C(NDSIIIGWO,NDSIIGWO)	1,0000	0,5800	0,9679	0,0823
C(SPGWO, NDSIIIGWO)	0,0220	0,0000	0,0014	0,0040
C(NDSIIIGWO,SPGWO)	1,0000	0,4800	0,7415	0,1256
C(NDSIIWOA,SPWOA)	0,2300	0,0000	0,0497	0,0528
C(SPWOA, NDSIIWOA)	0,8800	0,2700	0,6426	0,1401
C(NDSIIWOA,NDSIIIWOA)	0,2747	0,0000	0,0637	0,0485
C(NDSIIIWOA,NDSIIWOA)	0,8000	0,2900	0,5374	0,0975
C(SPWOA, NDSIIIWOA)	0,5500	0,0100	0,2392	0,147
C(NDSIIIWOA,SPWOA)	0,6374	0,0440	0,2359	0,1425
C(NDSIIRAO1,SPRAO1)	0,5800	0,0000	0,2369	0,1540
C(SPRAO1, NDSIIRAO1)	0,7600	0,0200	0,3104	0,1501
C(NDSIIRAO1,NDSIIIRAO1)	0,1648	0,0000	0,0313	0,0341
C(NDSIIIRAO1,NDSIIRAO1)	0,9000	0,2700	0,6058	0,1382
C(SPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,2637	0,0000	0,0496	0,0589
C(NDSIIIRAO1,SPRAO1)	1,0000	0,0900	0,6336	0,1947
C(NDSIIRAO2,SPRAO2)	0,9600	0,0000	0,3074	0,2422
C(SPRAO2, NDSIIRAO2)	0,7000	0,0000	0,2841	0,1905
C(NDSIIRAO2,NDSIIIRAO2)	0,6813	0,0000	0,1207	0,1393
C(NDSIIIRAO2,NDSIIRAO2)	0,8300	0,0100	0,4565	0,2168
C(SPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,6703	0,0000	0,1312	0,1526
C(NDSIIIRAO2,SPRAO2)	0,8900	0,0000	0,4485	0,2548

NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, SPWOA'nın %27'sini, NDSIIIRAO1'in %34'ünü ve NDSIIIRAO2'nin %38'ini domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması SPWOA tarafından %1, NDSIIIRAO1 tarafından %1 ve NDSIIIRAO2 tarafından hiç domine edilememiştir (%0). SPWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, NDSIIIRAO1'in %27'sini ve NDSIIIRAO2'nin %37'sini domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, SPWOA algoritması NDSIIIRAO1 tarafından %16 ve NDSIIIRAO2 tarafından %11 oranında domine edilmiştir.

Rao-1'in NDSIII versiyonu incelendiğinde, SPWOA'nın %16'sını, NDSIIIRAO2'nin %56'sını domine ettiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, NDSIIIRAO1 algoritması NDSIIIRAO2 tarafından %11, SPWOA tarafından %27 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, NDSIIIGWO algoritmasının diğer versiyonlara göre daha üstün performans sergilediği görülmektedir. Özellikle diğer algoritmalar tarafından çok düşük oranlarda (%1) domine edilmesi ve NDSIIIRAO2'yi %38, NDSIIIRAO1'i %34 oranında domine etmesi dikkat çekicidir. Ancak önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, C-metrik performans değerlendirmesi ile algoritmaları değerlendirmek tek başına yeterli değildir



Şekil 87. 180 aktivite zaman-maliyet-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Her algoritma için yapılan 10 bağımsız çalışmanın performans metrikleri Tablo 123 ve Tablo 124'te sunulmuştur. Tablo 123, hiper hacim ve yayılım değerlerine, Tablo 124 ise ortalama ideal mesafe sonuçlarına yer vermektedir. Her bir metrik için en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 123. 180 aktivite TCSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,5384	0,4094	0,4634	0,0357	0,9699	1,0018	0,9834	0,0105
NDSIIRAO1	0,7163	0,6042	0,6764	0,0349	0,6258	0,7857	0,7143	0,0520
NDSIIRAO2	0,7634	0,6960	0,7188	0,0225	0,5916	0,7915	0,6907	0,0566
NDSIIWOA	0,7795	0,7349	0,7592	0,0135	0,6044	0,8336	0,6999	0,0636
SPGWO	0,6116	0,5219	0,5642	0,0261	0,5370	0,8053	0,6706	0,1001
SPRAO1	0,7399	0,6983	0,7170	0,0148	0,3400	0,4283	0,3902	0,0282
SPRAO2	0,7383	0,6355	0,6751	0,0333	0,3216	0,5500	0,4167	0,0621
SPWOA	0,8434	0,7996	0,8152	0,0147	0,2662	0,4114	0,3422	0,0490
NDSIIIGWO	0,6534	0,5881	0,6183	0,0209	0,9723	1,1508	1,0359	0,0571
NDSIIIRAO1	0,8603	0,7204	0,7703	0,0409	0,8225	1,1817	0,9457	0,0960
NDSIIIRAO2	0,7706	0,7129	0,7390	0,0199	0,8178	1,0225	0,8994	0,0603
NDSIIIWOA	0,8441	0,7757	0,8066	0,0241	0,8585	1,0983	1,0285	0,0796

Tablo 124. 180 aktivite TCSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

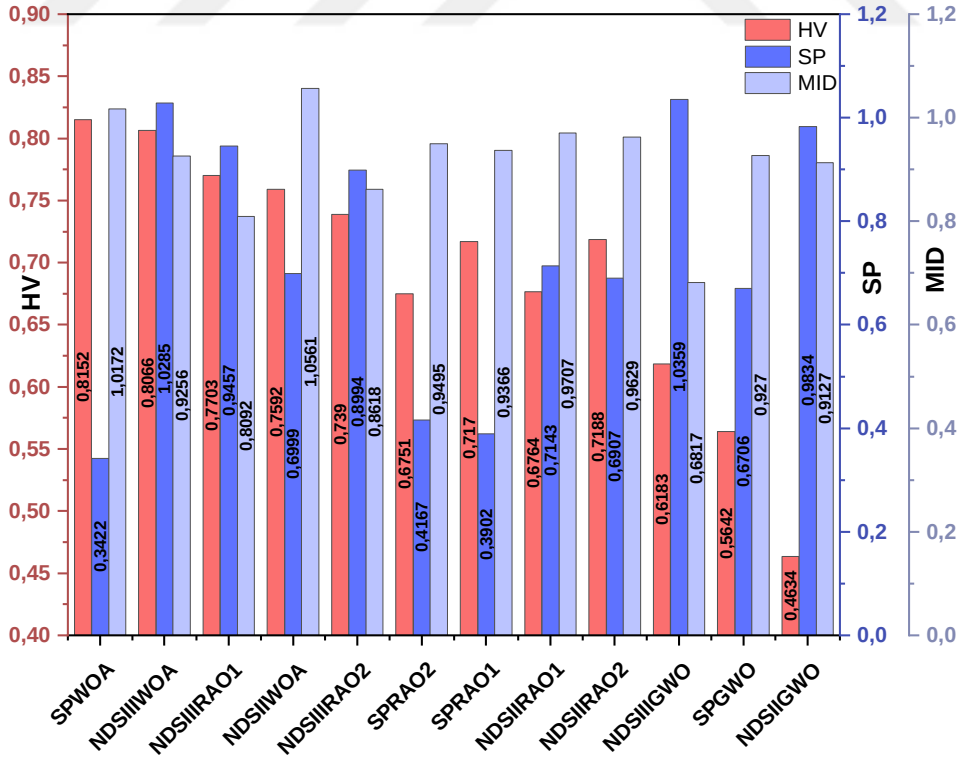
Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIGWO	0,8071	1,0023	0,9127	0,0557
NDSIIRAO1	0,9204	1,021	0,9707	0,0312
NDSIIRAO2	0,9023	1,0233	0,9629	0,0333
NDSIIWOA	1,0391	1,0895	1,0561	0,0164
SPGWO	0,8817	0,9869	0,9270	0,0332
SPRAO1	0,8854	0,9803	0,9366	0,0339
SPRAO2	0,8835	1,0052	0,9495	0,0394
SPWOA	0,953	1,0673	1,0172	0,0355
NDSIIIGWO	0,6147	0,7385	0,6817	0,0377
NDSIIIRAO1	0,7416	0,8557	0,8092	0,0370
NDSIIIRAO2	0,8232	0,902	0,8618	0,0270
NDSIIIWOA	0,8888	0,9726	0,9256	0,0234

Tablo 125'te performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmaktadır. Tablo 125'te performans ölçümlerine ait ortalama değerler, Şekil 88'de grafiksel olarak sunulmaktadır. SPWOA algoritmasının HV ve SP performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha

iyi sonuçlar (0.8152-0.3422) verdiği görülmektedir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği pareto çözümlerinin (0.6817) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Tablo 125. 180 aktivite TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
SPWOA	9200	0,8152	0,3422	1,0172
NDSIIIWOA	9200	0,8066	1,0285	0,9256
NDSIIIRAO1	9200	0,7703	0,9457	0,8092
NDSIIWOA	9200	0,7592	0,6999	1,0561
NDSIIIRAO2	9200	0,7390	0,8994	0,8618
SPRAO2	9200	0,6751	0,4167	0,9495
SPRAO1	9200	0,7170	0,3902	0,9366
NDSIIRAO1	9200	0,6764	0,7143	0,9707
NDSIIRAO2	9200	0,7188	0,6907	0,9629
NDSIIIGWO	9200	0,6183	1,0359	0,6817
SPGWO	9200	0,5642	0,6706	0,9270
NDSIIGWO	9200	0,4634	0,9834	0,9127



Şekil 88. 180 aktivite TCSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.5.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Problemleri Genel Değerlendirme

Çok amaçlı zaman-maliyet-güvenlik riski optimizasyon problemlerinin çözümünde, Rao serileri, Gri Kurt Optimizasyonu ve Balina Optimizasyonu algoritmaları NDSII, SP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleriyle geliştirilmiş ve performansları detaylı olarak incelenmiştir. Analizler, küçük (18 aktivite) ve büyük (180 aktivite) ölçekli projeler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

18 aktiviteli problem, direkt olmayan maliyetin 200$ ve 0$ olduğu iki farklı durumda incelenmiştir. Direkt olmayan maliyetin 200$ olduğu durumda yapılan analizlerde, NDSIIIRAO1 algoritması, %50 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle 0.9167 hiper hacim değerine ulaşarak MOGA algoritmasının 0.8623 değerinden daha yüksek bir performans sergilemiştir. Yayılım metriğinde SPRAO2 algoritması, ortalama ideal mesafede ise NDSIIIGWO algoritmasının en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

18 aktiviteli problemin direkt olmayan maliyetin 0$ olduğu durumda yapılan analizlerde, NDSIIIRAO1 algoritması 0.8882 hiper hacim değeri ile en iyi performansı göstermiştir. Yayılım açısından SPRAO1 algoritması 0.3387 değeri ile en iyi sonucu verirken, ortalama ideal mesafede NDSIIIGWO algoritması 0.6817 değeri ile en başarılı sonucu elde etmiştir.

180 aktiviteli büyük ölçekli problemde ise SPWOA algoritması 0.8152 hiper hacim değeri ile en iyi performansı gösterirken, aynı zamanda 0.3422 değeri ile yayılım metriğinde de en iyi sonucu elde etmiştir. Ortalama ideal mesafede ise yine NDSIIIGWO algoritması 0.6817 değeri ile öne çıkmıştır. Problem boyutunun artmasıyla birlikte WOA algoritmasının güçlü arama kabiliyeti ve SP operatörünün etkin seçim stratejisi, geniş çözüm uzayında daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Ancak NDSIIIGWO algoritması, büyük problem boyutunda bile ideal noktaya yakın çözümler üretebilme yeteneğini korumuştur.

Metasezgisel algoritmaların özellikleri incelendiğinde, WOA algoritmasının büyük ölçekli problemlerde istikrarlı ve yüksek performans gösterdiği, Rao serilerinin küçük ölçekli problemlerde etkili sonuçlar verdiği, GWO algoritmasının ise dengeli çözümler üretmede başarılı olmasına rağmen büyük ölçekli problemlerde çeşitlilik açısından zorlandığı gözlemlenmiştir. Operatörler açısından değerlendirildiğinde, NDSIII operatörünün tüm problemlerde özellikle dengeli çözümler üretmede başarılı olduğu, NDSII operatörünün ise diğer iki operatöre kıyasla genel olarak daha düşük performans gösterdiği tespit edilmiştir.

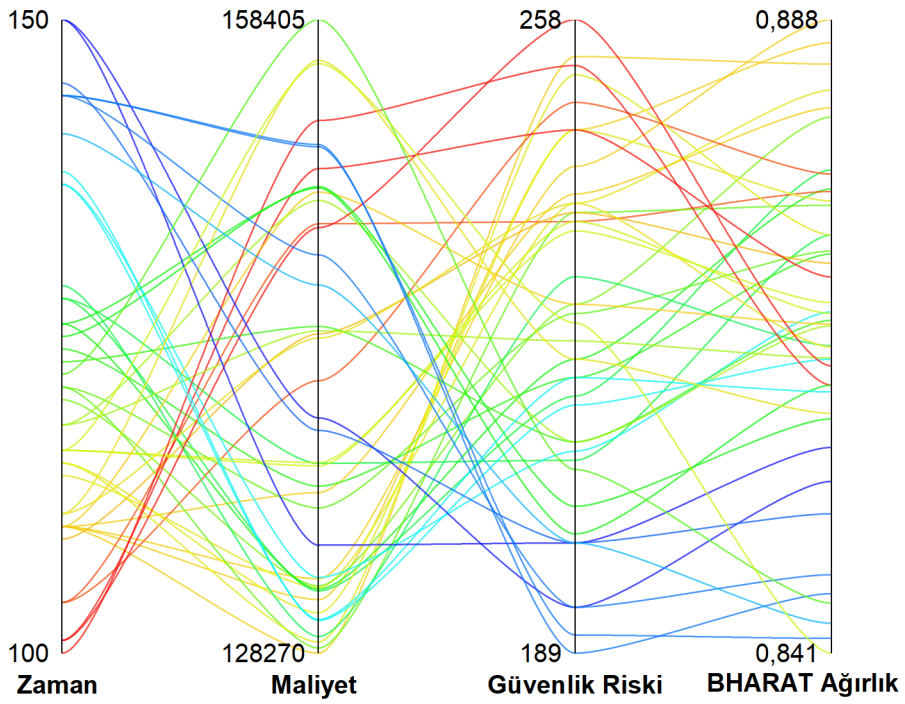
Problem boyutunun artmasıyla algoritmaların performanslarında belirgin değişimler gözlenmiştir. Küçük ölçekli problemlerde NDSIII operatörü ile geliştirilen Rao serileri başarılı olurken, büyük ölçekli problemlerde SP operatörü ile geliştirilen WOA algoritması öne çıkmıştır. Bu durum, sadece algoritma seçiminin değil, aynı zamanda bu algoritmaların hangi operatörle geliştirildiğinin de optimizasyon performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

3.5.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Güvenlik Riski Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi

Bu bölümde, 18 aktiviteli (ICR=200$ ve ICR=0$) ve 180 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-güvenlik riski optimizasyon problemlerinin çözümleri neticesinde elde edilen pareto çözümleri arasından en uygun alternatiflerin belirlenmesi amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Her bir problem kategorisinde en iyi performansı gösteren algoritmanın pareto çözümleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu kapsamda, 18 aktiviteli (ICR=200$) problem için NDSIIIRAO1, 18 aktiviteli (ICR=0$) problem için yine NDSIIIRAO1 ve 180 aktiviteli problemler için SPWOA algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümleri kullanılmıştır. Analiz sürecinde zaman, maliyet ve güvenlik riski kriterlerine eşit önem verilmiş ve her üç kriter eşit ağırlıkta (wt=wc=wr=0.33) değerlendirilmiştir. BHARAT yöntemi kullanılarak her bir problem kategorisi için en iyi üç alternatif belirlenmiştir. Bu alternatifler, zaman, maliyet ve güvenlik riski kriterleri için belirlenen eşit ağırlık değerleri (wt=wc=wr=0.33) altında BHARAT yönteminin sıralama sonuçlarına göre elde edilen çözümlerdir. Bu sayede, proje yöneticilerinin farklı kriterlere göre optimize edilmiş alternatifler arasından, projenin gereksinimlerine en uygun çözümü objektif bir şekilde seçmelerine olanak sağlamaktadır.

Şekil 89'da, 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet ve güvenlik riski değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümlerine bakıldığında, zaman değerlerinin 100-150 gün arasında, maliyet değerlerinin 128270-158405 arasında ve güvenlik riski değerlerinin 189-258 aralığında değiştiği görülmektedir. Grafikte her bir çizgi bir pareto çözümünü temsil etmekte olup, bu çizgilerin kesişim noktaları çözümlerin birbirleriyle olan ilişkisini göstermekte ve BHARAT yöntemi sonucunda elde edilen ağırlık değerlerine (0.844-0.891) ulaşmaktadır.

BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 126'da sunulmuştur. Tabloda her bir alternatif için kullanılan modlar, projenin tamamlanma süresi, toplam maliyeti, güvenlik riski değeri ve BHARAT ağırlık değerleri yer almaktadır. Değerlendirme sonucunda ilk sırada yer alan alternatif, 110 günde tamamlanmakta, 131808$ maliyet gerektirmekte ve 242 güvenlik riski değeri sağlamakta olup, 0.8908 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir.



Şekil 89. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

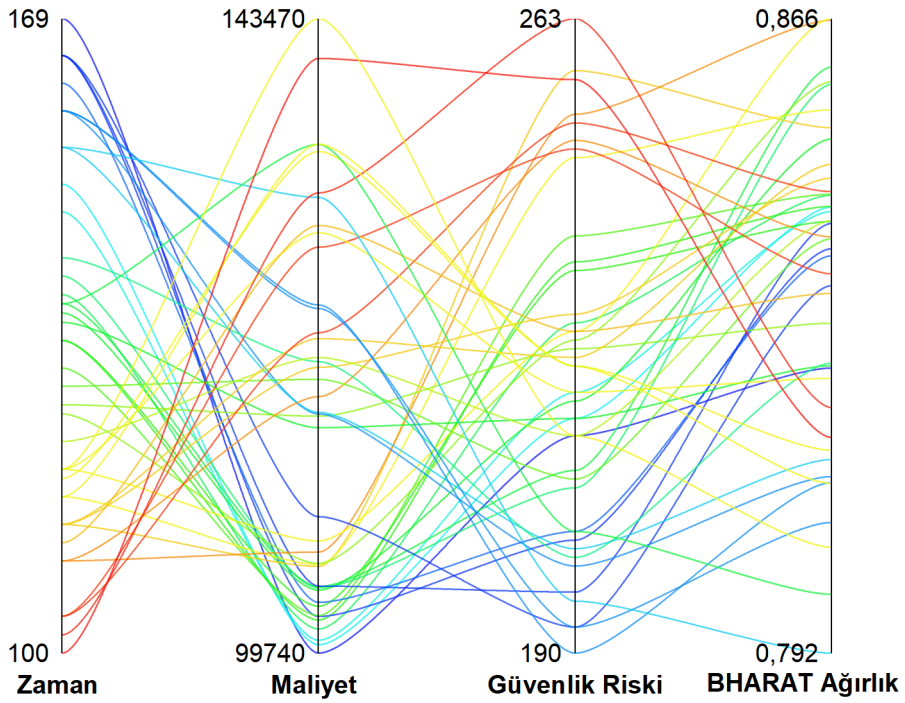
Tablo 126. 18 aktiviteli (ICR=200$) TCSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Güvenlik Riski	BHARAT Ağrılık
1	1,5,3,3,4,3,3,4,1,1,2,1,1,2,1,2,1,1	110	131808	242	0,8877
2	1,5,3,3,4,3,3,4,1,1,2,1,2,3,1,2,1,1	110	130808	246	0,8860
3	1,5,3,3,4,3,3,5,1,1,3,1,3,3,1,5,1,1	110	128270	254	0,8844

Şekil 90'da, 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet ve güvenlik riski değerleri

arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümlerine bakıldığında, zaman değerlerinin 100-169 gün arasında, maliyet değerlerinin 99740-143470 arasında ve güvenlik riski değerlerinin 190-263 aralığında değiştiği görülmektedir.

BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 127'de sunulmuştur. Değerlendirme sonucunda ilk sırada yer alan alternatif, 120 günde tamamlanmakta, 107470$ maliyetle ve 227 güvenlik riski değeri sağlamakta olup, 0.8661 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir.

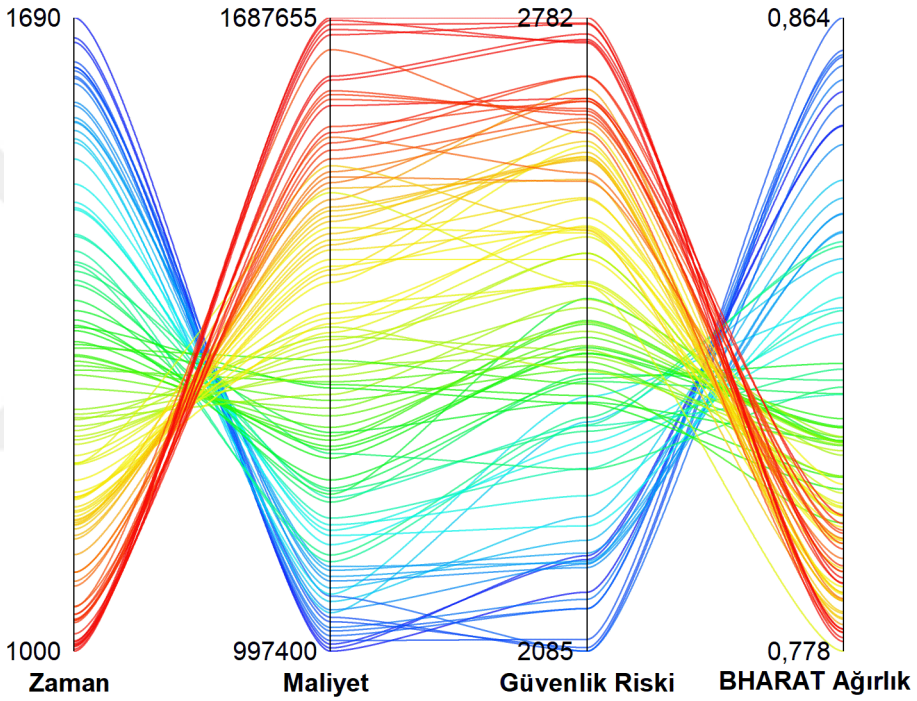


Şekil 90. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 127. 18 aktiviteli (ICR=0$) TCSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Güvenlik Riski	BHARAT Ağrılık
1	1,5,3,3,4,3,3,1,1,1,1,1,1,2,1,3,3,1	120	107470	227	0,8661
2	1,5,3,3,4,3,3,2,1,1,1,1,3,2,1,5,1,1	110	106715	252	0,8659
3	5,5,3,3,4,3,3,4,1,1,1,4,1,3,1,5,3,1	138	104308	211	0,8604

Şekil 91'de, 180 aktiviteli TCSRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet ve güvenlik riski değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümlerine bakıldığında, zaman değerlerinin 1000-1690 gün arasında, maliyet değerlerinin 997400-1687655 arasında ve güvenlik riski değerlerinin 2085-2782 aralığında değiştiği görülmektedir. Grafikte her bir çizgi bir pareto çözümünü temsil etmekte olup, bu çizgilerin kesişim noktaları çözümlerin birbirleriyle olan ilişkisini göstermekte ve BHARAT yöntemi sonucunda elde edilen ağırlık değerlerine (0.778-0.864) ulaşmaktadır.



Şekil 91. 180 aktiviteli TCSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

BHARAT yöntemi ile yapılan sıralama sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 128'de sunulmuştur. Değerlendirme neticesinde ilk sırada yer alan alternatif, 1642 günde, 1008880$ maliyet ve 2098 güvenlik riski değeriyle, 0.8638 BHARAT ağırlık değeri ile en iyi çözüm olarak belirlenmiştir. İlk üç alternatif incelendiğinde sürelerin 1626-1642 gün aralığında değiştiği, maliyetlerin 1008880-1014128 arasında olduğu ve güvenlik riski değerlerinin 2098-2132 aralığında dağıldığı görülmektedir.

Tablo 128. 180 aktiviteli TCQTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Güvenlik Riski	BHARAT Ağrılık
1	5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,2,3,4,2,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,3	1642	1008880	2098	0,8638
2	5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,2,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,2,3,5,5,3,3,4,3,2,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,2,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,2,3,4,2,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,2,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3	1636	1029530	2089	0,8594
3	4,5,3,3,4,3,3,4,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,5,5,3,3,4,3,3,4,4,3,3,4,3,3,1,5,3,3,4,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,1,5,3,3,4,5,3,3,4,3,3,5,4,3,3,4,3,3,1,5,3,3,4,5,3,3,4,3,3,4,4,3,3,4,3,3,1,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,4,5,3,3,4,3,3,1,4,3,3,4,4,3,3,4,3,3,4,5,3,3,4,3,3,1,4,3,3,4,4,3,3,4,3,3,4,4,3,3,4,3,3,1,4,3,3,4,5,3,3,4,3,3,5,4,3,3,4,3,3,1,5,3,3	1626	1014128	2132	0,8588

3.6. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemleri

Çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki ödünleşim (TCQETP) problemlerinin incelenmesi kapsamında, 29, 69 ve 290 aktiviteli projeler üzerinde algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. 29 ve 69 aktiviteli TCQETP problemi Hunyh vd. (2021) tarafından çok amaçlı sosyal grup optimizasyon algoritması ile ele alınarak çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, zaman-maliyet-kalite-çevresel etki ödünleşim problemlerini derinlemesine incelemek amacıyla Rao serileri, Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve Balina Optimizasyonu Algoritması (WOA) kullanılmıştır. Bu algoritmalar ayrı ayrı güçlendirilmiş pareto (SP), operatörleri değiştirilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) ve NDSIII çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. İki ve üç amaçlı problemlerde kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII) operatörünün, SP ve NDSIII'e göre neredeyse tüm problemlerde geride kalması sebebiyle dört ve beş amaçlı problemlerde incelemesi yapılmamıştır.

Ayrıca, geliştirilen algoritmaların 29 ve 69 aktiviteli TCQETP problemleri üzerindeki performanslarını, literatürde kullanılan diğer algoritmalarla performans metriklerinin daha

doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi amacıyla MOSGO algoritması yeniden kodlanarak test edilmiştir. Sosyal grup algoritması, çok amaçlı seçim ve eleme operatörü olarak entropi kalabalık mesafesi tabanlı (Wang vd., 2010) baskın olmayan sıralama yöntemini kullanmaktadır. MOSGO algoritması hakkında daha fazla bilgi için Hunyh vd. (2021) çalışmasına başvurulabilir.

Son olarak, geliştirilen algoritmaların büyük ölçekli projelerdeki performansını değerlendirmek amacıyla, 29 aktiviteli proje on kat artırılarak 290 aktiviteye genişletilmiştir. Böylece, kullanılan optimizasyon algoritmalarının ve çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin performans değişiklikleri büyük ölçekli TCQETP problemi üzerinde incelenmiş ve algoritmaların performansı C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

3.6.1. 29 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi

29 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite-çevresel eti ödünleşim problemi, Huynh vd. (2021) tarafından çok amaçlı sosyal grup algoritması kullanılarak 100 popülasyon 150 iterasyon ile çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, Rao serileri, Gri Kurt algoritması ve Balina algoritması, çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisini araştırmak amacıyla güçlendirilmiş Pareto yöntemi (SP), güçlendirilmiş pareto yönteminin parametrelerinin değiştirilmiş hali (MSP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörleri ile ayrı ayrı geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon boyutu 88, iterasyon sayısı ise 150 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatürdeki MOSGO algoritması ile karşılaştırıldığında %56 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha yüksek performans göstermesi hedeflenmiştir.

29 aktiviteli problem, toplamda 8,26E+09 farklı proje tamamlanma opsiyonu sahiptir. Probleme ait aktiviteler arası öncülük ilişkileri ve zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları Tablo 129'da gösterilmektedir.

Tablo 129. 29 Aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki opsiyonları

Öncülük ilişkileri	Zaman opsiyonları			Maliyet opsiyonları			Kalite opsiyonları			Çevresel etki opsiyonları		
	Z1	Z2	Z3	M1	M2	M3	K1	K2	K3	ÇE1	ÇE2	ÇE3
	5	4		2030	2300		91,72	97,39		175,43	172,73	
1FS-3	8	7	6	1020	1280	1510	91,75	94,13	85,87	106,28	93,2	86,11
1;2	8	7	6	1700	1850	2090	91,2	98,01	84,53	236,25	229,24	200,88
3	4	3		590	730		91,08	98,14		197,92	193,97	
4SS+1	2			90			92,41			140,53		
1	4	3		910	1100		93,03	94,43		117,33	115,89	
2;6FS-1	2			250			91,65			112,08		
3;7	7	6	5	1490	1650	1830	94,06	96,69	85,65	175,52	160,49	144,46
4;8	4	3		520	750		91,81	95,39		132,87	119,33	
5;9FF+1	2			90			90,04			87,32		
5;10	1			50			91,53			92,24		
11	8	7	6	3260	3580	3710	94,6	94,62	82,95	129,99	129,61	105,67
12SS+2	5	4	3	1140	1400	1720	90,73	96,64	84,09	244,36	239,02	199,47
13SS+2	4	3		300	450		91,87	95,61		85,87	76,27	
12FS-4 ;14FS-2	8	6	5	1020	1300	1430	91,62	97,6	83,54	131,34	129,81	99,65
15FS-6	9	8	6	790	900	1180	94,3	97,44	82,19	162,27	148,99	147,82
15SS+4	13	12	11	3340	3750	4060	94,1	97,27	82,71	166,84	159,92	120,91
15FS+4	9	8	7	470	650	830	94,92	98,73	84,5	196,37	179,28	172,83
15	6	5	4	460	600	810	93,76	95,68	81,25	201,71	190,75	153,89
17SS+3	6	5		1280	1430		94,25	94,37		112,05	94,8	
20SS+2	14	12	10	1090	1320	1560	92,75	98,96	84,78	218,89	204,64	167,94
21SS+2	14	11	9	900	1140	1400	94,47	95,85	82,63	180,82	178,3	172,48
22FS-9	14	12	11	2220	2510	2690	92,52	94,82	81,74	200,77	192,33	183,89
23SS+6	3			230			94,41			196,33		
23FS-4	6	5	4	1590	1790	1990	90,49	98,7	81,31	106,57	95,07	59,81
25SS+4	10	9	8	2630	2930	3240	91,26	96,27	83,93	93,86	82,05	49,94
26	8	7	6	2060	2450	2660	94,61	94,09	83,14	174,75	162,6	125,81
27FS-3	10	9	8	320	440	610	92,1	95,07	82,57	164,01	153,11	129,57
28	1			50			94,12			193,07		

Şekil 92'de on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliyet, çevresel etki ve maksimum kalite değerleri sırasıyla gösterilmiştir. Farklı algoritmalar ve bunların çeşitli operatörlerle geliştirilmiş versiyonları karşılaştırıldığında, her birinin performansında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Gri kurt algoritması zaman ve kalite amaçları açısından incelendiğinde, MSP ile geliştirilen versiyonun diğer iki versiyona göre daha istikrarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Maliyet ve çevresel etki açısından değerlendirildiğinde ise NDSIII versiyonu diğer versiyonlara kıyasla daha zayıf performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Balina algoritması (WOA) incelendiğinde, algoritmanın tüm versiyonları minimum zaman ve çevresel etki hedeflerinde istikrarlı bir şekilde optimum sonuçlara ulaşmayı başarmıştır. Kalite ve maliyet kriterlerinde ise SP ve MSP operatörleriyle geliştirilen versiyonlar, NDSIIIWOA'ya kıyasla daha tutarlı bir performans sergilemiştir.

Rao-1 algoritmasının MSP ve SP versiyonları, minimum zaman ve çevresel etki hedeflerinde NDSIIIRAO1'e göre daha istikrarlı bir performans göstermiş, her çözümde optimum sonuçlara ulaşmıştır. Maliyet açısından MSP versiyonu diğer versiyonlara göre başarılı olmuştur. Kalite kriterinde tüm versiyonlar zorlanmakla birlikte, MSP operatörlü versiyon diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Rao-2 algoritmasının SP ve MSP versiyonları zaman, maliyet ve çevresel etki kriterlerinde benzer performans gösterirken, NDSIIIRAO2 daha istikrarsız sonuçlar üretmiştir. Kalite hedefinde tüm versiyonlar zorlanmış, ancak MSPRAO2 diğerlerine göre daha başarılı olmuştur.

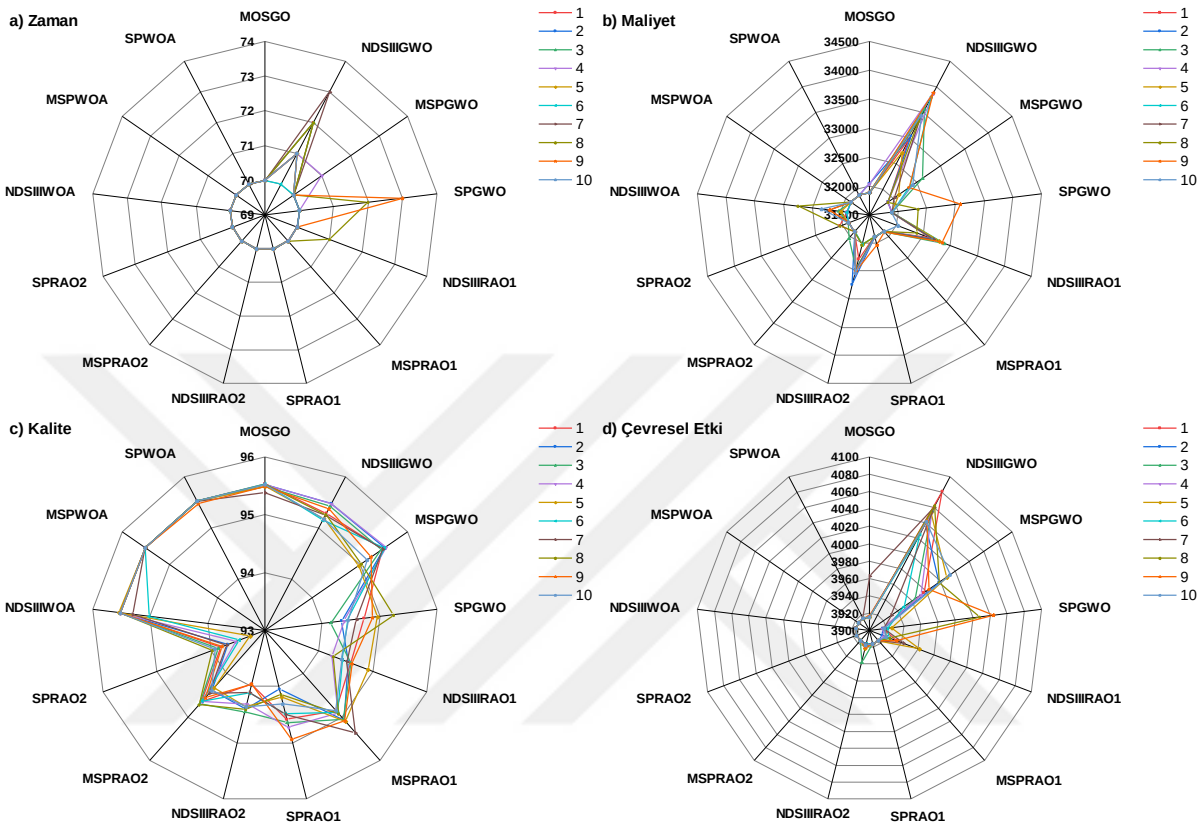
Genel değerlendirmede, WOA algoritması diğer algoritmalara kıyasla optimum sonuçlara ulaşmada daha istikrarlı bir performans sergilemiştir. Huynh vd. (2021) tarafından geliştirilen MOSGO algoritması, %127 daha fazla fonksiyon değerlendirmesi kullanmasına rağmen, MSPWOA kadar istikrarlı sonuçlar üretememiştir. Bu sonuçlar, WOA algoritmasının ve özellikle MSP operatörüyle geliştirilen versiyonunun, 29 aktivite TCQETP probleminde diğer algoritmalara göre uç noktaları elde etmede daha etkili sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tablo 130-133 arasında, her bir algoritmanın farklı versiyonlarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması verilmiştir. Tablolarda, her algoritmanın en yüksek hiper hacim değerine sahip bağımsız çözümü esas alınarak ilgili pareto çözümleri seçilmiştir. Pareto çözümlerinde, 1. ve 2. çözümler minimum zaman, 3. ve 4. çözümler minimum maliyet, 5. ve 6. çözümler maksimum kalite, 7. ve 8. çözümler minimum çevresel etkiyi sağlarken, 9. ve 10. çözümler dengeli çözümler olarak sunulmaktadır.

Tablo 130 incelendiğinde, MSPGWO algoritmasının zaman, maliyet ve çevresel etki açısından diğer versiyonlara kıyasla daha düşük değerler sunduğu belirlenmiştir. Maksimum kalite açısından değerlendirildiğinde ise NDSIIIGWO algoritmasının daha yüksek değer elde ettiği gözlemlenmiştir. Tüm pareto çözümleri incelendiğinde, MSP ve NDSIII ile geliştirilen GWO algoritmalarının birbirlerine karşı baskınlık kuramadığı, ancak SPGWO algoritması ile üretilen 2. ve 6. pareto çözümlerinin baskılandığı tespit edilmiştir.

Balina algoritmasına ait pareto çözümleri Tablo 131'de sunulmuştur. Minimum zaman açısından, her üç versiyonun da aynı değerlere ulaştığı gözlemlenmiş ancak NDSIIIWOA algoritmasının 1. pareto çözümünün baskılandığı belirlenmiştir. Minimum maliyet ve çevresel etki ile maksimum kalite değerlerine ulaşmada ise her üç versiyonun da optimum sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. WOA algoritmasının üç versiyonunun dengeli çözümlerde

birbirine yakın sonuçlar sunduğu, MSPWOA versiyonunun ise kalite açısından diğerlerine göre daha yüksek değerlere ulaştığı, ancak bununla birlikte daha yüksek çevresel etki değerleri de ürettiği görülmüştür.



Şekil 92. 29 aktiviteli TCQETP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Tablo 130. 29 aktiviteli TCQETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	SPGWO				MSPGWO				NDSIIIGWO			
	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
1	73	38700	91.04	4120.61	71	38930	90.43	4083.91	73	36360	92.15	4275.64
2	73	38960	89.35	4091.18	73	36880	91.82	4233.70	73	37640	92.18	4153.46
3	87	33080	92.53	4430.50	93	32030	92.73	4522.68	92	33380	92.61	4421.15
4	88	33330	92.97	4473.99	93	32180	92.73	4505.43	85	33400	93.51	4438.79
5	84	35320	94.87	4387.28	82	35500	95.08	4405.80	79	36030	95.25	4344.99
6	80	36290	94.78	4356.15	82	35690	94.92	4374.00	80	36060	95.21	4332.97
7	75	38540	90.32	4043.99	74	39690	88.52	3966.18	73	39080	91.09	4060.20
8	74	39360	89.33	4055.12	74	39140	88.89	3968.06	77	38260	92.10	4086.58
9	77	36720	92.47	4230.77	77	35250	92.19	4297.80	78	35440	93.24	4329.39
10	78	37050	93.63	4287.98	78	37920	91.28	4126.59	79	36680	89.84	4144.77

Tablo 131. 29 aktiviteli TCQETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	SPWOA				MSPWOA				NDSIIIWOA			
	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
1	70	39940	89.64	4030.60	70	38220	90.14	4070.14	70	38260	89.31	4135.91
2	70	40080	89.70	4019.64	70	38680	89.13	4062.52	70	39460	90.85	4095.39
3	93	31890	92.66	4533.64	93	31890	92.66	4533.64	93	31890	92.66	4533.64
4	92	32010	92.76	4522.74	93	32140	92.84	4509.40	87	32580	92.88	4507.65
5	79	37060	95.52	4322.97	79	37060	95.52	4322.97	79	37060	95.52	4322.97
6	79	36920	95.45	4333.93	79	37270	95.02	4286.11	80	36530	95.47	4346.08
7	70	40840	87.82	3915.69	70	40840	87.82	3915.69	70	40840	87.82	3915.69
8	70	40560	88.35	3916.86	70	40560	88.35	3916.86	80	39200	89.36	3977.45
9	77	39130	88.83	3990.13	77	35160	93.00	4382.72	77	39500	90.19	3984.93
10	78	37790	91.03	4138.70	78	39070	91.32	4072.34	78	38410	88.18	4018.65

Tablo 132'de SPRAO1 ve MSPRAO1 algoritmalarının zaman, maliyet ve çevresel etki açısından NDSIIIRAO1 algoritmasına göre optimum sonuçlara ulaştığı görülmektedir. Ancak Rao-1 algoritmaları tarafından üretilen tüm pareto çözümleri incelendiğinde hiçbir çözümün birbirini baskılayamadığı görülmektedir.

Tablo 133'te Rao-2 algoritmasına ait çözümler incelendiğinde SP ve MSP ile geliştirilen versiyonların uç noktalara yaklaşmada NDSIIIRAO2 algoritmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak pareto çözümleri incelendiğinde SP tarafından üretilen 5. Pareto çözümü ve MSP tarafından üretilen 8. Pareto çözümünün baskılandığı tespit edilmiştir.

Tablo 132. 29 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	SPRAO1				MSPRAO1				NDSIIIRAO1			
	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
1	70	39730	89.91	4080.77	70	39070	90.99	4148.12	71	39200	89.83	4069.59
2	70	40150	89.42	3996.41	70	39160	88.51	4060.52	71	39280	91.26	4096.86
3	93	31890	92.66	4533.64	93	31890	92.66	4533.64	92	32380	93.32	4508.59
4	93	32090	92.94	4522.14	92	32160	92.86	4530.94	93	32670	92.73	4460.07
5	80	35630	94.18	4358.96	78	37000	94.99	4337.08	83	34510	94.27	4417.69
6	81	36150	94.02	4283.60	77	37070	94.54	4311.25	78	35990	94.25	4369.79
7	70	40840	87.82	3915.69	70	40840	87.82	3915.69	72	40440	88.04	3925.46
8	74	39720	88.76	3944.78	70	40560	88.35	3916.86	75	40200	87.99	3927.98
9	77	38680	89.42	4006.19	77	35720	93.38	4290.24	77	38440	92.41	4111.25
10	78	38850	89.49	4005.32	78	34540	91.73	4398.70	78	39240	88.19	3965.59

Tablo 133. 29 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	SPRAO2				MSPRAO2				NDSIIIRAO2			
	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
1	70	39840	89.02	4020.91	70	40100	87.81	3952.77	70	37700	90.55	4196.65
2	70	40560	88.35	3916.86	70	40530	88.33	3954.70	70	39440	88.91	4048.04
3	93	31890	92.66	4533.64	93	31890	92.66	4533.64	89	32500	93.08	4513.63
4	93	32090	92.94	4522.14	93	32070	92.79	4516.55	87	32540	92.38	4515.70
5	87	34590	93.54	4424.10	87	34190	94.65	4427.58	84	34640	94.11	4455.47
6	81	35600	93.51	4411.81	87	34560	94.53	4409.80	89	35370	93.67	4352.19
7	70	40840	87.82	3915.69	70	40840	87.82	3915.69	70	40560	88.35	3916.86
8	70	40560	88.35	3916.86	70	40700	87.58	3919.64	72	40300	88.80	3922.68
9	77	38800	88.71	4008.41	77	38060	92.46	4211.84	77	39470	89.98	3947.18
10	78	39400	89.22	4025.45	78	37650	91.53	4183.30	78	39110	88.15	3965.76

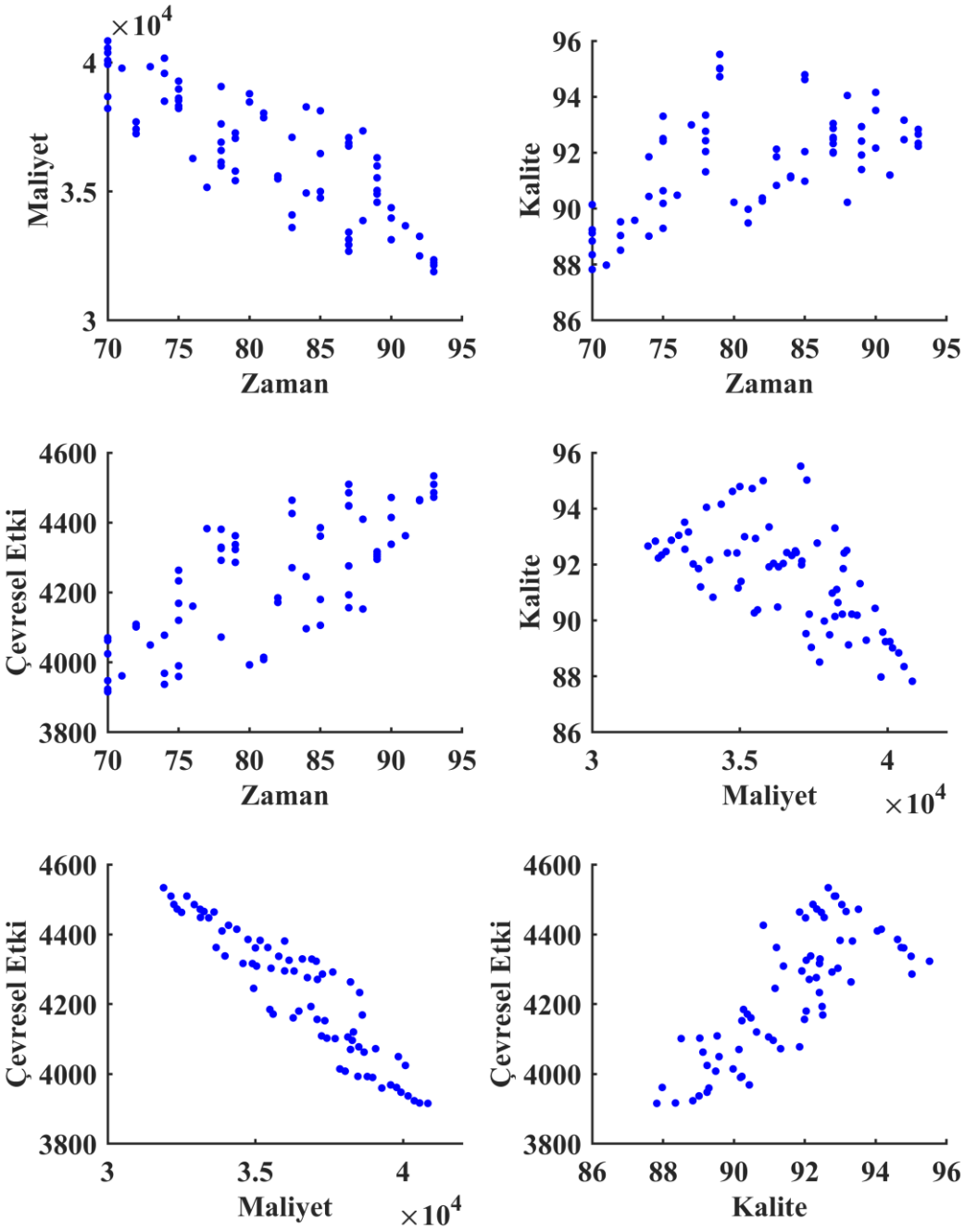
Bir sonraki bölümde, performans metrikleri açısından ortalama HV (hiper hacim) ölçütü incelendiğinde, en yüksek değere MSPWOA algoritmasının ulaştığı görülmektedir. Literatürde Huynh vd. (2021) çalışmasında, MOSGO algoritması için en iyi bağımsız çözüm yerine tüm çözümler arasından elde edilen en iyi sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 134'te MSPWOA algoritmasına ait en yüksek HV değerine sahip pareto çözümü ile MOSGO algoritmasının sonuçları kıyaslanmıştır. Hem Huynh vd. (2021) çalışmasında elde edilen pareto çözümleri hem de bu çalışmada tekrar üretilen MOSGO algoritmasına ait çözümler arasındaki kıyaslama tabloda sunulmaktadır. Çözümler incelendiğinde, MSPWOA algoritmasının %56 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile MOSGO algoritmasına göre daha iyi kalite değeri elde ettiği görülmektedir. Tablo 135'te, MSPWOA algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait pareto çözümleri opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 93'te pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 134. 29 aktiviteli TCQETP problemi için MSPWOA algoritmasına ait Pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların Pareto çözümleriyle karşılaştırılması

No	MOSGO (2021)				MOSGO (Bu çalışma)				MSPWOA			
	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
1	73	35660	90,80	4313,28	70	39930	89,39	3990,26	70	38220	90.14	4070.14
2	74	35350	91,22	4345,39	70	40100	87,81	3952,77	70	38680	89.13	4062.52
3	93	31890	92,66	4533,64	93	31890	92,66	4533,64	93	31890	92.66	4533.64
4	92	32010	92,76	4522,74	91	32420	93,00	4482,61	93	32140	92.84	4509.40
5	82	36190	95,41	4345,00	79	36870	95,47	4324,41	79	37060	95.52	4322.97
6	83	35350	94,93	4391,47	80	36620	95,42	4334,25	79	37270	95.02	4286.11
7	70	40840	87,82	3915,69	70	40840	87,82	3915,69	70	40840	87.82	3915.69

Tablo 134'ün devamı

8	70	40560	88,35	3916,86	71	40570	87,63	3918,39	70	40560	88.35	3916.86
9	74	38280	90,28	4097,59	77	39120	89,32	3995,42	77	35160	93.00	4382.72
10	76	36280	90,24	4201,82	78	37990	92,81	4149,97	78	39070	91.32	4072.34



Şekil 93. MSPWOA tarafından üretilmiş 29 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki pareto grafiği

Tablo 135. 29 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	Ç.E
Minimum Zaman	1	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,2,1,2,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	38220	90.14	4070.14
	2	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,3,1,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	38680	89.13	4062.52
Minimum Maliyet	3	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	93	31890	92.66	4533.64
	4	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	93	32140	92.84	4509.40
Maksimum Kalite	5	2,2,2,2,1,2,1,2,2,1,1,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,2,2,2,2,1	79	37060	95.52	4322.97
	6	2,2,2,2,1,2,1,2,2,1,1,2,2,2,2,2,2,2,3,2,2,2,2,1,2,2,2,2,1	79	37270	95.02	4286.11
Minimum Çevresel Etki	7	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	40840	87.82	3915.69
	8	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,2,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	40560	88.35	3916.86

3.6.2. 29 Aktivite TCQETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 136'da, 29 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

MOSGO algoritmasının GWO versiyonları ile karşılaştırması incelendiğinde, NDSIIIGWO çözümlerinin %1'ini domine ederken, NDSIIIGWO tarafından %7 oranında domine edilmiştir. SP ile geliştirilen GWO versiyonunda MOSGO çözümlerin %13'ünü domine ederken, SPGWO tarafından %5 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen GWO versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %11'ini domine ederken, MSPGWO tarafından %6 oranında domine edilmiştir.

WOA algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, MOSGO algoritması NDSIIIWOA'nın %7'sini domine ederken, NDSIIIWOA tarafından %2 oranında domine edilmiştir. SP ile geliştirilen WOA versiyonunda MOSGO çözümlerin %13'ünü domine ederken, SPWOA tarafından %2 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen WOA versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %11'ini domine ederken, MSPWOA tarafından %8 oranında domine edilmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MOSGO algoritması NDSIIIRAO1'in %7'sini domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %3 oranında domine edilmiştir. SPRAO1 ile karşılaştırıldığında MOSGO çözümlerin %15'ini domine ederken,

SPRAO1 tarafından %3 oranında domine edilmiştir. MSPRAO1 versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %7'sini domine ederken, MSPRAO1 tarafından %8 oranında domine edilmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, MOSGO algoritması NDSIIIRAO2'nin %11'ini domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir. SPRAO2 ile karşılaştırıldığında MOSGO çözümlerin %19'unu domine ederken, SPRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir. MSPRAO2 versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %11'ini domine ederken, MSPRAO2 tarafından %6 oranında domine edilmiştir.

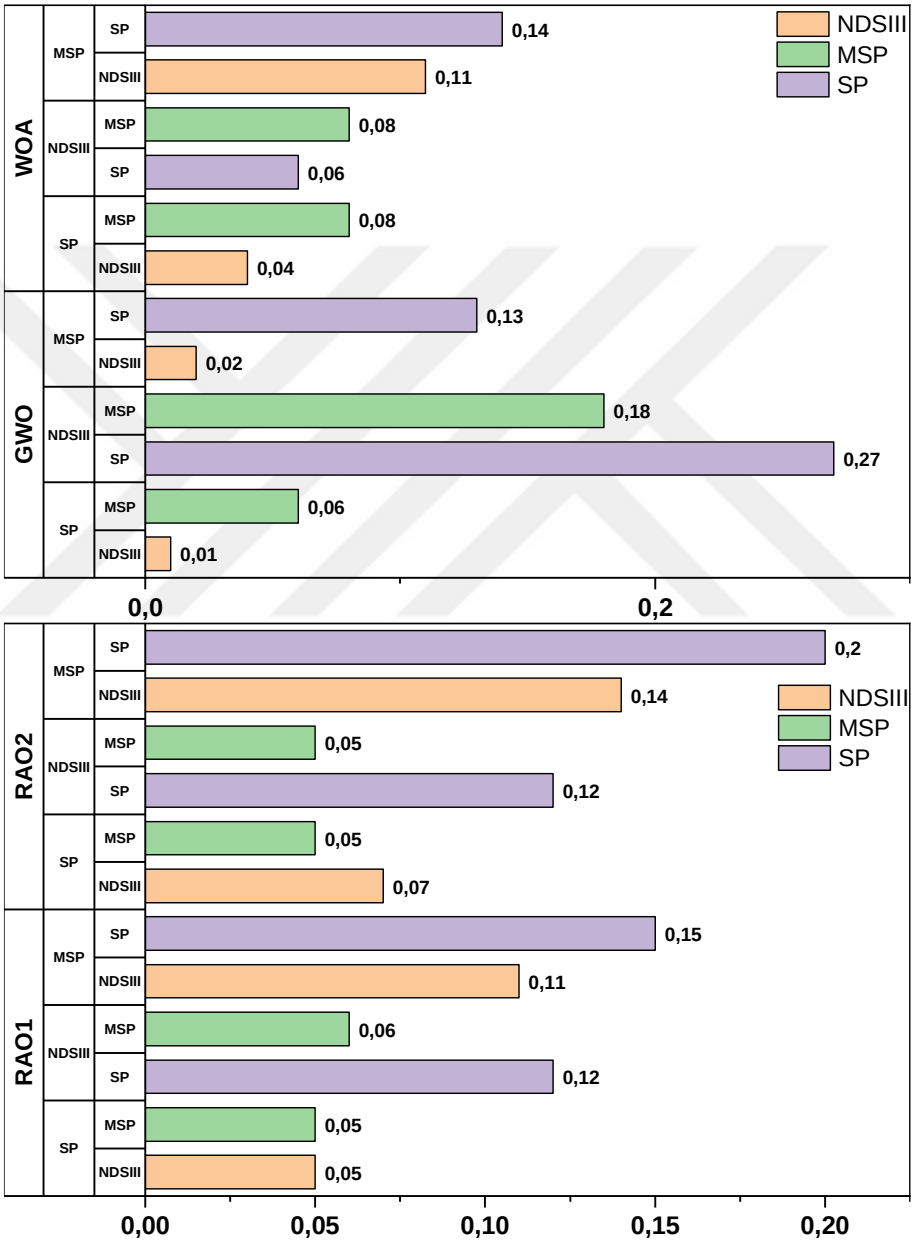
Genel olarak değerlendirildiğinde, MOSGO algoritmasının özellikle SP ile geliştirilen versiyonlara karşı daha iyi performans sergilediği görülmektedir. En yüksek baskınlık oranı SPRAO2 üzerinde %19 olarak gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, NDSIII ile geliştirilen versiyonların MOSGO'ya karşı daha dirençli olduğu ve daha düşük oranlarda domine edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 136. 29 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MOSGO, NDSIIIGWO)	0,0682	0,0000	0,0133	0,0169
C(NDSIIIGWO, MOSGO)	0,1500	0,0200	0,0752	0,0567
C(MOSGO, SPGWO)	0,2500	0,0341	0,1303	0,0416
C(SPGWO, MOSGO)	0,1500	0,0000	0,0506	0,0282
C(MOSGO, MSPGWO)	0,2841	0,0227	0,1190	0,0473
C(MSPGWO, MOSGO)	0,1300	0,0000	0,0629	0,0298
C(MOSGO, NDSIIIWOA)	0,1818	0,0000	0,0767	0,0413
C(NDSIIIWOA, MOSGO)	0,0800	0,0000	0,0222	0,0165
C(MOSGO, SPWOA)	0,2386	0,0341	0,1349	0,0437
C(SPWOA, MOSGO)	0,0800	0,0000	0,0256	0,0200
C(MOSGO, MSPWOA)	0,2159	0,0000	0,1132	0,0366
C(MSPWOA, MOSGO)	0,1900	0,0100	0,0837	0,0372
C(MOSGO, NDSIIIRAO1)	0,1705	0,0114	0,0776	0,0349
C(NDSIIIRAO1, MOSGO)	0,0800	0,0000	0,0300	0,0196
C(MOSGO, SPRAO1)	0,2500	0,0455	0,1582	0,0497
C(SPRAO1, MOSGO)	0,0900	0,0000	0,0302	0,0219
C(MOSGO, MSPRAO1)	0,1600	0,0100	0,0751	0,0361
C(MSPRAO1, MOSGO)	0,1818	0,0227	0,0889	0,034
C(MOSGO, NDSIIIRAO2)	0,2159	0,0455	0,1158	0,0362
C(NDSIIIRAO2, MOSGO)	0,0600	0,0000	0,0124	0,0134
C(MOSGO, SPRAO2)	0,2955	0,0909	0,1933	0,0489
C(SPRAO2, MOSGO)	0,0600	0,0000	0,0133	0,0146
C(MOSGO, MSPRAO2)	0,2159	0,0455	0,1173	0,0340
C(MSPRAO2, MOSGO)	0,1700	0,0100	0,0664	0,0345

Şekil 94'te, SP,MSP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak oluşturulan algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırması

sunulmaktadır. Tüm algoritmalara bakıldığında, SP ile geliştirilen yöntemin diğer algoritmalara göre oldukça geri kaldığı görülmektedir. Gri kurt algoritması incelendiğinde en iyi operatörün NDSIII ile geliştirilen algoritma olduğu görülmektedir. Rao serileri ve Balina algoritması incelendiğinde ise MSP ile geliştirilen algoritmaların, NDSIII ile geliştirilen algoritmalara göre daha baskın olduğu görülmüştür.



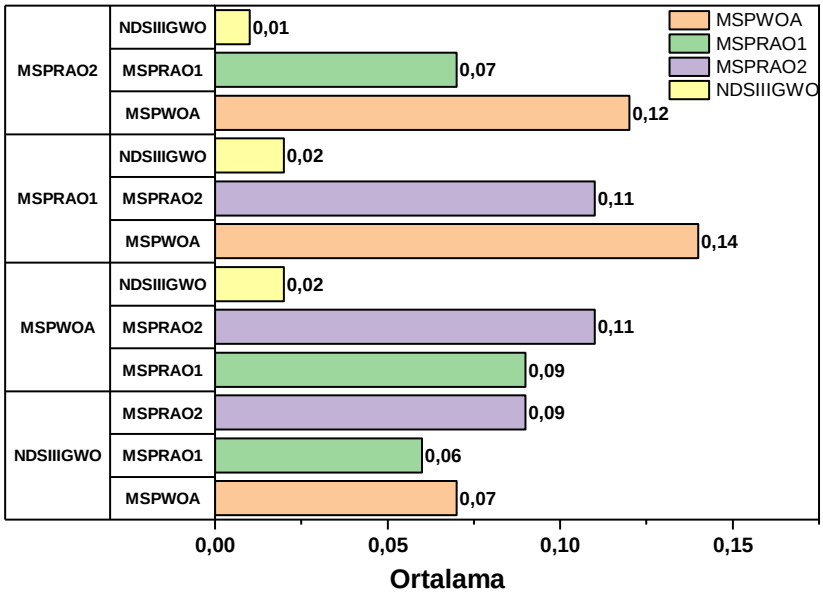
Şekil 94. 29 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

Şekil 95'te, 29 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir.

NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, MSPWOA'nın %7'sini, MSPRAO1'in %6'sını ve MSPRAO2'nin %9'unu domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması MSPWOA tarafından %2, MSPRAO1 tarafından %2 ve MSPRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir.

MSP ile geliştirilen WOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, MSPRAO1'in %9'unu ve MSPRAO2'nin %11'ini domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, MSPWOA algoritması MSPRAO1 tarafından %14 ve MSPRAO2 tarafından %12 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen Rao-1 versiyonu incelendiğinde, MSPRAO2'nin %11'ini domine ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, MSPRAO1 algoritması MSPRAO2 tarafından %7 ve MSPWOA tarafından %9 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, algoritmaların birbirlerine karşı düşük baskınlık oranlarına sahip olduğu ve performanslarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. NDSIIIGWO'nun diğer algoritmalar tarafından oldukça düşük oranlarda (%1-2) domine edilmesi, gri kurt algoritmasının baskınlık kriteri açısından diğer algoritmalara göre üstünlüğünü göstermektedir.



Şekil 95. 29 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Algoritmaların performans değerlendirmesinde yalnızca C-metrik ölçütüne bağlı kalmak yanıltıcı olabilir. Çünkü çözümler belirli bir bölgede yoğunlaşarak sayısal üstünlük sağlayabilir. Bu nedenle, algoritmaların Pareto uzayındaki dağılımı, çeşitliliği ve kapsadığı alanın büyüklüğünün de incelenmesi gerektiği önceki bölümlerde vurgulanmaktadır.

Tablo 137'de hiper hacim ve yayılım, Tablo 138'de ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 137. 29 aktivite TCQETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOSGO	0,8806	0,8605	0,8716	0,0070	0,4225	0,5225	0,4835	0,0230
MSPGWO	0,8908	0,8396	0,8740	0,0137	0,5733	0,7349	0,6587	0,0561
NDSIIIGWO	0,8244	0,7803	0,8061	0,0153	0,9248	0,9915	0,9565	0,0217
SPGWO	0,8653	0,7525	0,8335	0,0348	0,1068	0,5226	0,2399	0,1411
MSPWOA	0,9257	0,8945	0,9098	0,0121	0,5401	0,8513	0,6580	0,0963
NDSIIIWOA	0,9030	0,8845	0,8956	0,0062	0,8070	1,0682	0,9493	0,0740
SPWOA	0,8883	0,8570	0,8748	0,0104	0,1105	0,1589	0,1264	0,0180
MSPRAO1	0,9235	0,8945	0,9065	0,0082	0,3803	0,5344	0,4620	0,0553
NDSIIIRAO1	0,8827	0,8453	0,8717	0,0105	0,6624	0,7816	0,7118	0,0493
SPRAO1	0,8598	0,8390	0,8517	0,0070	0,1238	0,1712	0,1485	0,0146
MSPRAO2	0,8986	0,8739	0,8865	0,0069	0,4580	0,5639	0,5019	0,0318
NDSIIIRAO2	0,8872	0,8602	0,8683	0,0081	0,6077	0,7297	0,6865	0,0441
SPRAO2	0,8474	0,8244	0,8341	0,0088	0,0990	0,1456	0,1293	0,0134

Tablo 138. 29 aktivite TCQETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

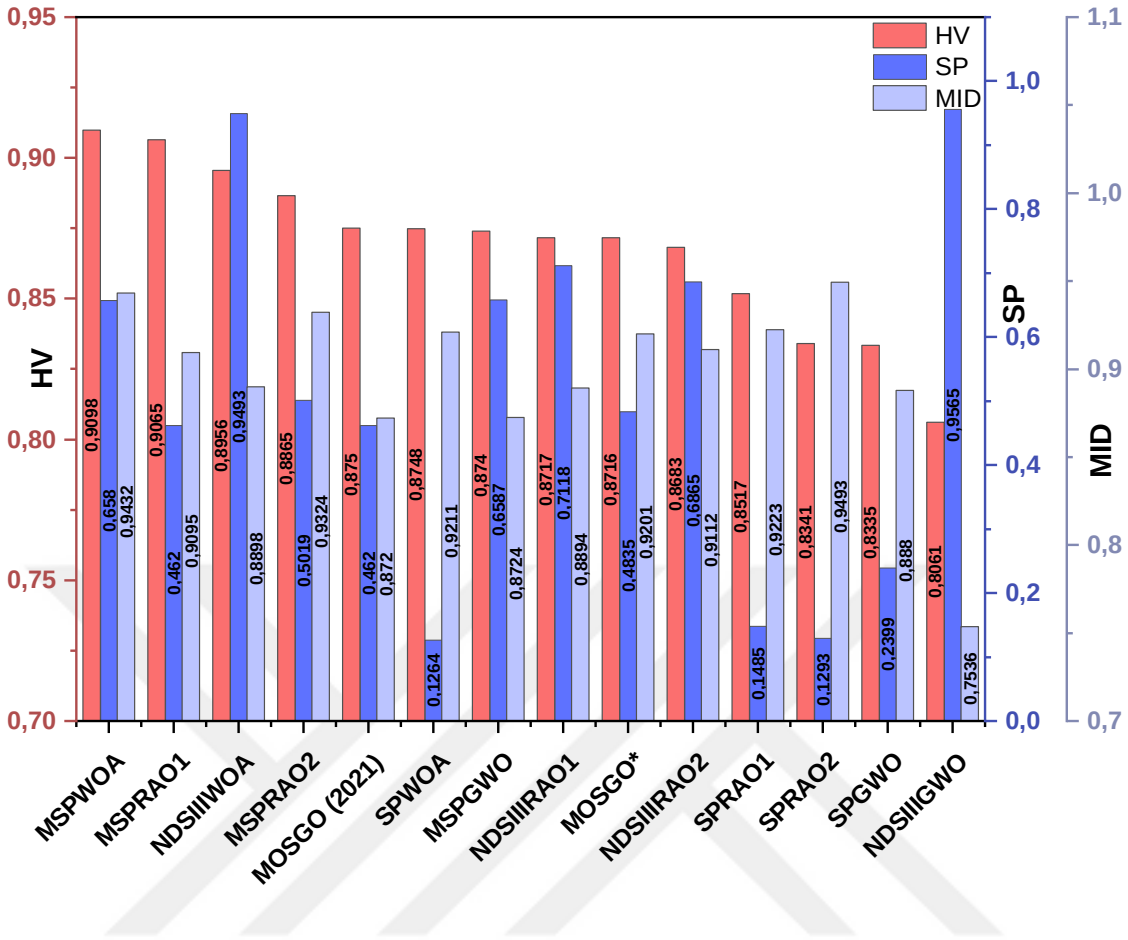
Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOSGO	0,8977	0,9329	0,9201	0,0113
MSPGWO	0,8315	0,9219	0,8724	0,0252
NDSIIIGWO	0,7248	0,7880	0,7536	0,0184
SPGWO	0,8270	0,9169	0,8880	0,0290
MSPWOA	0,9270	0,9581	0,9432	0,0101
NDSIIIWOA	0,8630	0,9208	0,8898	0,0163
SPWOA	0,8973	0,9392	0,9211	0,0127
MSPRAO1	0,8987	0,9241	0,9095	0,0091
NDSIIIRAO1	0,8466	0,9128	0,8894	0,0182
SPRAO1	0,9102	0,9360	0,9223	0,0080
MSPRAO2	0,9168	0,9505	0,9324	0,0096
NDSIIIRAO2	0,8928	0,9256	0,9112	0,0092
SPRAO2	0,9329	0,9604	0,9493	0,0092

Tablo 139'da performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmakta ve Şekil 96'da grafiksel olarak sunulmaktadır. MSPWOA algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.9098) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPWOA algoritması (0.1264) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.7536) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde performans değerlendirmesi yapılırken HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi bakımından, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi diğer ölçütlerden daha öncelikli kabul edilmektedir. MOSGO (2021) ve bu çalışma kapsamında geliştirilen MOSGO* algoritması diğer algoritmalara göre daha fazla fonksiyon değerlendirmesi (30000) kullanmasına rağmen, HV metriği açısından daha düşük performans sergilemiştir. MSPWOA algoritması, özellikle HV metriğinde en iyi performansı sergileyerek ve daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak, 29 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için diğer algoritmalara göre daha etkili bir yaklaşım sunmuştur.

Tablo 139. 29 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
MSPWOA	13200	0,9098	0,6580	0,9432
MSPRAO1	13200	0,9065	0,4620	0,9095
NDSIIIWOA	13200	0,8956	0,9493	0,8898
MSPRAO2	13200	0,8865	0,5019	0,9324
MOSGO (2021)	30000	0,8750	0,4620	0,8720
SPWOA	13200	0,8748	0,1264	0,9211
MSPGWO	13200	0,8740	0,6587	0,8724
NDSIIIRAO1	13200	0,8717	0,7118	0,8894
MOSGO*	30000	0,8716	0,4835	0,9201
NDSIIIRAO2	13200	0,8683	0,6865	0,9112
SPRAO1	13200	0,8517	0,1485	0,9223
SPRAO2	13200	0,8341	0,1293	0,9493
SPGWO	13200	0,8335	0,2399	0,8880
NDSIIIGWO	13200	0,8061	0,9565	0,7536
*Bu Çalışma				



Şekil 96. 29 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.6.3. 69 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi

69 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite-çevresel etki (karbondioksit emisyonu) ödünleşim problemi, ilk olarak Huynh vd. (2021) tarafından MOSGO algoritması kullanılarak 200 popülasyon 200 iterasyon yardımıyla çözülmüştür. Daha sonra, Son ve Khoi (2023b) tarafından ele alınan problem hibrit balıkçı küfü algoritması (SMAOTM) yardımıyla 150 popülasyon 200 iterasyonla çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, Rao serileri, Gri Kurt algoritması ve Balina algoritması, çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisini araştırmak amacıyla güçlendirilmiş Pareto yöntemi (SP), güçlendirilmiş pareto yönteminin parametrelerinin değiştirilmiş hali (MSP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörleri ile ayrı ayrı geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon boyutu

168, iterasyon sayısı ise 300 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatürdeki MOSGO algoritması ile karşılaştırıldığında %37 daha az fonksiyon değerlendirmesi gerektirmekte olup, önerilen algoritmanın daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha yüksek performans göstermesi hedeflenmiştir.

69 aktiviteli problem, toplamda 2,06755E+26 farklı proje tamamlanma opsiyonu sahiptir. Probleme ait aktiviteler arası öncülük ilişkileri ve zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları Tablo 140'ta gösterilmektedir.

Tablo 140. 69 Aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki opsiyonları

İlişki	Zaman opsiyonları			Maliyet opsiyonları			Kalite opsiyonları			Çevresel etki opsiyonları		
	Z1	Z2	Z3	M1	M3	M3	K1	K2	K3	Ç.E.1	Ç.E.2	Ç.E.3
	1			96			92,41			127,52		
1	7			3022			90,54			125,91		
1	7	6	5	3140	3187	3266	92,87	97,13	83,64	130,84	122,93	84,77
1	7	6	5	3316	3366	3449	91,75	94,15	82,52	114,07	98,62	89,3
2FS+3	10			450			90,73			171,3		
5	3	2		564	578		94,27	94,75		144,11	118,95	
6	7	6	5	731	749	768	91,14	97,78	84,95	169,38	164,53	157,67
44FS+30	7			731			93,98			110,66		
46SS-15	10	8	7	401	411	421	92,75	98,71	81,42	167,91	164,4	162,32
44FS+45	8	7	6	401	411	421	94,41	97,91	81,76	101,73	80,6	79,08
34	80	73	72	800	820	840	94,69	98,45	85,98	160,78	158,16	149,04
44FS+30	14			800			91,42			151,62		
1	9	8	7	149	153	156	94,07	94,52	84,13	101,69	75,07	35,35
13	3	2		800	820		92,46	94,8		177,72	152,64	
14	4	3	2	37	38	39	91,44	94,81	81,71	156,75	150,22	147,55
15	7	6	5	11	11	12	94,98	98,37	83,92	124,53	111,41	85,43
16FS-2	7	6	5	1017	1042	1068	94,7	94,31	81,92	156,85	130,64	97,37
17FS-3	7	6	5	58	59	61	92,62	95,91	85,76	159,34	129,8	100,8
18FF+1	3	2		585	600		94,3	95,17		178,32	157,62	
19	2			19			90,31			168,88		
20	3			50			94,67			106,84		
26	2	1		290	297		90,52	96,1		126,85	116,95	
22	3			403			90,21			156,92		
22	3	2		130	133		93,8	98,14		167,54	154,6	
24	1			327			93,31			114,26		
14	36	32	30	1809	1863	1927	94,16	94,57	83,58	143,81	136,22	106,62
26FS+7	39	35	33	2010	2070	2141	94,59	96,95	81,22	175,73	174,96	163,12
26	33	29	27	1802	1856	1919	93,44	97,54	81,49	149,08	143,25	122,02
27	28	24	22	926	954	986	91,24	96,62	84,78	121,08	105,76	88,61

Tablo 140’ın devamı

25;28	35	33	31	3087	3195	3303	91,57	98,46	82,05	170,14	149,59	112,81
27	35	33	31	3087	3195	3303	92,81	95,24	81,08	168,53	154,63	119,83
30	10	8	7	2657	2750	2843	91	96,64	81,51	157,67	153,86	128,4
31	10	8	7	2657	2750	2843	90	94,68	85,91	156,73	137,93	111,15
32	10	8	7	2657	2750	2843	91,2	98,15	83,44	115,07	114,23	91,62
33	10	8	7	2657	2750	2843	91,45	96,31	83,07	171,61	146,81	131,01
34	10	8	7	2657	2750	2843	90,16	96,56	83,91	135,72	127,96	88,15
35	10	8	7	2657	2750	2843	90,68	96,17	84,5	100,25	78,78	52,08
36	10	8	7	2657	2750	2843	94,21	97,16	83	165,21	138,68	108,36
37	10	8	7	2657	2750	2843	93,39	97,8	82,42	115,47	112,8	105,8
38	10	8	7	2657	2750	2843	90,44	96,1	82,93	168,19	148,34	139,71
39	10	8	7	2657	2750	2843	90,52	97,49	82,31	151,28	137,29	105,16
40	10	8	7	2657	2750	2843	91,25	97,8	81,03	141,71	128,88	91,95
41	10	9	8	2657	2750	2843	91,02	97,47	82,67	123,26	109,41	77,71
43FS -5	10	8	7	2608	2699	2791	93,54	98,9	84,16	174,54	161,11	148,17
44FS +5	70	67	65	200	205	210	94,97	94,81	83,24	107,55	81,37	47,29
37FF	14	11	10	395	405	415	92,57	97,19	84,91	116,18	90,91	70,71
46FS +10	10	8	7	549	563	576	94,68	98,05	81,53	156,13	138,38	100,28
37	153	146	143	7663	7855	8046	92,76	98,24	82,79	150,07	135,37	118,33
39	139	133	129	7932	8130	8329	92,5	98,53	84,93	108,34	80,95	46,49
41	132	126	123	8206	8411	8616	92,66	96,22	82,25	119,58	106,31	80,6
43	125	119	117	8206	8411	8616	91,01	97,51	82,73	174,07	161,86	153,7
44	118	111	108	8206	8411	8616	93,85	98,15	84,82	138,01	110,56	74,45
52SS +7	111	105	101	8206	8411	8616	94,21	97,57	81,09	163,64	142,12	120,49
53SS +7	91	86	84	2129	2182	2235	90,81	95,33	85,48	175,23	167,44	135,25
54	60			9779			94,1			131,1		
59SS	30	27	25	10779	10941	11210	93,63	94,87	85,3	141,7	135,91	101,72
56SS +15	20	17	15	4779	4851	4970	92,02	94,99	81,77	134,94	120,48	106,75
57	20	18	15	1779	1823	1868	92,8	94,3	81,27	124,73	99,57	59,69
8;12	57			200			93,61			161,49		
46FS +30	64	63	60	467	483	500	94,27	98,31	84,75	158,15	142,33	123,37
60	30	28	26	1817	1862	1908	93,65	98,39	84,76	104,69	88,49	78,93
30	50	46	44	16107	16349	16751	90,98	94,14	82,45	152,2	141,29	130,55
62FS -10	80	75	73	2883	2955	3027	91,69	97,82	81,51	147,56	142,63	108,98
63SS	50			1375			94,88			147,8		
63SS	60	56	54	713	731	749	94,16	94,45	85,64	127,43	109,49	76,53
65SS	100	96	94	11595	11769	12059	91,19	96,55	85,88	167,91	141,64	112,4
65FS -10	50	46	44	912	935	958	92,53	94,43	82,31	117,83	100,15	99,84
64SS	60	56	54	572	586	601	93,5	96,83	81,86	144,44	129,46	118,17
68SS +15	60	55	54	1275	1307	1339	93,38	98,95	84,26	116,84	105,12	93,3

Şekil 97'de, 69 aktiviteli problemin on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, çevresel etki, maliyet ve maksimum kalite değerleri karşılaştırılmıştır. Gri kurt algoritması versiyonları incelendiğinde, MSPGWO'nun zaman kriterinde tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, SPGWO'nun bazı çözümlerde optimumdan sapma gösterdiği ve NDSIIIGWO'nun istikrarsız bir davranış sergilediği görülmektedir. Maliyet açısından her üç versiyonun da bağımsız çözümler arasında değişkenlik gösterdiği, ancak MSPGWO'nun diğerlerine göre daha kararlı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Çevresel etki bakımından üç versiyonun da bağımsız çözümler arasında sapmalar gösterdiği gözlemlenmiştir. Kalite açısından MSPGWO'nun diğer versiyonlara göre daha yüksek ve kararlı sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

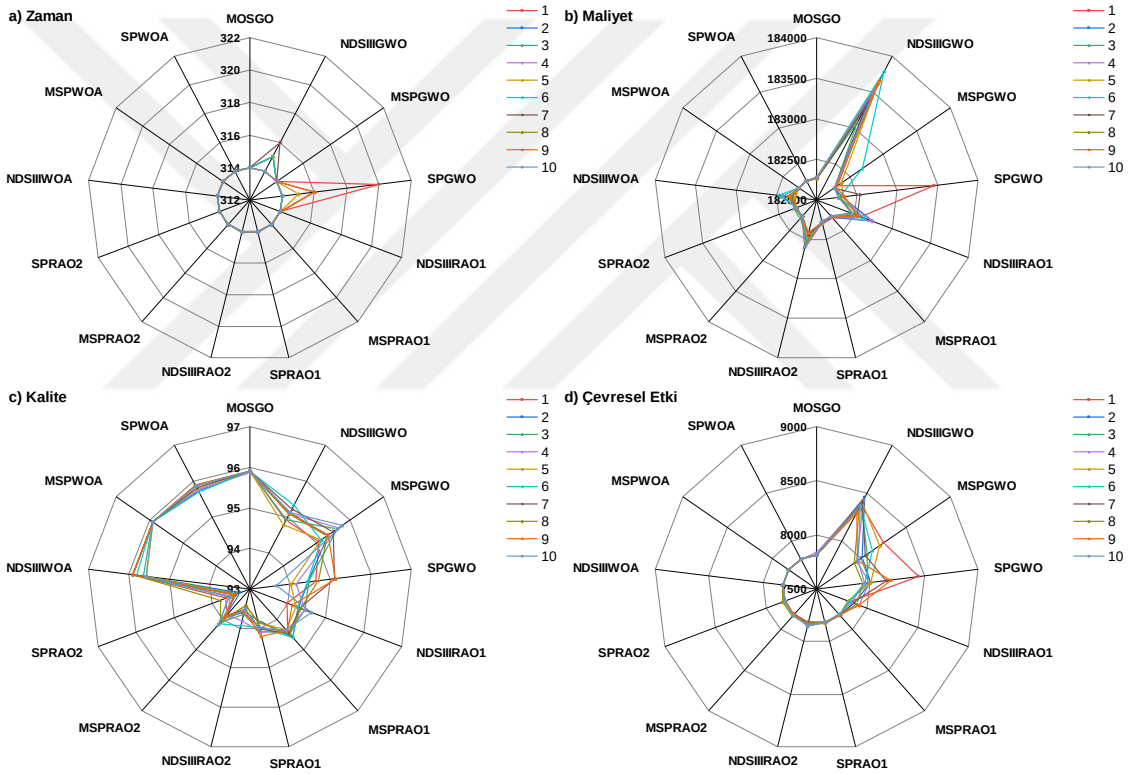
Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) incelendiğinde, zaman kriterinde üç versiyonun da (NDSIIWOA, MSPWOA ve SPWOA) tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği görülmektedir. Çevresel etki açısından da üç versiyonun tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri yakaladığı tespit edilmiştir. Maliyet açısından MSPWOA ve SPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, NDSIIIWOA'nın bazı çözümlerde optimumdan sapma gösterdiği gözlemlenmiştir. Kalite açısından MSPWOA tüm bağımsız çözümlerde maksimum kaliteyi elde ederken, SPWOA ve NDSIIIWOA'nın da yüksek kalite değerleri üretmekle birlikte çözümler arasında sapmalar gösterdiği belirlenmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde üç versiyonun da tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO1'in bağımsız çözümlerde daha az sapma gösterdiği, SPRAO1'in benzer bir davranış sergilediği, NDSIIIRAO1'in ise daha fazla değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Çevresel etki bakımından üç versiyonun da bağımsız çözümler arasında sapmalar gösterdiği, ancak MSPRAO1'in diğerlerine göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Kalite açısından üç versiyonun da bağımsız çözümler arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde üç versiyonun da tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından SPRAO2 ve MSPRAO2'nin bağımsız çözümlerde daha az sapma gösterdiği, NDSIIIRAO2'nin ise daha fazla değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Çevresel etki bakımından MSPRAO2'nin diğer versiyonlara göre daha kararlı sonuçlar ürettiği

gözlemlenmiştir. Kalite açısından üç versiyonun da bağımsız çözümler arasında benzer düzeyde değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

MOSGO algoritması incelendiğinde, zaman kriterinde tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği görülmektedir. Çevresel etki bakımından da kararlı sonuçlar ürettiği, sadece bir çözümde sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Maliyet açısından bağımsız çözümler arasında sapmalar gösterirken, kalite bakımından kararlı sonuçlar elde ettiği belirlenmiştir. Özellikle WOA algoritması ile üretilen serilerin %37 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle MOSGO algoritmasına göre daha kararlı sonuçlar elde ettiği görülmüştür.



Şekil 97. 69 aktiviteli TCQETP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Tablo 141-144 arasında, her bir algoritmanın farklı versiyonlarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması verilmiştir. Her algoritmanın en yüksek hiper hacim değerine sahip bağımsız çözümünden elde edilen pareto çözümleri bu tablolarda sunulmuştur. Her tabloda yer alan on çözüm, farklı hedeflere yönelik optimize edilmiş sonuçları göstermektedir. İlk iki çözüm minimum zamanı, sonraki iki çözüm minimum maliyeti, beşinci ve altıncı çözümler maksimum kaliteyi, yedinci ve sekizinci çözümler minimum

çevresel etkiyi hedeflerken, son iki çözüm bu dört hedef arasında denge kuran çözümler olarak belirlenmiştir.

Tablo 141'de gösterilen 69 aktiviteli TCQETP problemi için üç farklı algoritmanın (SPGWO, MSPGWO ve NDSIIIGWO) pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. SPGWO algoritmasının 2., 4., 5. ve 6. pareto çözümleri diğer versiyonlar tarafından domine edilmiştir. Minimum maliyet ve maksimum kalite açısından MSPGWO algoritması diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. NDSIIIGWO algoritması ise genel olarak daha dengeli çözümler üretmiş, ancak minimum maliyet ve maksimum kalite hedeflerinde MSPGWO kadar başarılı olamamıştır.

Tablo 141. 69 aktiviteli TCQETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPGWO				MSPGWO				NDSIIIGWO			
Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
314	187789	91.59	8602.54	314	187789	91.59	8602.54	315	185976	92.34	8666.55
315	186645	90.55	8787.20	315	186645	90.55	8787.20	316	184892	92.41	8887.95
349	183460	92.18	9346.43	360	182312	92.62	9815.94	336	183621	93.44	9295.32
346	183655	93.13	9410.30	360	182323	92.20	9811.75	341	183710	93.20	9138.01
332	186158	94.64	9102.53	333	185265	95.06	9181.16	326	185313	94.79	8943.34
331	186257	94.50	8957.79	332	185469	94.93	9135.30	331	184150	94.61	9115.27
323	188732	90.26	8251.91	323	188732	90.26	8251.91	317	187055	90.06	8408.03
322	189133	90.27	8286.44	322	189133	90.27	8286.44	317	186746	91.95	8416.10
318	189325	90.51	8337.59	318	189325	90.51	8337.59	318	186775	92.40	8486.29
323	188732	90.26	8251.91	323	185025	93.05	9099.79	323	185527	92.75	8657.14

Tablo 142'de gösterilen 69 aktiviteli TCQETP problemi için WOA algoritmasının farklı versiyonlarının (SPWOA, MSPWOA ve NDSIIIWOA) pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Zaman ve çevresel etki açısından bakıldığında üç versiyonun da optimum sonuçlara ulaştığı görülmektedir. SPWOA algoritmasının 6. pareto çözümü ve NDSIIIWOA algoritmasının 2. pareto çözümü diğer versiyonlar tarafından domine edilmiştir. Minimum maliyet açısından MSPWOA algoritması diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Maksimum kalite hedefinde ise hem MSPWOA hem de NDSIIIWOA versiyonları benzer performans göstererek yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır.

Tablo 143'te, Rao-1 algoritmasının farklı versiyonlarının (SPRAO1, MSRAO1 ve NDSIIIRAO1) pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde üç versiyon da benzer performans göstermiştir. MSRAO1 algoritmasının 8. pareto çözümü diğer versiyonlar tarafından domine edilmiştir. Minimum maliyet ve çevresel etki

açısından SPRAO1 algoritması diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Maksimum kalite hedefinde ise MSRAO1 versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır.

Tablo 142. 69 aktiviteli TCQETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPWOA				MSPWOA				NDSIIIWOA			
Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
314	187350	87.40	8279.58	314	185546	89.35	8691.50	314	185704	88.22	8577.69
314	188367	86.62	8041.45	314	185715	88.39	8496.93	314	185797	88.35	8544.72
314	190882	85.76	7813.84	360	182265	92.63	9865.01	359	182324	92.83	9771.23
314	190691	85.98	7830.88	357	182451	92.57	9819.43	360	182351	92.96	9784.09
331	186297	95.80	9052.48	330	186335	95.90	8993.76	330	186335	95.90	8993.76
330	186737	95.74	8983.02	329	186428	95.78	8966.98	342	186017	95.65	9039.64
314	190882	85.76	7813.84	314	190882	85.76	7813.84	314	190882	85.76	7813.84
314	190691	85.98	7830.88	314	190789	85.95	7822.47	314	189418	86.15	7894.84
318	187059	87.67	8431.59	318	184530	91.68	9391.99	318	184575	91.85	9146.12
323	187288	92.41	8626.00	323	183858	92.95	9370.65	323	186961	89.94	8450.33

Tablo 143. 69 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPRAO1				MSRAO1				NDSIIIRAO1			
Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
314	190006	86.28	7866.93	314	186749	87.90	8356.65	314	184428	90.52	9139.89
314	190256	87.86	8085.65	314	188056	89.07	8482.66	314	185157	90.35	8826.01
360	182265	92.63	9865.01	360	182299	92.73	9847.41	347	182543	92.18	9761.71
354	182446	92.84	9834.93	360	182373	92.61	9832.46	352	182784	91.84	9492.76
347	183940	93.84	9594.52	352	184693	94.39	9418.59	327	185063	94.12	9158.44
347	183781	93.79	9487.76	340	185122	94.22	9289.38	332	184964	94.11	9316.24
314	190882	85.76	7813.84	314	190842	85.89	7825.58	314	190471	86.72	7918.67
314	190275	86.14	7832.74	314	190820	85.79	7856.18	315	190418	87.06	7945.03
318	188719	88.42	8091.57	318	189182	86.85	7983.87	318	187777	88.57	8381.74
323	188487	87.35	8077.81	323	188576	87.22	8047.36	323	189719	88.44	8093.05

Tablo 144'te, Rao-2 algoritmasının farklı versiyonlarının (SPRAO2, MSRAO2 ve NDSIIIRAO2) pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde üç versiyon da benzer performans göstermiştir. Minimum maliyet ve çevresel etki açısından SPRAO2 algoritması diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Maksimum kalite açısından MSP ile geliştirilen versiyonun daha yüksek bir değer elde ettiği tespit edilmiştir.

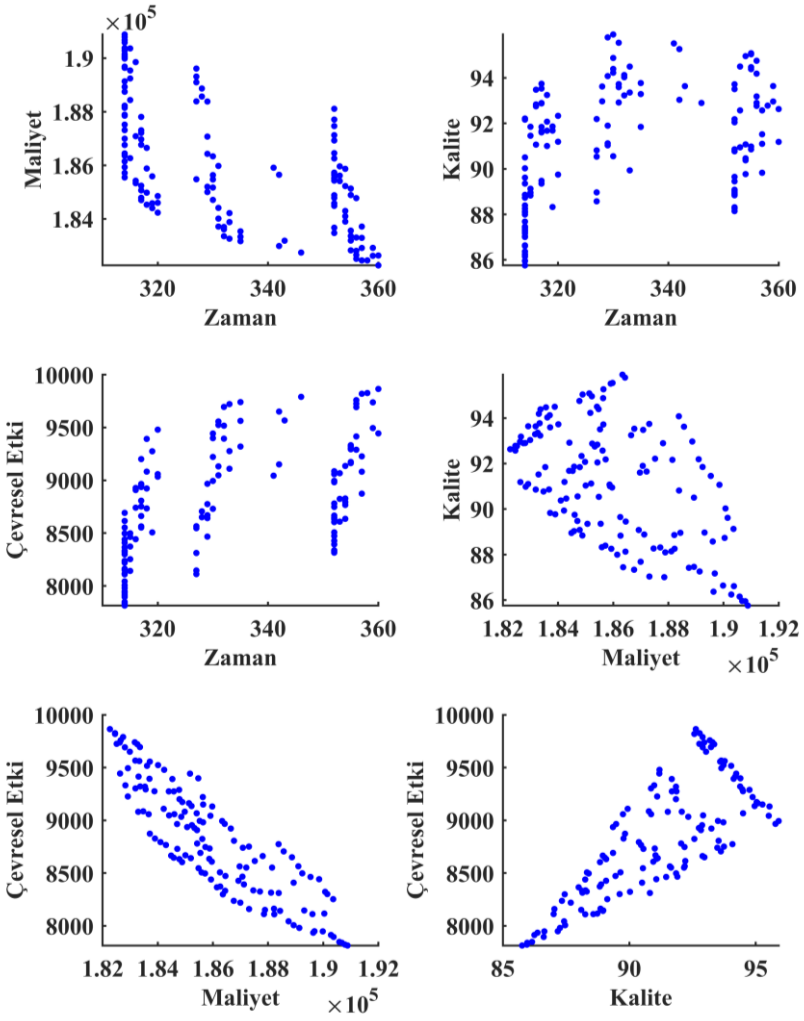
Tablo 144. 69 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPRAO2				MSRAO2				NDSIIIRAO2			
Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
314	189743	88.02	8256.78	314	187472	86.95	8254.76	314	184238	90.81	9298.60
314	190042	85.97	7874.46	314	187497	89.04	8373.62	314	185081	90.92	9075.62
360	182265	92.63	9865.01	360	182285	92.47	9859.42	356	182530	93.20	9605.22
360	182355	92.33	9698.70	360	182502	92.43	9788.33	347	182564	91.75	9623.46
340	184299	93.25	9618.75	356	184933	94.09	9398.75	344	184092	93.42	9517.98
350	183446	93.12	9448.69	356	184783	93.95	9536.73	333	185371	93.38	9301.91
314	190882	85.76	7813.84	314	190859	85.86	7832.37	314	190875	85.68	7823.74
314	190480	85.93	7824.58	314	190776	86.03	7841.69	327	190330	86.62	7931.28
318	187823	90.58	8733.72	318	189428	89.10	8257.74	318	186547	87.98	8497.47
323	186925	87.57	8318.98	323	188618	89.87	8317.77	323	189276	86.69	8009.28

Bir sonraki bölümde, performans metrikleri açısından literatürdeki algoritmalara göre MSPWOA algoritmasının daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Literatürde Huynh vd. (2021) ve Son ve Khoi (2023b) çalışmalarında kullanılan algoritmalar için en iyi bağımsız çözüm yerine tüm çözümler arasından elde edilen en iyi sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 144'te MSPWOA algoritmasına ait en yüksek HV değerine sahip pareto çözümü ile literatürdeki MOSGO ve SMAOTM algoritmaları sonuçları kıyaslanmıştır. Çözümler incelendiğinde, MSPWOA algoritmasının %37 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile MOSGO ve SMAOTM algoritmasına göre daha iyi kalite ve çevresel etki değeri elde ettiği görülmektedir. Tablo 146'da, MSPWOA algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait pareto çözümleri opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 98'de pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 145. 69 aktiviteli TCQETP problemi için MSPWOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin, literatürdeki algoritmaların pareto çözümleriyle karşılaştırılması

MOSGO(2021)				SMAOTM(2023)				MSPWOA			
Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E	Z	M	K	Ç.E
314	190023	86.33	7845.17	314	190060	86.32	7881.62	314	185546	89.35	8691.50
314	190062	86.32	7881.55	314	190803	85.96	7852	314	185715	88.39	8496.93
360	182265	92.63	9865.01	345	183913	91.74	9264.12	360	182265	92.63	9865.01
360	182293	92.71	9849.69	326	184205	91.46	9113.94	357	182451	92.57	9819.43
338	184564	94.69	9389.09	342	185254	93.68	9010.57	330	186335	95.90	8993.76
341	185177	94.58	9288.49	335	186439	93.62	9081.10	329	186428	95.78	8966.98
314	190881	85.95	7816.51	314	190859	85.94	7814.15	314	190882	85.76	7813.84
314	190871	86.20	7818.59	314	190871	86.20	7818.59	314	190789	85.95	7822.47
318	188124	90.00	8308.74	317	187914	90.10	8686.14	318	184530	91.68	9391.99
323	185840	90.73	8657.87	326	187250	90.31	8496.30	323	183858	92.95	9370.65



Şekil 98. MSPWOA tarafından üretilmiş 69 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki pareto grafiği

Tablo 146. 69 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	Ç.E
Minimum Zaman	1	1,1,3,1,1,2,3,1,1,3,1,1,3,2,1,3,3,3,2,1,1,2,1, 2,1,3,3,1,3,3,3,3,3,1,3,1,3,1,3,1,3,3,3,3,3,3,1, 3,1,2,1,1,1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1	314	185546	89.35	8691.50
Minimum Maliyet	2	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	360	182265	92.63	9865.01
Maksimum Kalite	3	1,1,2,2,1,2,2,1,2,2,2,1,2,2,2,2,2,2,1,1,2,1, 2,1,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2, 2,2,2,2,2,2,2,2,1,2,2,2,1,2,2,2,2,1,2,2,2,2,2	330	186335	95.90	8993.76
Minimum Çevresel Etki	4	1,1,3,3,1,2,3,1,3,3,3,1,3,2,3,3,3,3,2,1,1,2,1, 2,1,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3, 3,3,3,3,3,3,3,3,1,3,3,3,1,3,3,3,3,1,3,3,3,3,3	314	190882	85.76	7813.84

3.6.4. 69 Aktivite TCQETP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 147'de 69 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

MOSGO algoritmasının GWO versiyonları ile karşılaştırması incelendiğinde, NDSIIIGWO çözümlerinin %0.16'sını domine ederken, NDSIIIGWO tarafından %31 oranında domine edilmiştir. SP ile geliştirilen GWO versiyonunda MOSGO çözümlerin %39'unu domine ederken, SPGWO tarafından %2 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen GWO versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %16'sını domine ederken, MSPGWO tarafından %10 oranında domine edilmiştir.

WOA algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, MOSGO algoritması NDSIIIWOA'nın %3'ünü domine ederken, NDSIIIWOA tarafından %21 oranında domine edilmiştir. SP ile geliştirilen WOA versiyonunda MOSGO çözümlerin %19'unu domine ederken, SPWOA tarafından %8 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen WOA versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %13'ünü domine ederken, MSPWOA tarafından %11 oranında domine edilmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MOSGO algoritması NDSIIIRAO1'in %23'ünü domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %1 oranında domine edilmiştir. SPRAO1 ile karşılaştırıldığında MOSGO çözümlerin %54'ünü domine ederken, SPRAO1 tarafından %1 oranında domine edilmiştir. MSPRAO1 versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %28'ini domine ederken, MSPRAO1 tarafından %3 oranında domine edilmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, MOSGO algoritması NDSIIIRAO2'nin %35'ini domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %0,2 oranında domine edilmiştir. SPRAO2 ile karşılaştırıldığında MOSGO çözümlerin %63'ünü domine ederken, SPRAO2 tarafından %0,2 oranında domine edilmiştir. MSPRAO2 versiyonunda ise MOSGO çözümlerin %41'ini domine ederken, MSPRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, MOSGO algoritmasının özellikle SP ve MSP operatörleri ile geliştirilen versiyonlara karşı daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların, özellikle NDSIIIGWO (%31) ve NDSIIIWOA (%21) algoritmalarının MOSGO'ya karşı daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

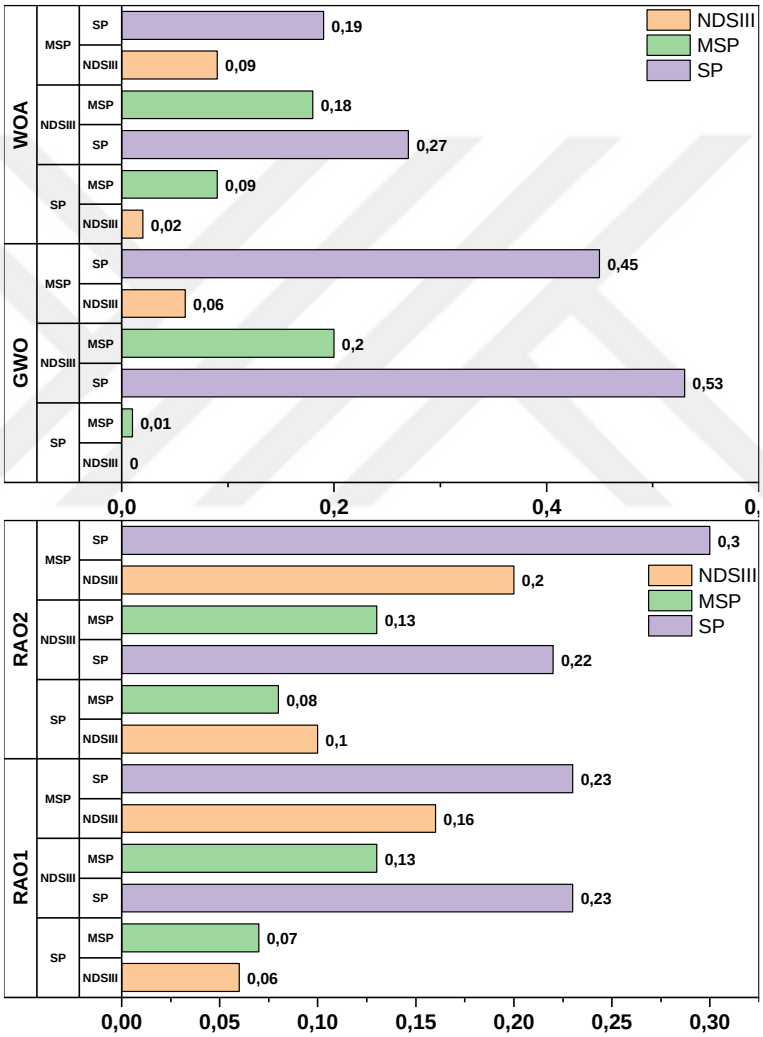
Tablo 147. 69 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, MOSGO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MOSGO, NDSIIIGWO)	0,0179	0,0000	0,0016	0,0033
C(NDSIIIGWO, MOSGO)	0,3800	0,2400	0,3169	0,0335
C(MOSGO, SPGWO)	0,5726	0,2258	0,3905	0,0771
C(SPGWO, MOSGO)	0,0650	0,0000	0,0235	0,0165
C(MOSGO, MSPGWO)	0,4345	0,0476	0,1648	0,0764
C(MSPGWO, MOSGO)	0,1800	0,0150	0,1005	0,0330
C(MOSGO, NDSIIIWOA)	0,1488	0,0000	0,0359	0,0210
C(NDSIIIWOA, MOSGO)	0,3200	0,0750	0,2162	0,0540
C(MOSGO, SPWOA)	0,4274	0,0645	0,1927	0,0681
C(SPWOA, MOSGO)	0,1500	0,0150	0,0801	0,0339
C(MOSGO, MSPWOA)	0,2262	0,0595	0,1309	0,0352
C(MSPWOA, MOSGO)	0,2500	0,0200	0,1194	0,0494
C(MOSGO, NDSIIIRAO1)	0,3929	0,0893	0,2394	0,0631
C(NDSIIIRAO1, MOSGO)	0,0450	0,0000	0,0147	0,0114
C(MOSGO, SPRAO1)	0,6774	0,3710	0,5402	0,0612
C(SPRAO1, MOSGO)	0,0500	0,0000	0,0101	0,0090
C(MOSGO, MSPRAO1)	0,4762	0,1548	0,2876	0,0586
C(MSPRAO1, MOSGO)	0,1000	0,0000	0,0353	0,0212
C(MOSGO, NDSIIIRAO2)	0,5179	0,2262	0,3592	0,0454
C(NDSIIIRAO2, MOSGO)	0,0150	0,0000	0,0028	0,0039
C(MOSGO, SPRAO2)	0,7581	0,4677	0,6323	0,0465
C(SPRAO2, MOSGO)	0,0150	0,0000	0,0020	0,0032
C(MOSGO, MSPRAO2)	0,5833	0,2679	0,4113	0,0653
C(MSPRAO2, MOSGO)	0,0500	0,0000	0,0114	0,0112

Şekil 99'da, SP,MSP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak oluşturulan algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin kendi içlerinde karşılaştırması sunulmaktadır. Tüm algoritmalara bakıldığında SP ile geliştirilen yöntemin diğer algoritmalara göre oldukça geri kaldığı görülmektedir. Gri kurt ve balina algoritması incelendiğinde en iyi operatörün NDSIII ile geliştirilen algoritma olduğu görülmektedir. Rao serileri incelendiğinde ise MSP ile geliştirilen algoritmaların, NDSIII ile geliştirilen algoritmalara göre daha baskın olduğu görülmüştür.

Şekil 100'de, 69 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir. NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, NDSIIIWOA'nın %16'sını, MSPRAO1'in %39'unu ve MSPRAO2'nin %40'ını domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması NDSIIIWOA tarafından %1, MSPRAO1 tarafından %0 ve MSPRAO2 tarafından %0 oranında domine edilmiştir.

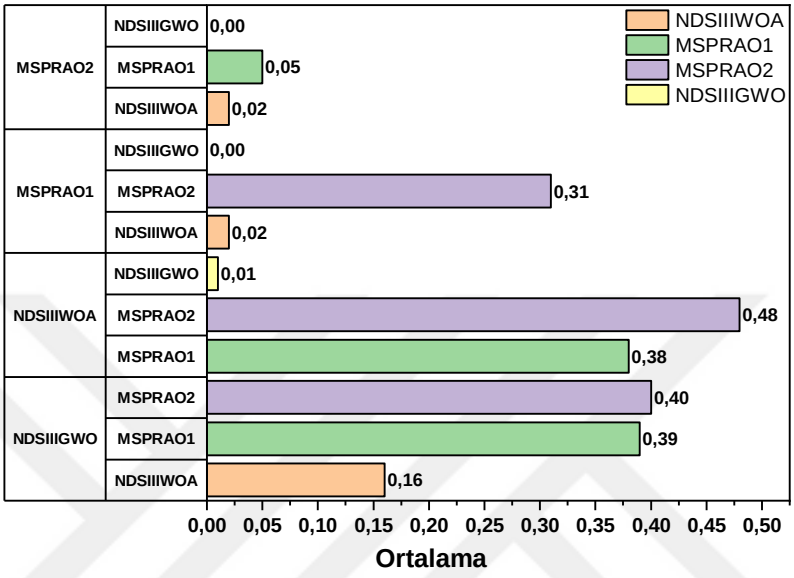
NDSIIIWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, MSPRAO1'in %38'ini ve MSPRAO2'nin %48'ini domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, NDSIIIWOA algoritması MSPRAO1 tarafından %2 ve MSPRAO2 tarafından %2 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen Rao-1 versiyonu incelendiğinde, NDSIIIWOA'nın %2'sini, MSPRAO2'nin %31'ini domine ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, MSPRAO1 algoritması MSPRAO2 tarafından %5, NDSIIIWOA tarafından %38 oranında domine edilmiştir.



Şekil 99. 69 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

Genel olarak değerlendirildiğinde, NDSIIIGWO ve NDSIIIWOA algoritmalarının diğer versiyonlara göre daha üstün performans sergilediği görülmektedir. NDSIIIWOA'nın MSPRAO2'yi %48 ve MSPRAO1'i %38 oranında domine etmesi, aynı şekilde

NDSIIIGWO'nun MSPRAO2'yi %40 ve MSPRAO1'i %39 oranında domine etmesi, her iki algoritmanın da başarılı performansını göstermektedir. Ayrıca, her iki algoritmanın da diğer versiyonlar tarafından çok düşük oranlarda (%0-2) domine edilmesi, bu algoritmaların güçlü performansını desteklemektedir.



Şekil 100. 69 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Algoritmaların performans değerlendirmesinde yalnızca C-metrik ölçütüne bağlı kalmak yanıltıcı olabilir. Çünkü çözümler belirli bir bölgede yoğunlaşarak sayısal üstünlük sağlayabilir. Bu nedenle, algoritmaların Pareto uzayındaki dağılımı, çeşitliliği ve kapsadığı alanın büyüklüğünün de incelenmesi gerektiği önceki bölümlerde vurgulanmaktadır. Böylece algoritmaların optimizasyon kabiliyetleri daha objektif şekilde karşılaştırılabilmektedir.

Tablo 148'de hiper hacim ve yayılım, Tablo 149'da ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 148. 69 aktivite TCQETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOSGO	0,9006	0,8775	0,8856	0,0071	0,5397	0,7237	0,6481	0,0337
MSPGWO	0,8831	0,8086	0,8509	0,0236	0,5397	0,6437	0,5881	0,0337
NDSIIIGWO	0,8076	0,6532	0,7734	0,0448	0,9179	1,0217	0,9793	0,0322
SPGWO	0,8080	0,7695	0,7821	0,0136	0,1636	0,5150	0,2342	0,1080
MSPWOA	0,9320	0,9124	0,9244	0,0061	0,5501	0,8133	0,6241	0,0426
NDSIIIWOA	0,9355	0,9193	0,9294	0,0048	0,7045	0,9028	0,8034	0,0509
SPWOA	0,9045	0,8617	0,8716	0,0097	0,1152	0,1528	0,1361	0,0106
MSPRAO1	0,8655	0,8393	0,8523	0,0074	0,3488	0,4470	0,4049	0,0322
NDSIIIRAO1	0,8629	0,8373	0,8481	0,0087	0,4801	1,1294	0,5813	0,1945
SPRAO1	0,8041	0,7806	0,7944	0,0065	0,1124	0,1562	0,1297	0,0134
MSPRAO2	0,8302	0,8067	0,8185	0,0068	0,3575	0,4628	0,3957	0,0319
NDSIIIRAO2	0,8064	0,7990	0,8033	0,0027	0,4727	0,5571	0,5164	0,0259
SPRAO2	0,7704	0,7470	0,7589	0,0067	0,1000	0,1505	0,1250	0,0137

Tablo 149. 69 aktivite TCQETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOSGO	0,7439	0,7968	0,7799	0,0171
MSPGWO	0,7044	0,7951	0,7679	0,0286
NDSIIIGWO	0,5195	0,5407	0,5308	0,0068
SPGWO	0,7129	0,8155	0,7843	0,0303
MSPWOA	0,8234	0,8855	0,849	0,0206
NDSIIIWOA	0,712	0,7604	0,737	0,0167
SPWOA	0,7884	0,829	0,8086	0,0142
MSPRAO1	0,8279	0,8746	0,85	0,0164
NDSIIIRAO1	0,7689	0,793	0,7832	0,008
SPRAO1	0,8282	0,8593	0,8416	0,0104
MSPRAO2	0,8608	0,909	0,8811	0,0146
NDSIIIRAO2	0,8085	0,8471	0,8315	0,011
SPRAO2	0,8656	0,8974	0,8833	0,0095

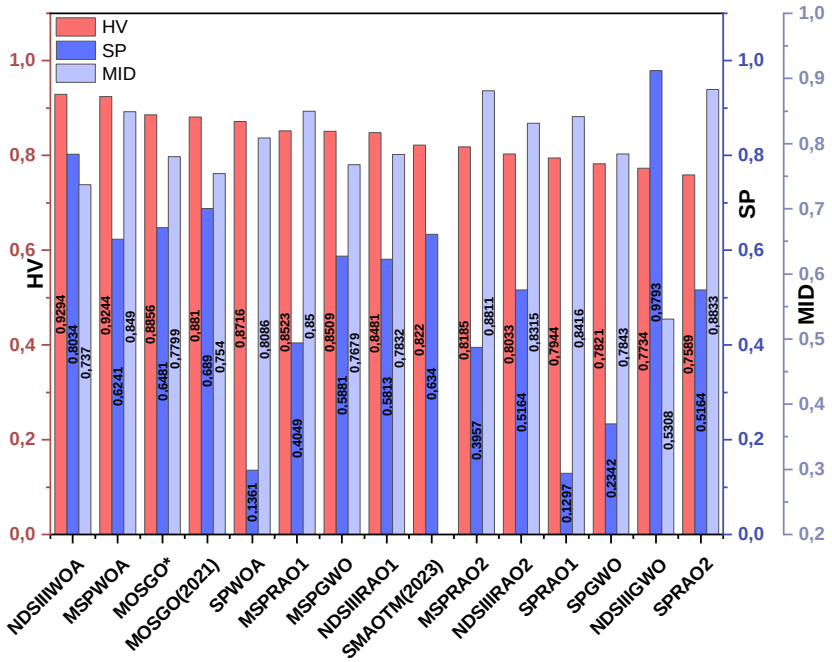
Tablo 150'de performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmakta ve Şekil 101'de grafiksel olarak sunulmaktadır. NDSIIWOA algoritmasının ürettiği HV değerleri incelendiğinde, 69 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemi için geliştirilen bu algoritmanın diğer yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir.

Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPWOA algoritması (0.1361) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO

algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.5308) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir. NDSIIIWOA ve MSPWOA algoritması MOSGO algoritmasına göre %37 daha az fonksiyon değerlendirmesine rağmen performans metrikleri açısından daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Tablo 150. 69 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

Algoritmalar	NFE	HV	SP	MID
NDSIIIWOA	50400	0,9294	0,8034	0,7370
MSPWOA	50400	0,9244	0,6241	0,8490
MOSGO*	80000	0,8856	0,6481	0,7799
MOSGO (2021)	80000	0,8810	0,6890	0,7540
SPWOA	50400	0,8716	0,1361	0,8086
MSPRAO1	50400	0,8523	0,4049	0,8500
MSPGWO	50400	0,8509	0,5881	0,7679
NDSIIIRAO1	50400	0,8481	0,5813	0,7832
SMAOTM(2023)	30000	0,8220	0,6340	-
MSPRAO2	50400	0,8185	0,3957	0,8811
NDSIIIRAO2	50400	0,8033	0,5164	0,8315
SPRAO1	50400	0,7944	0,1297	0,8416
SPGWO	50400	0,7821	0,2342	0,7843
NDSIIIGWO	50400	0,7734	0,9793	0,5308
SPRAO2	50400	0,7589	0,5164	0,8833
*Bu Çalışma				



Şekil 101. 69 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.6.5. 290 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Ödünleşim Problemi

Çok amaçlı optimizasyonda kullanılan operatörlerin küçük ve orta ölçekli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemlerinin yanı sıra büyük ölçekli inşaat projelerine olan etkisini incelemek amacıyla, Tablo 129'da opsiyonları ile verilen 29 aktiviteli zaman-maliyet- kalite-çevresel etki problemi, 10 kat artırılarak 290 aktiviteli TCQETP problemine dönüştürülmüştür. 290 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi, toplamda 1,4873E+99 farklı proje tamamlanma kombinasyonu içermektedir. Tüm algoritmalar 88 popülasyon, 300 iterasyon ile çözülmüştür.

Şekil 102'de, 290 aktiviteli problemin on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, çevresel etki, maliyet ve maksimum kalite değerleri karşılaştırılmıştır. Gri kurt algoritması versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde MSPGWO'nun diğer versiyonlara göre daha kararlı sonuçlar ürettiği, SPGWO ve NDSIIWOA'nın ise daha fazla değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Maliyet açısından üç versiyonun da bağımsız çözümler arasında değişkenlik gösterdiği, ancak MSPGWO'nun diğerlerine göre daha kararlı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Çevresel etki bakımından üç versiyonun da bağımsız çözümler arasında sapmalar gösterdiği gözlemlenmiştir. Kalite açısından NDSIIGWO'nun diğer versiyonlara göre daha yüksek ve kararlı sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

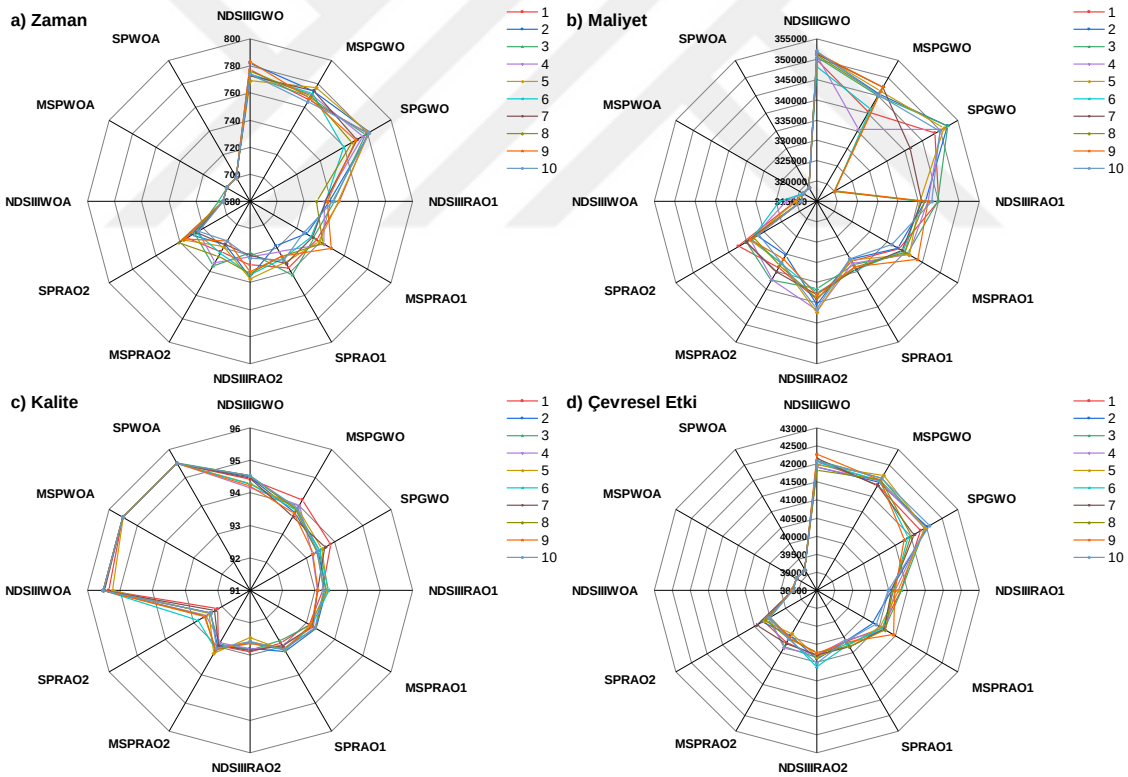
Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPWOA ve SPWOA'nın tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, NDSIIWOA'nın da benzer şekilde kararlı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Çevresel etki açısından üç versiyonun da tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği tespit edilmiştir. Maliyet açısından MSPWOA ve SPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, NDSIIWOA'nın bazı çözümlerde optimumdan sapma gösterdiği gözlemlenmiştir. Kalite açısından SPWOA tüm bağımsız çözümlerde maksimum kaliteyi elde ederken, MSPWOA ve NDSIIWOA'nın da yüksek kalite değerleri ürettiği belirlenmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPRAO1 ve SPRAO1'in birbirine yakın sonuçlar ürettiği, NDSIIIRAO1'in ise daha yüksek değerler elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından SPRAO1'in bağımsız çözümlerde daha kararlı sonuçlar ürettiği, MSPRAO1'in benzer bir davranış sergilediği, NDSIIIRAO1'in ise daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Çevresel etki bakımından SPRAO1'in diğer

versiyonlara göre daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Kalite açısından NDSIIIRAO1'in diğer versiyonlara göre daha yüksek değerler ürettiği belirlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde MSPRAO2'nin daha düşük değerler elde ettiği, diğer versiyonların benzer bir aralıkta sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO2 ve SPRAO2'nin daha kararlı sonuçlar ürettiği, NDSIIIRAO2'nin ise daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Çevresel etki bakımından MSPRAO2'nin diğer versiyonlara göre daha kararlı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Kalite açısından MSPRAO2'nin diğer versiyonlara göre daha yüksek değerler elde ettiği belirlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, WOA algoritması ve versiyonlarının diğer algoritmalara göre daha kararlı sonuçlar ürettiği ve optimum değerlere daha sık ulaştığı görülmektedir.



Şekil 102. 290 aktiviteli TCQETP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Tablo 151-153 arasında, her bir algoritmanın farklı versiyonlarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması verilmiştir. Her algoritmanın en yüksek hiper hacim değerine sahip bağımsız çözümünden elde edilen pareto çözümleri bu tablolarda sunulmuştur. Her

tabloda yer alan on çözüm, farklı hedeflere yönelik optimize edilmiş sonuçları göstermektedir. İlk iki çözüm minimum zamanı, sonraki iki çözüm minimum maliyeti, beşinci ve altıncı çözümler maksimum kaliteyi, yedinci ve sekizinci çözümler minimum çevresel etkiyi hedeflerken, son iki çözüm bu dört hedef arasında denge kuran çözümler olarak belirlenmiştir.

Tablo 151'de, GWO algoritmasının farklı versiyonlarının (SPGWO, MSPGWO ve NDSIIIGWO) 290 aktiviteli TCQETP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Tüm versiyonların ürettiği pareto çözümleri incelendiğinde versiyonların birbirine göre baskınlık sağlayamadığı görülmüştür. Minimum hedeflere ulaşma açısından, zaman ve maliyet hedefinde SPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Maksimum kalite hedefinde NDSIIIGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum çevresel etki açısından incelendiğinde SPGWO algoritması, 7. ve 8. çözümlerde diğer versiyonlara kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 151. 290 aktiviteli TCQETP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPGWO				MSPGWO				NDSIIIGWO			
Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E
760	381690	90.78	41406.02	767	371160	91.51	42208.56	776	373170	93.00	42461.69
764	379810	91.12	41576.19	768	370620	91.97	42301.12	776	365910	92.20	42746.06
924	320090	92.74	45236.32	855	340360	93.42	44361.34	836	351050	93.64	43536.18
923	320580	92.76	45223.07	860	340670	93.24	44295.03	831	353110	93.48	43509.93
848	349860	93.48	43719.52	837	350480	94.22	43842.22	803	364150	94.52	43228.03
888	332650	93.36	44685.83	805	358420	93.79	43582.49	815	357920	94.47	43534.84
760	381690	90.78	41406.02	804	370880	91.44	41865.08	790	373410	91.61	41813.51
764	380940	90.90	41459.98	800	371090	91.32	42027.74	824	371570	91.55	41992.78
809	360220	92.24	43165.16	808	367940	91.70	42171.18	809	364530	93.47	42729.72
810	366240	91.81	42304.50	810	355320	93.13	43190.39	810	364700	94.11	43022.51

Tablo 152'de, WOA algoritmasının farklı versiyonlarının (SPWOA, MSPWOA ve NDSIIIWOA) 290 aktiviteli TCQETP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde üç versiyon da benzer performans göstermiştir. Minimum maliyet açısından algoritmalar benzer sonuçlar üretirken, maksimum kalite hedefinde NDSIIIWOA versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Çevresel etki açısından incelendiğinde üç versiyonun da birbirine yakın performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Tablo 154'te, Rao-1 algoritmasının farklı versiyonlarının (SPRAO1, MSRAO1 ve NDSIIIRAO1) 290 aktiviteli TCQETP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde SPRAO1 versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet açısından da SPRAO1 algoritması diğer versiyonlara göre daha başarılı olmuştur. Maksimum kalite hedefinde ise MSRAO1 ve NDSIIIRAO1 versiyonları benzer performans göstererek daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum çevresel etki açısından incelendiğinde SPRAO1 algoritması diğer versiyonlara kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 152. 290 aktiviteli TCQETP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPWOA				MSPWOA				NDSIIIWOA			
Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E
700	408400	87.82	39156.90	700	408400	87.82	39156.90	700	408400	87.82	39156.90
704	406620	88.21	39364.46	704	406500	88.18	39301.08	701	406720	88.25	39376.83
930	318900	92.66	45336.40	930	318900	92.66	45336.40	930	318900	92.66	45336.40
928	320160	92.77	45289.62	927	320350	92.76	45252.30	928	321210	92.79	45235.46
790	370600	95.52	43229.70	790	370600	95.52	43229.70	790	370600	95.52	43229.70
792	369340	95.41	43276.48	814	365050	95.25	43502.29	813	366730	95.33	43329.59
700	408400	87.82	39156.90	700	408400	87.82	39156.90	700	408400	87.82	39156.90
704	406620	88.21	39364.46	704	406500	88.18	39301.08	701	406720	88.25	39376.83
807	363030	94.38	43472.84	808	361850	89.63	41891.04	800	367190	95.31	43371.42
812	358760	90.38	42662.03	810	348080	90.66	43441.72	813	366730	95.33	43329.59

Tablo 153. 290 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

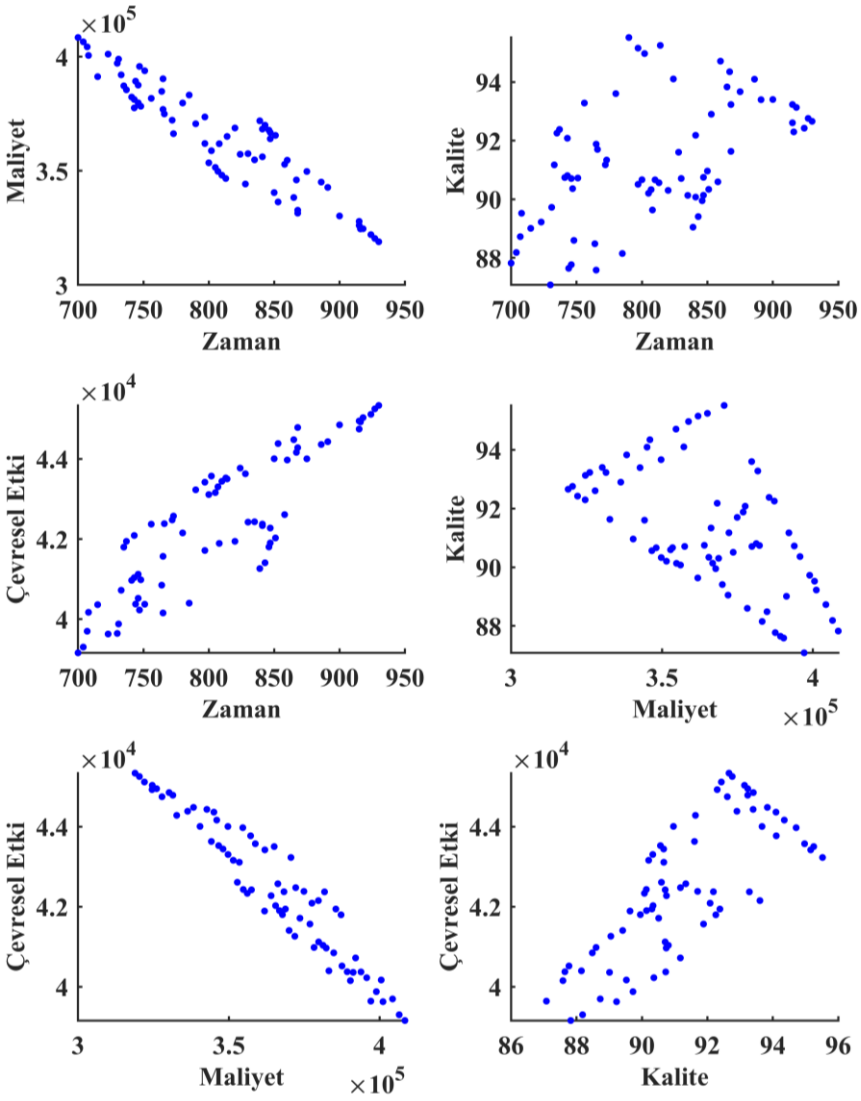
SPRAO1				MSPRAO1				NDSIIIRAO1			
Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E
723	396810	88.57	40086.26	726	384080	89.71	40986.14	729	388820	89.11	40602.44
725	395600	88.77	40171.14	727	386110	89.57	40839.28	739	383910	89.36	40864.97
890	332620	92.06	44403.57	896	336330	92.05	44250.48	902	341560	91.78	43702.80
884	333750	92.13	44331.53	891	338620	92.15	44139.62	882	341560	93.28	44107.77
836	350440	92.95	43689.41	807	362230	93.30	43215.52	827	355370	93.30	43520.82
817	356820	92.86	43539.54	809	361760	93.08	43330.16	882	341560	93.28	44107.77
723	396810	88.57	40086.26	750	388560	88.88	40397.61	729	388820	89.11	40602.44
735	394470	88.73	40150.43	750	388070	88.68	40441.12	761	386110	89.53	40762.49
809	359770	92.62	43153.94	809	361760	93.08	43330.16	808	356160	92.90	43357.82
813	354440	92.62	43728.87	812	368430	90.11	41750.62	813	378090	90.13	41093.07

Tablo 153’te, Rao-2 algoritmasının farklı versiyonlarının (SPRAO2, MSPRAO2 ve NDSIIIRAO2) 290 aktiviteli TCQETP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde NDSIIIRAO2 versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet açısından MSPRAO2 algoritması diğer versiyonlara göre daha başarılı olmuştur. Maksimum kalite hedefinde NDSIIIRAO2 versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum çevresel etki açısından incelendiğinde MSPRAO2 algoritması diğer versiyonlara kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 154. 290 aktiviteli TCQETP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPRAO2				MSPRAO2				NDSIIIRAO2			
Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E	Z.	M.	K.	Ç.E
726	391460	88.85	40524.40	719	388600	88.82	40476.22	718	389540	88.63	40483.86
728	389820	89.19	40707.61	726	381060	90.00	41345.64	718	390480	88.62	40363.61
885	333640	92.23	44442.05	902	332640	92.07	44488.41	895	336560	92.63	44219.90
891	334560	92.14	44189.20	901	332720	92.06	44492.42	892	336880	92.57	44193.56
854	345130	92.85	44095.21	834	349970	93.24	43723.78	832	350100	92.84	43631.23
847	350260	92.83	43753.72	873	347150	92.62	43948.35	841	344820	92.73	43992.02
743	393850	88.25	39991.88	727	395550	88.30	39881.11	718	390480	88.62	40363.61
729	392270	88.81	40337.58	729	394960	88.43	39939.46	718	389540	88.63	40483.86
809	371940	90.35	41524.47	808	374980	90.94	41537.80	809	364710	90.73	42212.14
810	364740	90.52	41885.65	811	351650	92.38	43571.70	819	361960	92.20	42778.06

Ürettiği Pareto çözümlerinin uç noktaları bulma kabiliyeti, çözüm uzayında daha iyi dağılması ve kaliteli çözümler üretmesi nedeniyle, performans ölçütlerinde en iyi ortalama HV değerini sağlayan MSPWOA algoritması, 290 aktivite TCQETP problemi için diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Tablo 155’te, MSPWOA algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait Pareto çözümleri ve kullandığı opsiyonlar sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 103’te pareto çözümlerinin grafiksel dağılımını göstermektedir.



Şekil 103. MSPWOA tarafından üretilmiş 290 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki pareto grafiği

Tablo 155. 290 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	Ç.E
Minimum Zaman ve Çevresel etki	1	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,3,2,3,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,3,2,3,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,3,2,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,3,2,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,3,2,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,3,1	700	408400	87.82	39156.90

Tablo 155'in devamı

Minimum Maliyet	3	1,1,1,

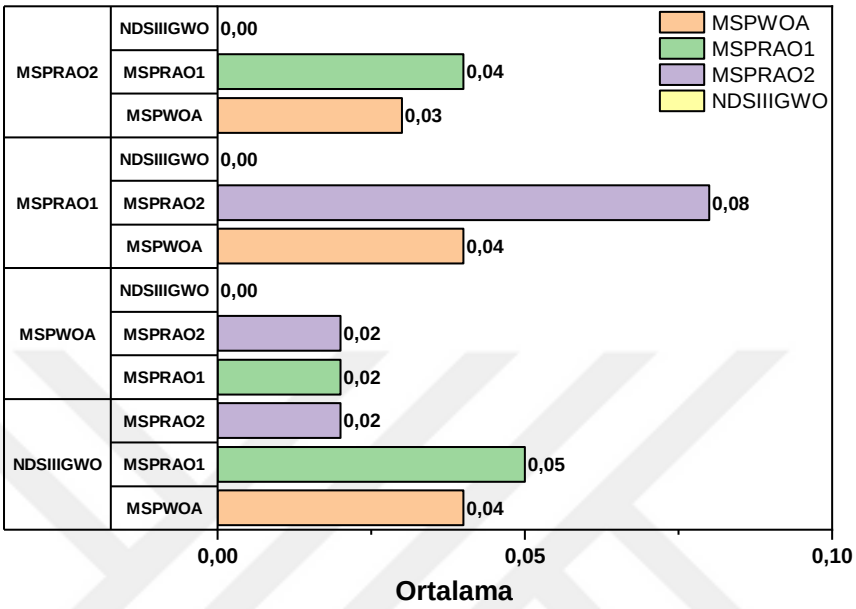
104’te, 290 aktiviteli TCQETP için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümün sonucunda elde edilen pareto baskınlığı karşılaştırması (C-metrik) gösterilmektedir.

Tablo 156. 290 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(SPGWO,NDSIIIGWO)	0,0341	0,0000	0,0040	0,0073
C(NDSIIIGWO, SPGWO)	0,4432	0,0341	0,1732	0,0946
C(SPGWO, MSPGWO)	0,1818	0,0000	0,0216	0,0328
C(MSPGWO, SPGWO)	0,3523	0,0000	0,1076	0,0717
C(MSPGWO, NDSIIIGWO)	0,1364	0,0000	0,0120	0,0229
C(NDSIIIGWO, MSPGWO)	0,4205	0,0000	0,1616	0,1018
C(SPWOA,NDSIIIWOA)	0,0909	0,0000	0,0127	0,0199
C(NDSIIIWOA, SPWOA)	0,0682	0,0000	0,0180	0,0144
C(SPWOA, MSPWOA)	0,1023	0,0000	0,0305	0,0220
C(MSPWOA, SPWOA)	0,1250	0,0000	0,0474	0,0302
C(MSPWOA, NDSIIIWOA)	0,1591	0,0000	0,0319	0,0328
C(NDSIIIWOA, MSPWOA)	0,0682	0,0000	0,0234	0,0188
C(SPRAO1,NDSIIIRAO1)	0,1136	0,0000	0,0407	0,0282
C(NDSIIIRAO1, SPRAO1)	0,1364	0,0000	0,0359	0,0297
C(SPRAO1, MSPRAO1)	0,1364	0,0000	0,0370	0,0265
C(MSPRAO1, SPRAO1)	0,1250	0,0000	0,0432	0,0260
C(MSPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,1705	0,0000	0,0543	0,0292
C(NDSIIIRAO1, MSPRAO1)	0,1591	0,0000	0,0390	0,0276
C(SPRAO2,NDSIIIRAO2)	0,2614	0,0000	0,0819	0,0426
C(NDSIIIRAO2, SPRAO2)	0,1136	0,0000	0,0530	0,0270
C(SPRAO2, MSPRAO2)	0,1705	0,0000	0,0506	0,0354
C(MSPRAO2, SPRAO2)	0,1818	0,0114	0,0814	0,0454
C(MSPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,1705	0,0000	0,0561	0,0386
C(NDSIIIRAO2, MSPRAO2)	0,1477	0,0000	0,0282	0,0316

NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, MSPWOA’nın %4’ünü, MSPRAO1’in %5’ini ve MSPRAO2’nin %2’sini domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması diğer algoritmaların hiçbiri tarafından domine edilememiştir (%0). MSP ile geliştirilen WOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, MSPRAO1’in %2’sini ve MSPRAO2’nin %2’sini domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, MSPWOA algoritması MSPRAO1 tarafından %4 ve MSPRAO2 tarafından %3 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen Rao-1 versiyonu incelendiğinde, MSPWOA’nın %4’ünü ve MSPRAO2’nin %8’ini domine ettiği

görülmüştür. Bununla birlikte, MSPRAO1 algoritması MSPRAO2 tarafından %4 domine edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm algoritmaların birbirlerine karşı oldukça düşük baskınlık oranlarına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 104. 290 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Her algoritma için yapılan 10 bağımsız çözümün performans metrikleri, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe değerleri olarak Tablo 157 ve Tablo 158'de sunulmaktadır.

Tablo 157. 290 aktivite TCQETP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MSPGWO	0,6111	0,5502	0,5745	0,0202	0,8600	0,9474	0,9163	0,0250
NDSIIIGWO	0,5724	0,5266	0,5591	0,0134	0,9760	1,0074	0,9877	0,0103
SPGWO	0,6424	0,5090	0,5626	0,0524	0,5296	0,8723	0,7545	0,1431
MSPWOA	0,9006	0,8888	0,8963	0,0039	0,4929	0,7818	0,6504	0,0989
NDSIIIWOA	0,8860	0,8545	0,8654	0,0121	0,9002	1,1975	1,0956	0,0819
SPWOA	0,8847	0,8721	0,8777	0,0038	0,0860	0,1413	0,1130	0,0190
MSPRAO1	0,7259	0,6856	0,7088	0,0130	0,7479	0,8338	0,7841	0,0238
NDSIIIRAO1	0,6984	0,6596	0,6816	0,0118	0,8515	0,9234	0,8880	0,0189
SPRAO1	0,7255	0,6453	0,6901	0,0216	0,4588	0,5235	0,4965	0,0259
MSPRAO2	0,7593	0,6832	0,7304	0,0257	0,6830	0,7807	0,7144	0,0292
NDSIIIRAO2	0,7264	0,6704	0,6988	0,0164	0,8223	0,8830	0,8582	0,0188
SPRAO2	0,7130	0,6772	0,6952	0,0133	0,3979	0,5139	0,4550	0,0369

Tablo 158. 290 aktivite TCQETP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MSPGWO	0,9807	1,0086	0,9928	0,0093
NDSIIIGWO	0,9471	0,9652	0,9537	0,0070
SPGWO	0,9790	1,1041	1,0210	0,0532
MSPWOA	1,1263	1,1478	1,1392	0,0074
NDSIIIWOA	1,0939	1,1230	1,1076	0,0122
SPWOA	1,1063	1,1230	1,1159	0,0045
MSPRAO1	1,0167	1,0487	1,0355	0,0102
NDSIIIRAO1	1,0149	1,0330	1,0251	0,0056
SPRAO1	1,0455	1,0624	1,0549	0,0063
MSPRAO2	1,0591	1,0919	1,0767	0,0086
NDSIIIRAO2	1,0571	1,0819	1,0694	0,0076
SPRAO2	1,0610	1,0936	1,0747	0,0095

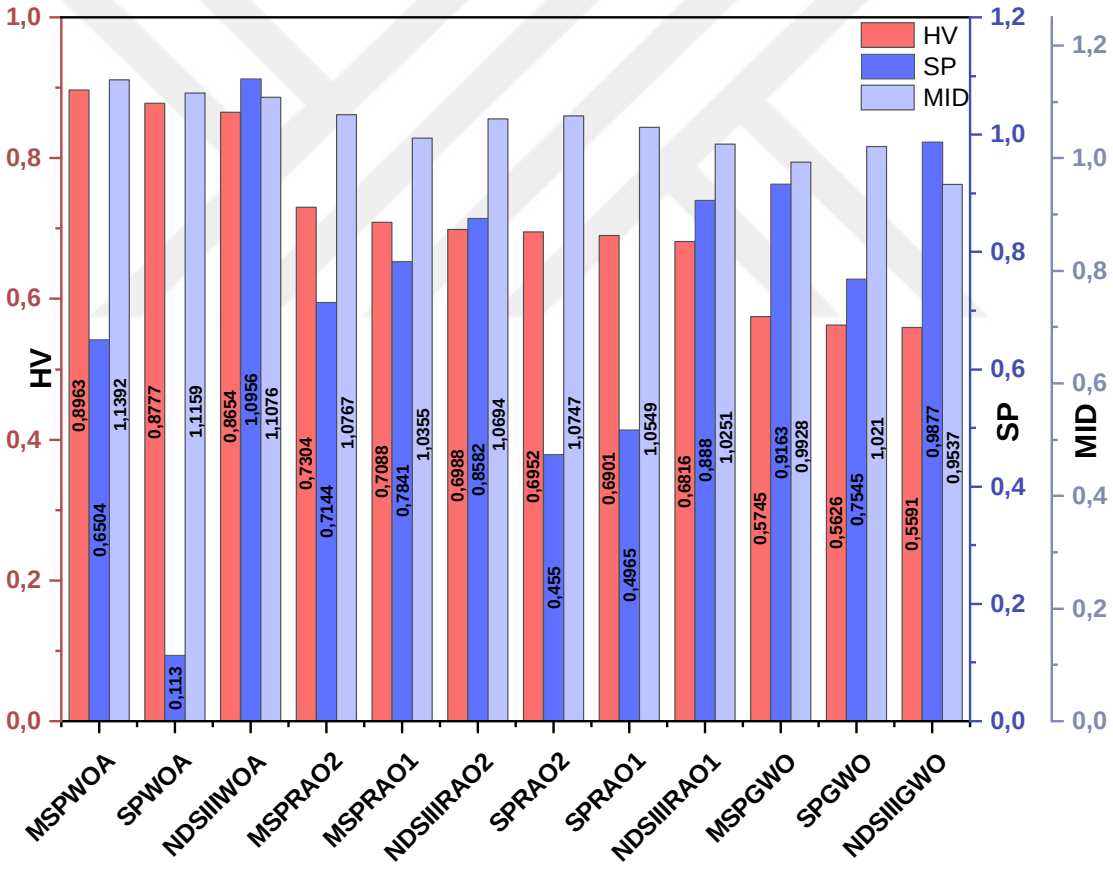
Tablo 159'da performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmakta ve Şekil 105'te grafiksel olarak sunulmaktadır. MSPWOA algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan çok daha iyi sonuç (0.8963) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPWOA algoritması (0.113) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.9537) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Tüm algoritmaların C-metrik değerleri birbirine yakın değerler elde etse de, oluşturulan pareto çözümlerinin kalitesi açısından MSP ile geliştirilen versiyonların güçlendirilmiş pareto yöntemi ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

MSPWOA algoritması, özellikle HV metriğinde en iyi performansı sergileyerek, 290 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki problemi için diğer algoritmalara göre daha etkili bir çözüm sunduğunu tespit edilmiştir.

Tablo 159. 290 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
MSPWOA	26400	0,8963	0,6504	1,1392
SPWOA	26400	0,8777	0,113	1,1159
NDSIIIWOA	26400	0,8654	1,0956	1,1076
MSPRAO2	26400	0,7304	0,7144	1,0767
MSPRAO1	26400	0,7088	0,7841	1,0355
NDSIIIRAO2	26400	0,6988	0,8582	1,0694
SPRAO2	26400	0,6952	0,455	1,0747
SPRAO1	26400	0,6901	0,4965	1,0549
NDSIIIRAO1	26400	0,6816	0,888	1,0251
MSPGWO	26400	0,5745	0,9163	0,9928
SPGWO	26400	0,5626	0,7545	1,021
NDSIIIGWO	26400	0,5591	0,9877	0,9537



Şekil 105. 290 aktivite TCQETP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.6.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Problemleri Genel Değerlendirme

Çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemlerinin çözümünde, Rao serileri, Gri kurt optimizasyonu ve Balina optimizasyonu algoritmaları SP, MSP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleriyle geliştirilmiş ve performansları 29, 69 ve 290 aktiviteli projeler üzerinde detaylı olarak incelenmiştir. Her problem boyutunda performans ölçütlerinde farklı algoritmaların öne çıkması, problem karakteristiklerine göre algoritmaların ve operatörlerin performanslarının değiştiğini göstermektedir.

29 aktiviteli problemde MSPWOA algoritması 0.9098 hiper hacim değeri ile en iyi performansı gösterirken, yayılım açısından SPWOA algoritması 0.1264 değeri ile en iyi sonucu vermiştir. Ortalama ideal mesafede ise NDSIIIGWO algoritması 0.7536 değeri ile öne çıkmıştır. MSPWOA algoritması literatürdeki MOSGO algoritmasına göre %56 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak daha iyi sonuçlar üretmeyi başarmıştır.

69 aktiviteli problemde NDSIIIWOA algoritması 0.9294 hiper hacim değeri ile en iyi performansı sergilerken, yayılım açısından SPWOA algoritması 0.1361 değeri ile başarılı olmuştur. Ortalama ideal mesafede ise yine NDSIIIGWO algoritması 0.5308 değeri ile en iyi sonucu elde etmiştir. Literatürde bulunan MOSGO ve SMAOTM algoritmalarına kıyasla %37 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanılmasına rağmen MSPWOA ve NDSIIIWOA algoritmaları metrikler açısından daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

290 aktiviteli büyük ölçekli problemde ise MSPWOA algoritması 0.8963 hiper hacim değeri ile en iyi performansı gösterirken, yayılım açısından SPWOA algoritması 0.113 değeri ile başarılı olmuştur. Ortalama ideal mesafede ise NDSIIIGWO algoritması 0.9537 değeri ile öne çıkmıştır. Büyük ölçekli problemde de performans ölçütlerinde farklı algoritmaların başarılı olması, algoritmaların problem boyutuyla birlikte performans karakteristiklerinin değiştiğini göstermektedir.

Metasezgisel algoritmaların özellikleri incelendiğinde, WOA algoritması tüm problem boyutlarında tutarlı ve yüksek performans gösterirken, GWO algoritması özellikle ideal noktaya yakın çözümler üretmede başarılı olmuştur. Operatörlerin etkisi değerlendirildiğinde, MSP operatörü özellikle çözüm kalitesi ve çeşitliliği açısından SP operatörünün eksikliğini giderdiği görülmüştür. NDSIII operatörü ideal noktaya yakın çözümler üretmede öne çıkmış, SP operatörü ise yayılım açısından daha iyi sonuçlar vermiştir.

Her problem boyutunda performans ölçütlerinde farklı algoritmaların öne çıkması, problem karakteristiklerine göre algoritmaların ve operatörlerin performanslarının değiştiğini göstermektedir. SP ile geliştirilen algoritmaların yayılım açısından iyi sonuçlar üretse de çözüm kalitesi açısından MSP ve NDSIII'ün gerisinde kaldığı görülmektedir. MSP ile geliştirilen algoritmalar SP ile geliştirilen algoritmalara göre yayılım açısından ödün vermiş olsa da hiper hacim ve C-metrik değerleri açısından çok daha iyi sonuçlar üretmiştir.

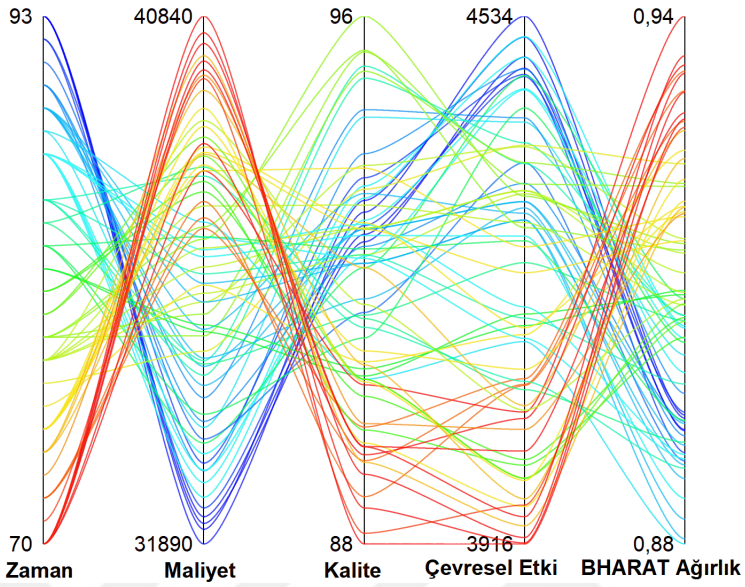
3.6.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi

Bu bölümde, 29, 69 ve 290 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki optimizasyon problemlerinin çözümleri neticesinde elde edilen pareto çözümleri arasından en uygun alternatiflerin belirlenmesi amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Her bir problem kategorisinde en iyi performansı gösteren algoritmanın pareto çözümleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu doğrultuda, 29 aktiviteli problem için MSPWOA, 69 aktiviteli problem için NDSIIIWOA ve 290 aktiviteli problemler için MSPWOA algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümleri kullanılmıştır. Analiz sürecinde zaman, maliyet, kalite ve çevresel etki kriterlerine eşit önem verilmiş ve her dört kriter eşit ağırlıkta (wt=wc=wq=we=0.25) değerlendirilmiştir. BHARAT yöntemi kullanılarak her bir problem kategorisi için en iyi üç alternatif belirlenmiştir.

Şekil 106'da 29 aktiviteli TCQETP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite ve çevresel etki değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 70-93 gün aralığında, maliyetlerin 31890-40840 aralığında, kalite değerlerinin 88-96 aralığında ve çevresel etki değerlerinin 3916-4534 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.88-0.94) ilişkilendirilmektedir.

BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 160'ta gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen opsiyonlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri, çevresel etki değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, kriterlerin eşit ağırlıkta kullanılması durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 70 gün sürede tamamlanıp 38220$ maliyet, 90.14 kalite değeri ve 4070.14 çevresel etki değeri ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.9350 olarak hesaplanmıştır. İkinci en iyi

alternatif yine 70 günde tamamlanmakta, 39930$ maliyet gerektirmekte, 89.24 kalite değeri ve 3947.63 çevresel etki değeri sağlamakta olup, 0.9312 BHARAT ağırlık değerine sahiptir.



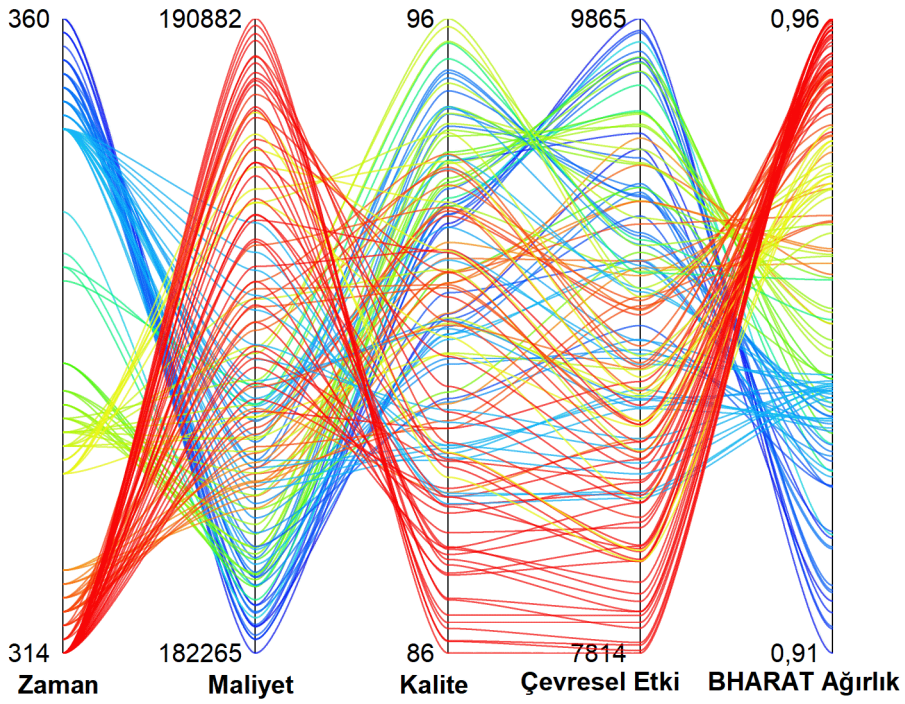
Şekil 106. 29 aktiviteli TCQETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 160. 29 aktiviteli TCQETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	Çevresel Etki	BHARAT Ağrılık
1	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,2,1,2,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	38220	90,14	4070,14	0,9350
2	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,3,2,3,2,3,2,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	39930	89,24	3947,63	0,9312
3	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,1,1,2,1,3,1,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	70	38680	89,13	4062,52	0,9303

Şekil 107'de 69 aktiviteli TCQETP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite ve çevresel etki değerleri arasındaki ilişki sunulmaktadır. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 314-360 gün aralığında, maliyetlerin 182265-190882 aralığında, kalite değerlerinin 86-96 aralığında ve çevresel etki değerlerinin 7814-9865 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.91-0.96) ilişkilendirilmektedir.

BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 161'de gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen opsiyonlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri, çevresel etki değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır.



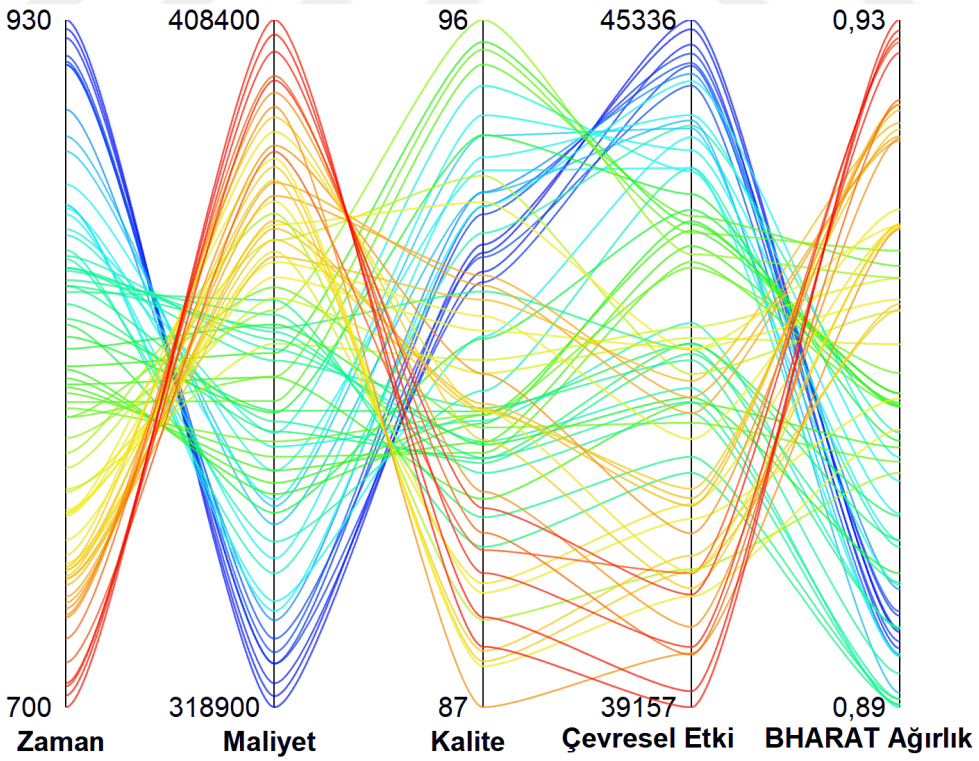
Şekil 107. 69 aktiviteli TCQETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 161. 69 aktiviteli TCQETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	Çevresel Etki	BHARAT Ağrılık
1	1,1,3,3,1,2,3,1,3,3,3,1,3,2,3,3,3,3, 2,1,1,2,1,2,1,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3, 3,3,3,2,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,3,3,2,3, 1,3,3,3,1,3,3,2,2,1,3,3,2,3,3	314	189683	87,17	7948,97	0,96321
2	1,1,3,3,1,2,3,1,3,3,3,1,3,2,3,3,3,3, 2,1,1,2,1,2,1,3,3,3,3,3,3,3,2,3,3, 3,3,3,2,3,3,3,3,3,3,2,3,2,2,2,3,3, 1,2,3,3,1,3,3,2,3,1,3,2,3,3,3	314	188929	87,46	8006,27	0,96316
3	1,1,3,3,1,2,3,1,3,3,3,1,3,2,3,3,3,3, 2,1,1,2,1,2,1,3,3,3,3,3,3,3,2,3,3, 3,3,3,2,3,3,3,3,3,3,2,3,3,2,2,3,3, 1,2,3,3,1,3,3,2,3,1,3,2,3,3,3	314	189134	87,26	7980,56	0,96316

Şekil 108'de 290 aktiviteli TCQETP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite ve çevresel etki değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 700-930 gün aralığında, maliyetlerin 318900-408400 aralığında, kalite değerlerinin 87-96 aralığında ve çevresel etki değerlerinin 39157-45336 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.89-0.93) ilişkilendirilmektedir.

BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 162'de gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen opsiyonlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri, çevresel etki değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, kriterlerin eşit ağırlıkta kullanılması durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 700 gün sürede tamamlanıp 404400$ maliyet, 87.82 kalite değeri ve 39156.90 çevresel etki değeri ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.9251 olarak hesaplanmıştır. İkinci en iyi alternatif 704 günde tamamlanmakta, 404500$ maliyet gerektirmekte, 88.18 kalite değeri ve 39201.08 çevresel etki değeri sağlamakta olup, 0.9246 BHARAT ağırlık değerine sahiptir.



Şekil 108. 290 aktiviteli TCQETP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 162. 290 aktiviteli TCQETP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Z.	M.	K.	Ç.E.	BHARAT
1	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3, 3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3, 3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3, 3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3, 2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2, 1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1, 2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2, 3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3, 3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3, 3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3, 3,2,3,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2, 3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	700	408400	87,82	39156,90	0,9251
2	2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,2,3,2,3,3,3,1,3, 3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3, 3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,2,3, 3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,2,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3, 2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,2,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2, 1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,2,3,2,1, 2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2, 3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3, 3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3, 3,1,3,2,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,3,3,2,2, 3,2,3,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2, 3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	704	406500	88,18	39301,08	0,9246
3	2,2,3,2,1,2,1,3,2,1,1,2,3,2,2,3,3,3,3,2,3,3,3,1,2, 2,2,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,2,3,2,2,2,2,2,2,3, 3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,2,2,3,3,2, 2,3,2,3,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,2,3, 2,2,3,2,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2,2,3,2,1,2,1,3,2, 1,1,2,3,2,2,3,2,3,3,2,3,3,3,1,3,2,3,3,1,2,3,3,2,1, 2,1,3,2,1,1,2,3,2,3,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1,2, 3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2,2,3,3,3,3,2,3,3,3,1,3,3, 3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,2,3,2,3,3,2,2,3,2,3,3, 3,1,3,3,3,3,3,1,2,3,2,2,1,2,1,3,2,1,1,3,2,2,2,3,3,3, 3,2,2,2,3,1,2,3,3,3,1,2,3,3,2,1,2,1,3,2,1,1,3,3,2, 3,3,2,3,2,2,3,3,3,1,3,3,3,3,1	708	400540	89,52	40169,43	0,9242

3.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemleri

Bu bölümde, çok amaçlı zaman-maliyet-güvenlik riski ödünleşim (TCQSRTP) problemlerini incelemek amacıyla, 13, 18 ve 180 aktivite içeren projeler üzerinde, geliştirilen algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. 13 aktiviteye sahip üç katlı bir ev projesi Sharma vd. (2023) tarafından MOPSO algoritması önerilerek çözülmüştür.

İkinci vaka çalışması olan 18 aktiviteye sahip TCQSR problemi, Panwar ve Jha (2021) tarafından, referans tabanlı baskın olmayan sıralama kullanan genetik algoritma (NSGA-III) ile çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, TCQSR problemlerini analiz etmek için Rao serileri, Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve Balina Optimizasyonu Algoritması (WOA) kullanmış ve bu algoritmalar sırasıyla MSP, SP ve NDSIII çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. TCQSRTP probleminde kapsamlı bir şekilde kıyas yapılabilmesi için literatürdeki NSGA-III ve MOPSO algoritması yeniden üretilerek test edilmiş ve önerilen algoritmalarla karşılaştırmaları yapılmıştır. NSGA-III ve MOPSO algoritmaları hakkında tüm detaylar için Panwar ve Jha (2021) ve Sharma vd. (2023) tarafından yapılan çalışmalara başvurulabilir.

Son olarak, geliştirilen algoritmaların geniş ölçekli projelerdeki etkinliğini incelemek amacıyla, 18 aktiviteli proje on kat artırılarak 180 aktiviteye genişletilmiş ve algoritmaların büyük ölçekli TCQSRTP problemlerindeki performansı, C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe gibi kriterlere göre değerlendirilmiştir.

3.7.1. 13 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi

13 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski ödünleşim problemi, Sharma vd. (2023) tarafından çok amaçlı parçacık sürü optimizasyon algoritması (MOPSO) kullanılarak 100 popülasyon 100 iterasyon ile çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, Rao serileri, Gri Kurt algoritması ve Balina algoritması, çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisini araştırmak amacıyla güçlendirilmiş Pareto yöntemi (SP), güçlendirilmiş pareto yönteminin parametrelerinin değiştirilmiş hali (MSP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörleri ile ayrı ayrı geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon boyutu 60, iterasyon sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir. Böylece, literatürdeki MOPSO algoritması ile karşılaştırıldığında %40 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha yüksek performans göstermesi hedeflenmiştir.

13 aktiviteli problem, toplamda 55,296 farklı proje tamamlanma opsiyonu sahiptir. Probleme ait aktiviteler arası öncülük ilişkileri ve zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski opsiyonları Tablo 163'te gösterilmektedir.

Tablo 163. 13 Aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski opsiyonları

Akt.	Ardıl	Ops.	Z.	M.	Ağr.	W1	K1	W2	K2	W3	K3	GR.
1	2	1	8	10039,42	5	45	97	30	99	25	93	3
		2	8	9849,86			70		73		71	6
2	3	1	6	1082,13	8	20	94	35	91	45	89	16
		2	6	891,05			83		88		84	26
3	4	1	12	15545,67	10	30	95	45	94	25	95	20
		2	10	17039,34			72		74		78	19
4	5	1	5	562,13	6	35	89	35	92	30	94	21
		2	4	590,32			83		83		87	26
5	6	1	26	15834,49	9	30	85	35	92	35	95	15
		2	16	17274,94			78		86		89	18
6	7	1	32	74124,65	8	40	99	30	78	30	94	35
		2	29	76345,78			73		85		67	52
		3	23	84312,34			60		90		86	59
7	8	1	22	32646,05	10	40	94	40	93	20	87	41
		2	11	29759,59			71		69		96	56
8	9	1	18	65959,52	8	40	90	50	78	10	73	20
		2	29	105296,9			85		90		94	15
		3	11	157433,4			90		95		95	16
9	13	1	37	58570,35	6	40	97	50	98	10	97	16
		2	21	59999,39			89		96		67	15
		3	32	57668,29			81		85		63	14
		4	17	63321,11			95		84		90	19
10	-	1	34	38411,5	8	45	85	45	90	10	78	16
		2	17	65326,48			88		92		90	15
		3	12	50214,22			78		84		93	16
11	-	1	9	12216,23	7	40	70	50	85	10	90	20
		2	12	3846,23			95		88		85	36
12	-	1	41	90219,78	8	40	70	50	85	10	90	11
		2	31	233034,5			95		88		85	21
13	10,11,12	1	23	127641,8	7	30	98	40	95	30	99	26
		2	24	81323,17			87		86		83	47

Şekil 109’da on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliyet, güvenlik riski ve maksimum kalite değerleri gösterilmektedir. Gri kurt algoritması versiyonları değerlendirildiğinde, MSPGWO’nun zaman kriterinde optimum değeri kararlı bir şekilde elde ettiği, diğer versiyonların daha değişken sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından SPGWO’nun en kararlı sonuçları ürettiği, NDSIIIGWO’nun ise en yüksek değerleri elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPGWO’nun en yüksek ve kararlı sonuçları ürettiği, diğer versiyonların daha düşük değerler elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPGWO’nun en düşük ve kararlı değerleri ürettiği belirlenmiştir.

Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, SPWOA’nın bazı çözümlerde küçük sapmalar gösterdiği, NDSIIIWOA’nın ise daha değişken sonuçlar

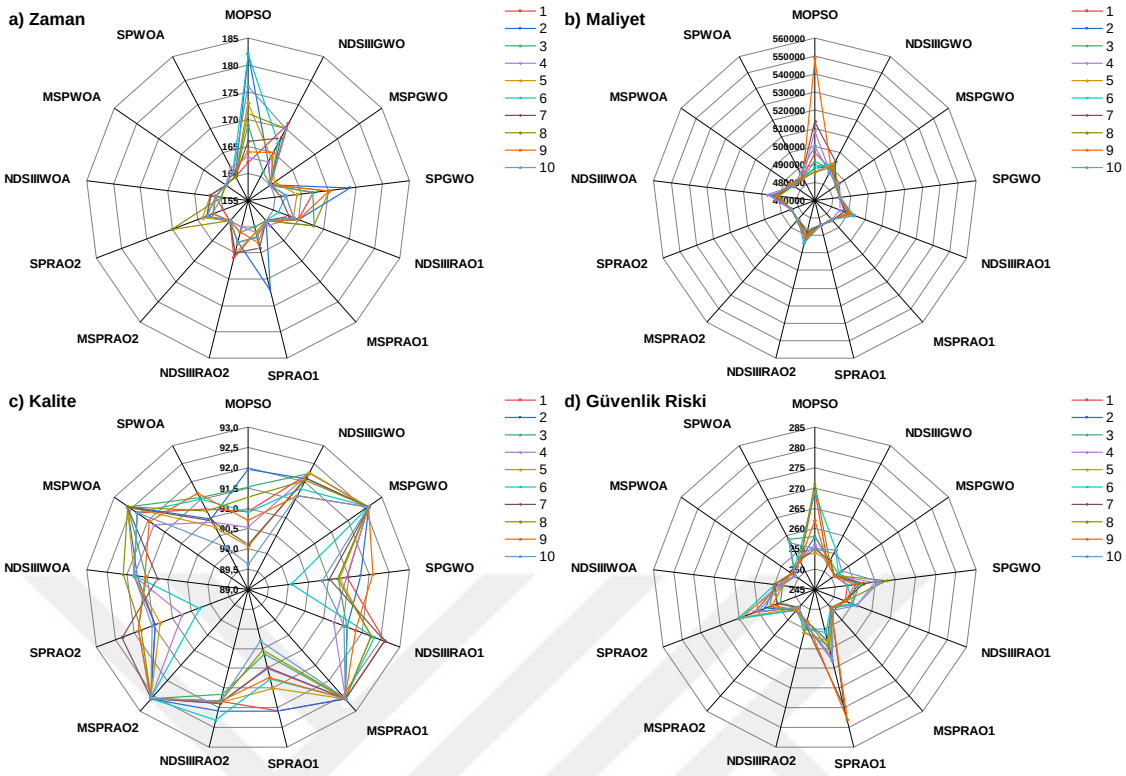
ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından NDSIIIWOA'nın diğer versiyonlara göre daha yüksek değerler ürettiği, MSPWOA ve SPWOA'nın ise daha kararlı sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPWOA'nın en yüksek ve kararlı sonuçları ürettiği, SPWOA'nın ise daha düşük değerler elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPWOA'nın en düşük ve kararlı sonuçları ürettiği belirlenmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MSPRAO1'in zaman kriterinde optimum değeri kararlı bir şekilde elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO1 ve SPRAO1'in daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği, NDSIIIIRAO1'in ise daha yüksek değerler elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPRAO1'in en yüksek ve kararlı sonuçları ürettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPRAO1'in en düşük değerleri elde ettiği, SPRAO1'in ise en yüksek değerleri ürettiği belirlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları değerlendirildiğinde, MSPRAO2'nin zaman kriterinde optimum değeri kararlı bir şekilde elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO2 ve SPRAO2'nin daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPRAO2'nin en yüksek ve kararlı sonuçları ürettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPRAO2'nin en düşük değerleri elde ettiği belirlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmaların MOPSO algoritmasına göre %40 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle (NFE) daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. MSP operatörü ile geliştirilen versiyonların MOPSO algoritmasına göre daha kararlı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Özellikle MSPWOA ve MSPRAO2'nin dört kriterde de (zaman, maliyet, kalite ve güvenlik riski) optimum değerlere ulaşmada ve bu değerleri korumada diğer algoritmalara göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. MSPGWO ve MSPRAO1 algoritmaları da MOPSO'ya kıyasla daha kararlı sonuçlar üretmiştir. Bu durum, MSP operatörünün çok amaçlı optimizasyon problemlerinde etkili bir seçme stratejisi olduğunu ve daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha başarılı sonuçlar elde edilebildiğini göstermektedir.

Tablo 164-168 arasında, her bir algoritmanın farklı versiyonlarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması verilmiştir. Tablolarda, her algoritmanın en yüksek hiper hacim değerine sahip bağımsız çözümü esas alınarak ilgili pareto çözümleri seçilmiştir. Pareto çözümlerinde, 1. ve 2. çözümler minimum zaman, 3. ve 4. çözümler minimum maliyet, 5. ve 6. çözümler maksimum kalite, 7. ve 8. çözümler minimum güvenlik riski, 9. ve 10. çözümler dengeli çözümler olarak sunulmaktadır.



Şekil 109. 13 aktiviteli TCQSRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Tablo 164'te, GWO algoritmasının farklı versiyonlarının (SPGWO, MSPGWO ve NDSIIIGWO) 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde (1. ve 2. çözümler) MSPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde (3. ve 4. çözümler) her üç versiyon da yakın değerler üretirken, SPGWO'nun biraz daha başarılı olduğu görülmektedir. Maksimum kalite hedefinde (5. ve 6. çözümler) MSPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum güvenlik riski açısından (7. ve 8. çözümler) MSPGWO algoritması diğer versiyonlara kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 165'te, WOA algoritmasının farklı versiyonlarının 13 aktiviteli TCQSRTP problemi üzerindeki pareto çözümleri karşılaştırılmıştır. Minimum zaman hedefi açısından, MSPWOA versiyonu diğer yaklaşımlara kıyasla üstün performans göstermiştir. Minimum maliyet kriterinde ise SPWOA'nın en iyi sonuçları ürettiği gözlemlenmiştir. Maksimum kalite hedefinde, MSPWOA versiyonu diğer algoritmaları geride bırakarak daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Ayrıca, güvenlik riskini en aza indirme açısından da MSPWOA, diğer versiyonlara kıyasla daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 164. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPGWO				MSPGWO				NDSIIIGWO			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
162	817386,91	87,02	325	160	810512,10	84,94	333	170	717705,90	87,81	330
165	769431,27	84,70	331	162	809207,99	88,23	331	171	645804,55	82,99	359
215	483995,93	85,38	323	220	485278,63	88,07	312	226	487263,03	88,79	295
202	487657,51	83,50	343	214	489431,24	88,45	311	201	494356,30	88,69	303
221	605486,92	90,84	273	213	795687,36	92,60	281	187	798556,85	91,60	283
204	584389,75	90,11	296	230	743579,07	91,79	285	214	721386,66	91,44	284
211	588382,39	89,23	261	225	610535,20	90,15	253	226	582729,57	88,76	256
214	571008,22	88,39	261	224	611138,22	87,02	254	223	555248,09	86,47	257
177	813991,56	86,98	292	177	589837,90	86,33	339	177	717381,88	86,18	289
178	730484,22	86,29	303	180	738341,86	87,63	338	183	810248,57	90,75	271

Tablo 165. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPWOA				MSPWOA				NDSIIIWOA			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
161	764382,99	85,39	351	160	803578,76	83,11	328	161	757260,09	82,29	349
161	803931,21	85,26	310	160	803768,32	84,38	325	164	755927,79	86,02	342
215	484185,49	86,65	320	214	484213,68	86,21	325	231	496535,09	89,00	281
200	489838,31	87,12	325	203	486544,78	86,75	326	216	496882,40	87,01	292
233	716664,09	91,51	286	216	768772,38	92,32	282	213	804057,36	91,83	265
207	678727,52	91,03	285	218	718064,94	91,52	280	193	808808,12	91,32	268
225	583620,22	89,87	254	234	609697,77	87,59	251	241	609106,16	90,58	254
203	639078,42	90,16	259	223	612028,87	88,13	252	223	661242,64	90,95	255
176	818608,21	87,66	290	177	640987,64	85,91	363	177	702080,06	84,28	293
178	813963,37	87,42	287	178	511168,75	80,90	343	181	811742,24	88,74	270

Tablo 166, Rao-1 algoritmasının farklı versiyonlarının 13 aktiviteli TCQSRTP problemindeki pareto çözümlerinin karşılaştırmasını sunmaktadır. Minimum zaman ve güvenlik riski bulmada MSPRAO1 versiyonu en iyi performansı sergilemiştir. Minimum maliyet açısından, MSP ve SP ile geliştirilen versiyonlar daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maksimum kalite hedefinde (5. ve 6. çözümler), MSPRAO1 en yüksek kalite değerlerini elde ederek üstünlük sağlamıştır.

Tablo 166. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPRAO1				MSPRAO1				NDSIIIRAO1			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
161	757640,73	84,00	336	160	819071,66	85,44	314	168	657416,19	82,20	369
161	803741,65	83,99	313	161	772372,35	82,91	348	168	665786,19	81,43	353
215	483995,93	85,38	323	215	483995,93	85,38	323	205	490843,50	88,33	309
189	491308,47	85,28	326	205	485436,38	84,81	326	189	491308,47	85,28	326
217	722453,71	91,50	303	213	795687,36	92,60	281	187	798556,85	91,60	283
196	781893,14	91,04	269	213	780575,10	91,97	282	214	721386,66	91,44	284
206	663085,14	86,12	258	234	609697,77	87,59	251	223	661242,64	90,95	255
208	616819,23	87,05	264	239	610599,83	88,56	253	226	582729,57	88,76	256
177	813802,00	85,71	295	176	668290,38	84,40	297	176	663071,55	87,43	317
178	762454,06	89,19	333	178	766744,10	84,63	323	178	511359,83	81,34	333

Tablo 167, Rao-2 algoritması versiyonlarının 13 aktiviteli TCQSRTP problemi çözümlerini göstermektedir. MSPRAO2 versiyonu tüm hedeflerde diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Tablo 167. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

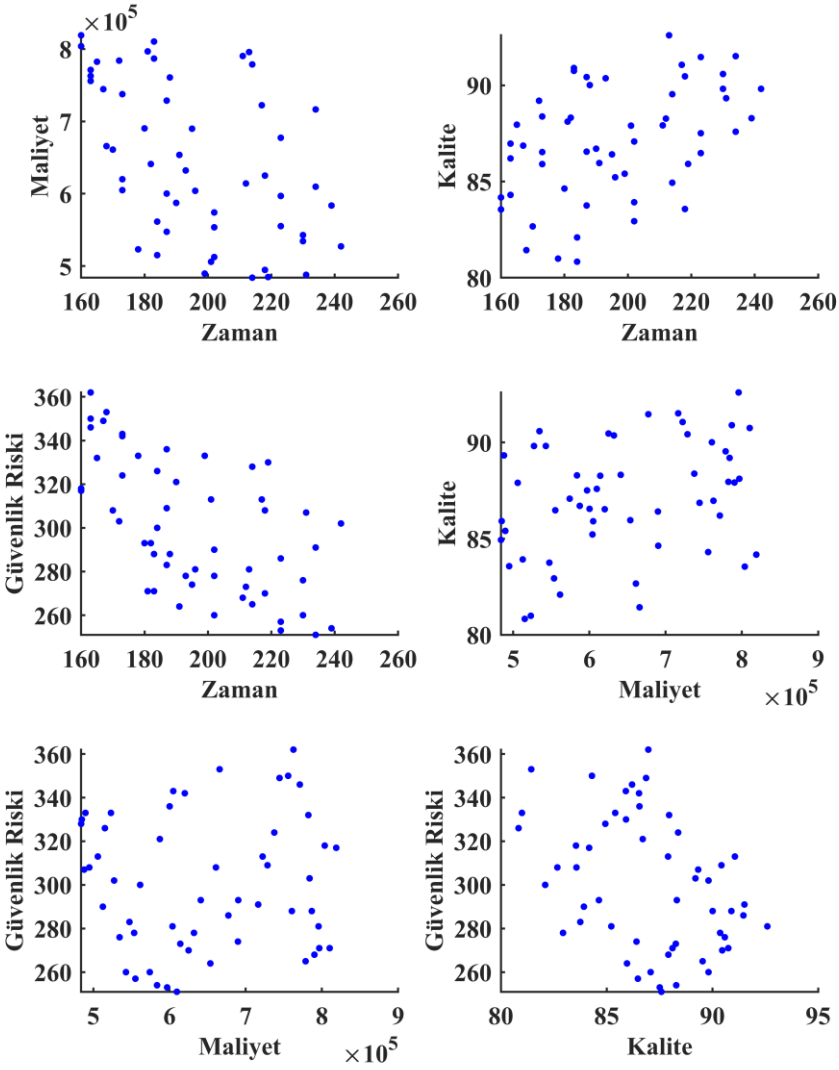
SPRAO2				MSPRAO2				NDSIIIRAO2			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
160	803959,40	84,82	315	160	803769,84	83,55	318	161	803741,65	83,99	313
163	791965,60	84,73	325	160	818882,10	84,17	317	162	793904,65	87,16	342
214	484213,68	86,21	325	214	484024,12	84,94	328	191	490179,69	84,48	334
200	488765,91	85,44	343	219	484926,18	85,91	330	218	495142,30	85,28	295
199	770229,61	91,45	286	213	795687,36	92,60	281	213	804057,36	91,83	265
195	773360,25	90,93	300	234	716444,82	91,51	291	214	749368,69	91,78	302
207	661809,22	88,96	261	234	609697,77	87,59	251	236	581289,12	89,33	253
227	571290,60	87,64	263	223	596916,61	87,51	253	223	661242,64	90,95	255
177	606859,45	82,96	319	178	523162,55	80,99	333	178	710827,30	83,70	314
178	523161,03	81,82	340	180	690277,34	84,63	293	184	803883,55	89,54	293

Algoritmaların farklı versiyonlarla üretilen pareto çözümleri incelendiğinde, her algoritma versiyonu farklı amaç fonksiyonlarında üstün performans göstermesine rağmen, hiçbir versiyon diğerlerine tam anlamıyla baskın gelememiştir.

Bir sonraki bölümde, performans metrikleri açısından ortalama HV (hiper hacim) ölçütü incelendiğinde, en yüksek değere MSPRAO2 algoritmasının ulaştığı görülmektedir. Sharma vd. (2023), MOPSO algoritması için en iyi bağımsız çözüm yerine tüm çözümler arasından elde edilen en iyi sonuçlar, 200 gün ve 650000$'dan daha düşük pareto çözümleri olacak şekilde sunmuşlardır. Tablo 168'de MSPRAO2 algoritmasına ait en yüksek HV değerine sahip pareto çözümü ile MOPSO algoritmasının sonuçları kıyaslanmıştır. Çözümler incelendiğinde, MSPRAO2 algoritmasının %40 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile MOPSO algoritmasına göre tüm amaçlarda daha iyi değerler elde ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca MOPSO (2023) tarafından bulunan pareto çözümlerinden 6.,14.,15. ve 17. Pareto çözümlerinin domine edildiği tespit edilmiştir. Tablo 169'da, MSPRAO2 algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait pareto çözümleri kullanıp opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 110'da pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 168. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için MSPRAO2 algoritmasına ait Pareto çözümlerinin MOPSO Pareto çözümleriyle karşılaştırılması

MOPSO(2023)				MOPSO (Bu Çalışma)				MSPRAO2			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
178	549278,79	84,20	330	178	557650,31	82,60	307	170	648961,32	82,57	318
179	630593,19	85,77	307	179	638964,71	84,17	284	171	594272,65	82,53	355
180	567957,84	85,10	315	180	638936,52	84,61	279	172	602995,10	83,91	321
181	629099,52	87,78	308	180	639126,08	85,88	276	173	620074,60	86,53	342
181	513269,17	85,05	352	181	509836,45	84,63	336	174	592940,35	86,25	348
182	673322,82	87,14	302	182	637632,41	87,89	277	175	590950,93	82,60	351
184	647607,08	85,61	272	184	576598,73	82,72	299	176	641375,40	84,13	298
187	550895,34	84,17	299	185	616211,11	84,14	295	177	557487,42	81,72	322
188	557798,34	85,81	296	186	559483,09	84,23	285	178	523162,55	80,99	333
190	571273,63	84,94	280	187	574567,16	85,30	279	182	641065,13	88,32	293
191	633642,54	88,35	277	194	594200,20	88,78	283	184	561486,47	82,09	300
191	508396,00	85,19	333	195	513727,35	81,84	318	184	515195,99	80,83	326
193	554639,51	86,77	277	195	638501,26	86,39	260	187	547462,62	83,75	283
193	640924,30	89,34	304	197	562179,99	84,66	273	187	600200,17	86,55	336
195	630129,74	87,99	283	197	562369,55	85,93	270	190	587341,81	86,70	321
197	577481,81	86,56	269	198	515861,32	83,84	294	193	632148,87	90,36	278
198	553781,80	85,87	284	198	550538,64	86,72	265	195	638690,82	87,66	257
200	552477,69	89,16	282	199	515833,13	84,28	289	196	603985,31	85,22	281



Şekil 110. MSPRAO2 tarafından üretilmiş 13 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski pareto grafiği

Tablo 169. 13 Aktivite TCQSRTP için MSPRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	G.R.
Minimum Zaman	1	2,1,2,2,2,3,2,3,4,3,1,2,1	160	803769,84	83,55	318
	2	2,1,2,2,2,3,2,3,4,2,1,2,1	160	818882,10	84,17	317
Minimum Maliyet	3	2,2,1,2,1,1,2,1,3,1,2,1,2	214	484024,12	84,94	328
	4	2,2,1,2,1,1,2,1,1,1,2,1,2	219	484926,18	85,91	330
Maksimum Kalite	5	1,1,1,1,1,1,1,3,1,2,2,2,1	213	795687,36	92,60	281
	6	1,2,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1	234	716444,82	91,51	291
Minimum Güvenlik Riski	7	1,1,2,1,1,1,1,2,3,2,1,1,1	234	609697,77	87,59	251
	8	1,1,2,1,1,1,1,2,2,3,1,1,1	223	596916,61	87,51	253

3.7.2. 13 Aktivite TCQSRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 170'te, 13 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların MOPSO algoritmasıyla C-metrik performans karşılaştırması sunulmaktadır.

MOPSO algoritmasının GWO versiyonları ile karşılaştırmasında, NDSIIIGWO çözümlerinin %2'sini domine ederken, NDSIIIGWO tarafından %28 oranında domine edilmiştir. SPGWO ile yapılan karşılaştırmada, MOPSO'nun çözümlerinin %9'unu domine ettiği, SPGWO'nun ise MOPSO'yu %21 oranında domine ettiği belirlenmiştir. MSPGWO ile kıyaslandığında ise MOPSO çözümlerinin %15'ini domine ederken, MSPGWO tarafından %11 oranında domine edilmiştir.

WOA algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, MOPSO algoritması NDSIIIWOA'nın %4'ünü domine ederken, NDSIIIWOA tarafından %18 oranında domine edilmiştir. SP ile geliştirilen WOA versiyonunda MOPSO çözümlerin %13'ünü domine ederken, SPWOA tarafından %11 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen WOA versiyonunda ise MOPSO çözümlerin %6'sını domine ederken, MSPWOA tarafından %15 oranında domine edilmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MOPSO algoritması NDSIIIRAO1'in %7'sini domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %16 oranında domine edilmiştir. SPRAO1 ile yapılan değerlendirmede, MOPSO çözümlerinin %12'sini domine ettiği, SPRAO1'in ise %18 oranında MOPSO'ya üstünlük sağladığı belirlenmiştir. MSPRAO1 ile kıyaslandığında ise MOPSO çözümlerinin %9'unu domine ettiği, MSPRAO1'in MOPSO'yu %13 oranında domine ettiği tespit edilmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, MOPSO algoritması NDSIIIRAO2'nin %3'ünü domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %19 oranında domine edilmiştir. SPRAO2 ile karşılaştırıldığında MOPSO çözümlerin %8'ini domine ederken, SPRAO2 tarafından %16 oranında domine edilmiştir. MSPRAO2 versiyonunda ise MOPSO çözümlerin %8'ini domine ederken, MSPRAO2 tarafından %13 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen algoritmaların MOPSO algoritmasına kıyasla daha yüksek performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle, NDSIII operatörünün kullanıldığı NDSIIIGWO, NDSIIIRAO1 ve NDSIIIRAO2'nin sırasıyla %28, %16 ve %19 oranlarında MOPSO'ya üstünlük sağlamıştır. Bu bulgular, NDSIII

operatörüyle geliştirilen algoritmaların MOPSO karşısında baskınlık açısında daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

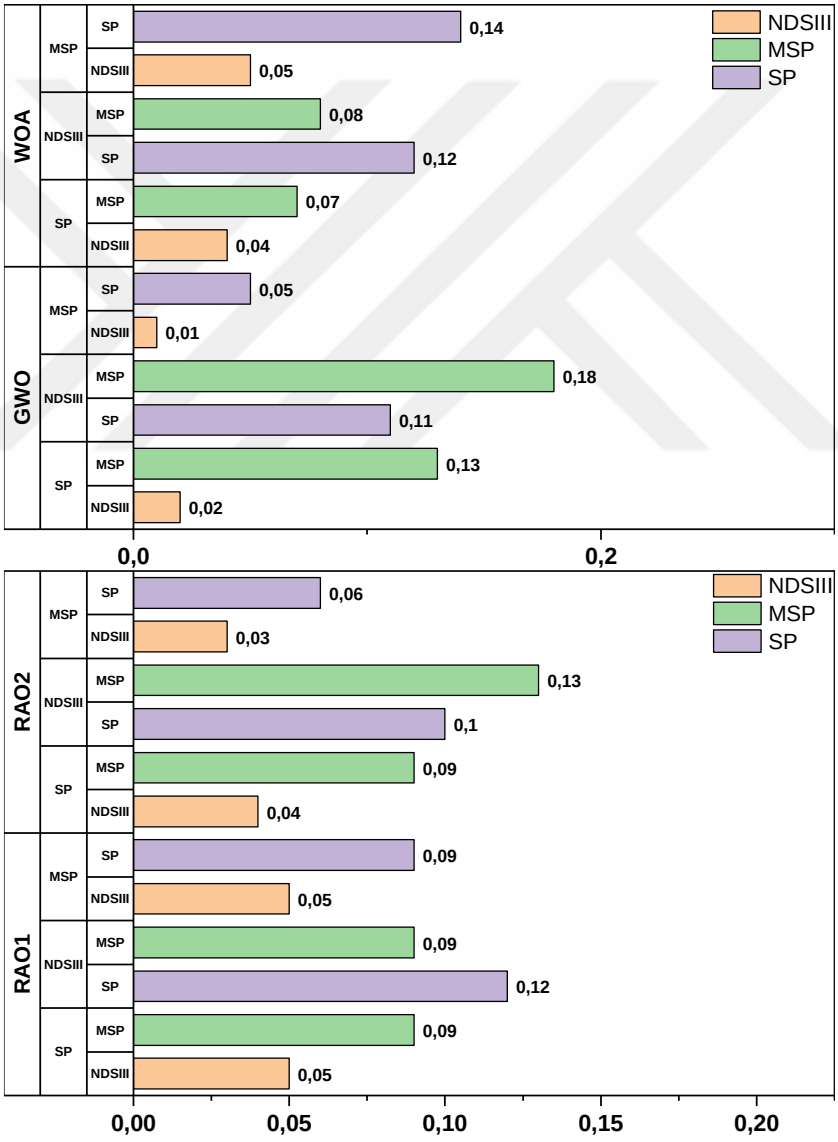
Tablo 170. 13 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların MOPSO algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MOPSO, NDSIIIGWO)	0,2000	0,0000	0,0220	0,0503
C(NDSIIIGWO, MOPSO)	0,8571	0,0000	0,2874	0,1882
C(MOPSO, SPGWO)	0,4706	0,0000	0,0943	0,0988
C(SPGWO, MOPSO)	0,7143	0,0000	0,2126	0,1566
C(MOPSO, MSPGWO)	0,5000	0,0000	0,1533	0,1123
C(MSPGWO, MOPSO)	0,4286	0,0000	0,1151	0,0949
C(MOPSO, NDSIIIWOA)	0,3333	0,0000	0,0423	0,0685
C(NDSIIIWOA, MOPSO)	0,7143	0,0000	0,1803	0,1464
C(MOPSO, SPWOA)	0,6667	0,0000	0,1385	0,1419
C(SPWOA, MOPSO)	0,7143	0,0000	0,1148	0,1103
C(MOPSO, MSPWOA)	0,3333	0,0000	0,0605	0,0784
C(MSPWOA, MOPSO)	0,8571	0,0000	0,1593	0,1626
C(MOPSO, NDSIIIRAO1)	0,5000	0,0000	0,0735	0,1337
C(NDSIIIRAO1, MOPSO)	0,8571	0,0000	0,1609	0,1338
C(MOPSO, SPRAO1)	0,4615	0,0000	0,1200	0,1040
C(SPRAO1, MOPSO)	0,5714	0,0000	0,1863	0,1311
C(MOPSO, MSPRAO1)	0,4615	0,0000	0,0912	0,0937
C(MSPRAO1, MOPSO)	0,4286	0,0000	0,1384	0,1171
C(MOPSO, NDSIIIRAO2)	0,3571	0,0000	0,0333	0,0699
C(NDSIIIRAO2, MOPSO)	0,8571	0,0000	0,1968	0,1524
C(MOPSO, SPRAO2)	0,3889	0,0000	0,0836	0,0929
C(SPRAO2, MOPSO)	0,4286	0,0000	0,1647	0,1130
C(MOPSO, MSPRAO2)	0,3333	0,0000	0,0835	0,0839
C(MSPRAO2, MOPSO)	0,5714	0,0000	0,1321	0,1197

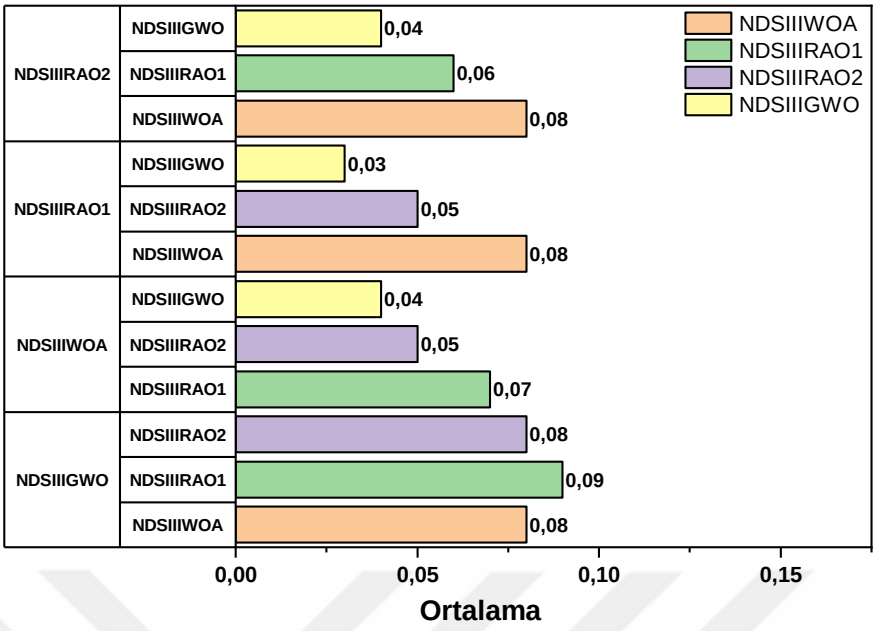
Şekil 111'de, SP, MSP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri kullanılarak geliştirilen algoritmaların ortalama C-metrik değerlerinin kendi aralarındaki karşılaştırması sunulmaktadır. Tüm algoritmalarda NDSIII ile geliştirilen versiyonlara kıyasla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Şekil 112'de, 13 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için algoritmaların NDSIII versiyonlarının C-metrik performans karşılaştırması sunulmaktadır. NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı incelendiğinde, NDSIIIWOA'nın %8'ini, NDSIIIRAO1'in %9'unu ve NDSIIIRAO2'nin %8'ini domine ettiği tespit edilmiştir. Buna karşılık, NDSIIIGWO algoritması, NDSIIIWOA tarafından %4, NDSIIIRAO1 tarafından %3 ve NDSIIIRAO2 tarafından %4 oranında domine edilmiştir.

NDSIIIWOA algoritmasının performansı değerlendirildiğinde, NDSIIIRAO1'in %7'sini ve NDSIIIRAO2'nin %5'ini domine ettiği gözlemlenmiştir. Ancak, NDSIIIWOA algoritması sırasıyla NDSIIIRAO1 ve NDSIIIRAO2 tarafından %8 oranında domine edilmiştir. Rao-1 algoritmasının NDSIII versiyonunda ise, NDSIIIWOA'nın %8'ini, NDSIIIRAO2'nin %5'ini domine ettiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, NDSIIIRAO1 algoritması NDSIIIRAO2 tarafından %6, NDSIIIWOA tarafından ise %7 oranında domine edilmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, algoritmaların NDSIII versiyonlarının birbirlerine karşı düşük ve birbirine yakın baskınlık oranları sergilediği görülmektedir.



Şekil 111. 13 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması



Şekil 112. 13 aktivite zaman-maliyet-kalite- güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 171'de hiper hacim ve yayılım, Tablo 172'de ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 171. 13 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOPSO	0,8146	0,6635	0,7531	0,0483	1,0885	1,4194	1,2522	0,1141
MSPGWO	0,8713	0,8243	0,8429	0,0171	0,5525	1,2589	0,9279	0,2324
NDSIIIGWO	0,8840	0,8579	0,8733	0,0076	1,1349	1,8796	1,4537	0,2548
SPGWO	0,8458	0,7908	0,8198	0,0171	0,4566	1,1855	0,6834	0,2257
MSPWOA	0,8605	0,8215	0,8390	0,0129	0,5771	1,2704	0,9878	0,1855
NDSIIIWOA	0,8857	0,8538	0,8667	0,0111	1,0604	1,9032	1,3449	0,2215
SPWOA	0,8719	0,8088	0,8384	0,0178	0,3915	0,8379	0,6176	0,1508
MSPRAO1	0,8956	0,8470	0,8712	0,0129	0,6580	1,1674	0,9270	0,1403
NDSIIIRAO1	0,8738	0,8478	0,8629	0,0088	0,9707	4,5185	1,8243	0,9762
SPRAO1	0,8309	0,7538	0,8043	0,0255	0,4637	0,9556	0,6231	0,1399
MSPRAO2	0,9004	0,8469	0,8733	0,0165	0,7782	1,1459	0,9660	0,1214
NDSIIIRAO2	0,8745	0,8137	0,8583	0,0183	1,1910	1,5906	1,4143	0,1414
SPRAO2	0,8589	0,7576	0,8149	0,0300	0,3478	0,8568	0,5936	0,1710

Tablo 172. 13 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MOPSO	1,1555	1,2801	1,1936	0,0360
MSPGWO	1,0886	1,2094	1,1456	0,0404
NDSIIIGWO	1,0530	1,1767	1,1169	0,0446
SPGWO	1,1887	1,3207	1,2440	0,0382
MSPWOA	1,1744	1,2647	1,2159	0,0324
NDSIIIWOA	1,0727	1,2387	1,1473	0,0548
SPWOA	1,1747	1,2939	1,2231	0,0381
MSPRAO1	1,1305	1,2681	1,1726	0,0422
NDSIIIRAO1	1,1120	1,2376	1,1647	0,0493
SPRAO1	1,1383	1,2926	1,2248	0,0450
MSPRAO2	1,0948	1,2125	1,1461	0,0376
NDSIIIRAO2	1,0739	1,2041	1,1307	0,0440
SPRAO2	1,1359	1,2319	1,1987	0,0300

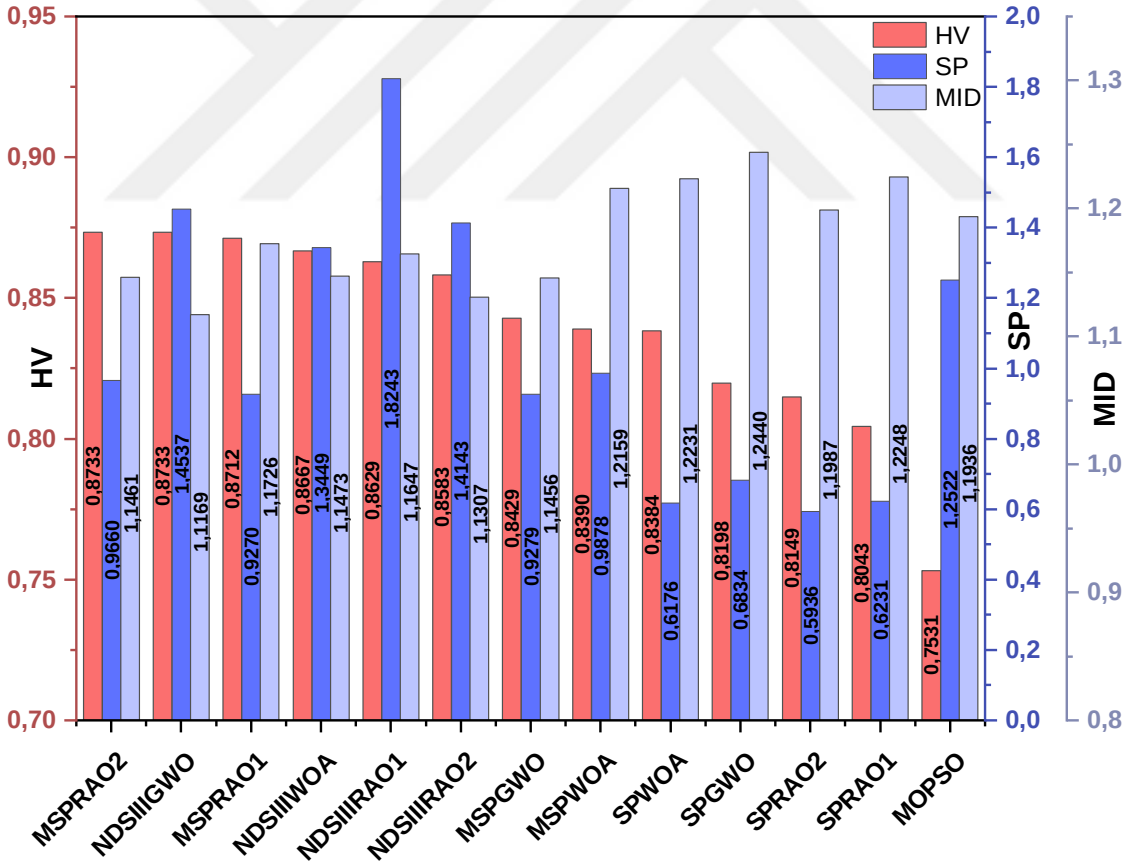
Tablo 172'de performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmakta ve Şekil 113'te grafiksel olarak sunulmaktadır.

Hem Tablo 172 hem de Şekil 113'te, MSPRAO2 ve NDSIIIGWO algoritmalarının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.8733) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPRAO2 algoritması (0.5936) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, SPRAO2 algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (1.1987) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde performans değerlendirmesi yapılırken HV (hiper hacim) ölçütü, üretilen Pareto çözümlerinin hem kalitesini hem de çeşitliliğini ölçmesi bakımından, yayılım (SP) ve ortalama ideal mesafe (MID) gibi diğer ölçütlerden daha öncelikli kabul edilmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmalar, MOPSO algoritmasına göre %40 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle daha iyi performans göstermiştir. MSPRAO2 ve NDSIIIGWO algoritmaları, özellikle HV metriğinde en iyi performansı sergileyerek, 13 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için etkili bir çözüm sunduğunu göstermiştir.

Tablo 173. 13 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
MSPRAO2	6000	0,8733	0,9660	1,1461
NDSIIIGWO	6000	0,8733	1,4537	1,1169
MSPRAO1	6000	0,8712	0,9270	1,1726
NDSIIIWOA	6000	0,8667	1,3449	1,1473
NDSIIIRAO1	6000	0,8629	1,8243	1,1647
NDSIIIRAO2	6000	0,8583	1,4143	1,1307
MSPGWO	6000	0,8429	0,9279	1,1456
MSPWOA	6000	0,8390	0,9878	1,2159
SPWOA	6000	0,8384	0,6176	1,2231
SPGWO	6000	0,8198	0,6834	1,2440
SPRAO2	6000	0,8149	0,5936	1,1987
SPRAO1	6000	0,8043	0,6231	1,2248
MOPSO*	10000	0,7531	1,2522	1,1936
*Bu Çalışma				



Şekil 113. 13 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.7.3. 18 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi

18 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski ödünleşim problemi, Panwar ve Jha (2021) tarafından referans noktalı baskın olmayan sıralama tabanlı genetik algoritma (NSGAIII) kullanılarak 100 popülasyon 200 iterasyon ile çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, Rao serileri, Gri Kurt algoritması ve Balina algoritması, çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisini araştırmak amacıyla güçlendirilmiş Pareto yöntemi (SP), güçlendirilmiş pareto yönteminin parametrelerinin değiştirilmiş hali (MSP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörleri ile ayrı ayrı geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon boyutu 88, iterasyon sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, literatürdeki NSGAIII algoritması ile karşılaştırıldığında %56 daha az fonksiyon değerlendirmesi gerektirmekte olup, önerilen algoritmanın daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha yüksek performans göstermesi hedeflenmiştir.

18 aktiviteli problem, toplamda 5,90E+09 farklı proje tamamlanma opsiyonu sahiptir. Probleme ait aktiviteler arası öncülük ilişkileri ve zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski opsiyonları Tablo 174'te gösterilmektedir.

Tablo 174. 18 Aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski opsiyonları

Akt.	Öncül	Ops.	Z.	M.	Ağr.	W1	K1	W2	K2	W3	K3	GR.
1		1	14	2400	3	100	50	96	30	98	20	12
		2	15	2150		90		89		89		9
		3	16	1900		86		77		84		12
		4	21	1500		75		72		73		8
		5	24	1200		63		60		65		5
2		1	15	3000	5	98	40	94	40	99	20	30
		2	18	2400		87		94		95		24
		3	20	1800		81		92		85		20
		4	23	1500		77		72		70		20
		5	25	1000		60		66		59		18
3		1	15	4500	8	100	70	97	15	98	15	20
		2	22	4000		80		82		81		24
		3	33	3200		62		60		63		14
4		1	12	45000	11	99	50	95	35	94	15	5
		2	16	35000		74		71		76		5
		3	20	30000		59		63		64		4
5	1	1	22	20000	10	100	60	97	20	99	20	12
		2	24	17500		93		89		89		8
		3	28	15000		77		71		72		5
		4	30	10000		61		64		61		9

Tablo 174'ün devamı

6	1	1	14	40000	11	95	50	95	25	100	25	12
		2	18	32000		76		74		79		5
		3	24	18000		59		62		68		9
7	5	1	9	30000	10	97	30	99	30	93	40	24
		2	15	24000		70		73		71		20
		3	18	22000		61		62		67		12
8	6	1	14	220	1	95	100	0	0	0	0	0
		2	15	215		83		0		0		0
		3	16	200		75		0		0		0
		4	21	208		68		0		0		0
		5	24	120		61		0		0		0
9	6	1	15	300	1	100	50	99	50	0	0	6
		2	18	240		97		92		0		4
		3	20	180		81		88		0		8
		4	23	150		71		75		0		3
		5	25	100		63		64		0		4
10	2,6	1	15	450	1	94	60	97	40	0	0	9
		2	22	400		79		83		0		12
		3	33	320		63		69		0		8
11	7,8	1	12	450	2	96	70	95	30	0	0	3
		2	16	350		72		75		0		5
		3	20	300		61		66		0		4
12	5,9,10	1	22	2000	3	99	50	98	35	95	15	30
		2	24	1750		89		85		87		36
		3	28	1500		70		71		79		24
		4	30	1000		62		61		63		20
13	3	1	14	4000	7	99	40	96	40	97	20	15
		2	18	3200		73		71		76		18
		3	24	1800		60		62		63		24
14	4,10	1	9	3000	6	100	80	95	10	98	10	16
		2	15	2400		79		82		81		15
		3	18	2200		63		67		66		16
15	12	1	12	4500	7	100	70	98	30	0	0	25
		2	16	3500		100		98		0		30
16	13,14	1	20	3000	3	97	30	96	30	98	40	10
		2	22	2000		89		85		87		3
		3	24	1750		81		79		78		6
		4	28	1500		72		73		74		8
		5	30	1000		67		60		62		6
17	11,14,15	1	14	4000	6	98	70	97	20	99	10	36
		2	18	3200		73		75		72		36
		3	24	1800		62		65		61		20
18	16,17	1	9	3000	5	98	30	99	45	94	25	20
		2	15	2400		75		77		71		18
		3	18	2200		63		66		67		12

Şekil 114'te on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliyet, güvenlik riski ve maksimum kalite değerleri gösterilmektedir. Gri kurt algoritması

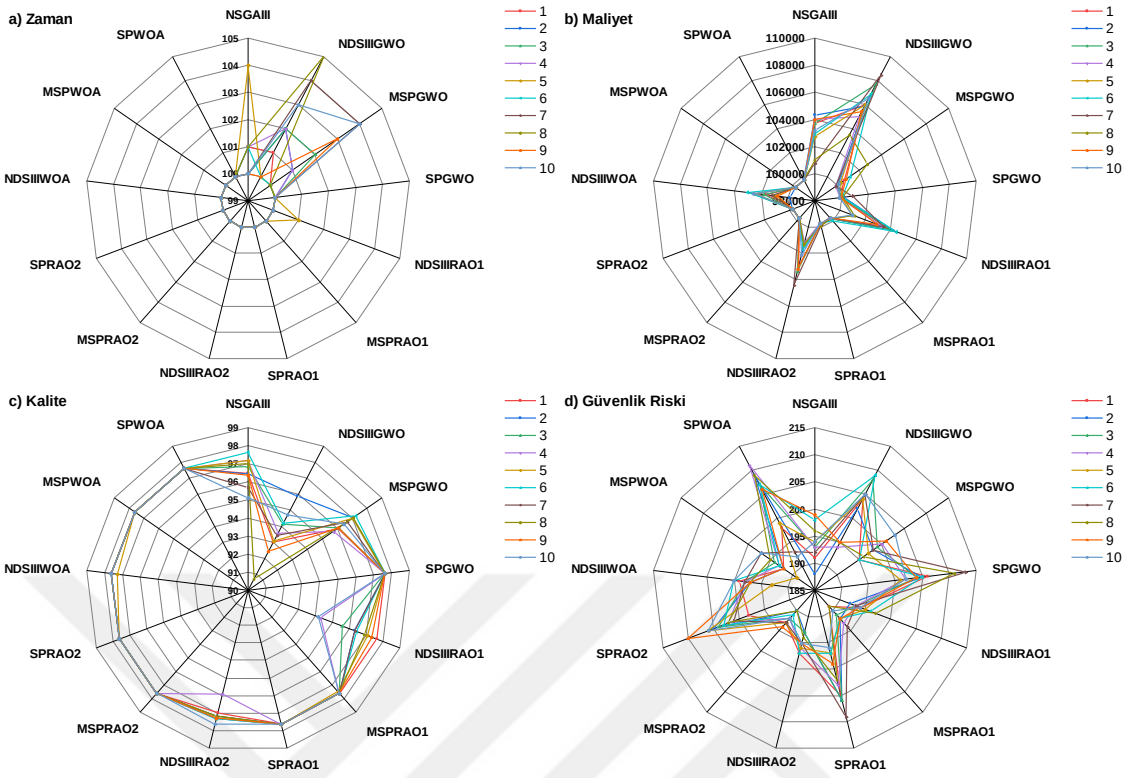
versiyonları değerlendirildiğinde, SPGWO'nun zaman kriterinde tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, diğer versiyonların daha değişken sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından SPGWO'nun daha düşük ve kararlı değerler ürettiği, NDSIIIGWO'nun ise en yüksek değerleri elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından SPGWO'nun maksimum değeri tüm bağımsız çözümlerde elde ettiği, MSPGWO'nun yüksek değerler ürettiği, NDSIIIGWO'nun ise daha düşük değerler elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından NDSIIIGWO ve MSPGWO'nun daha düşük değerler ürettiği belirlenmiştir.

Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPWOA ve SPWOA'nın tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, NDSIIIWOA'nın da kararlı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPWOA ve SPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, NDSIIIWOA'nın daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPWOA ve SPWOA tüm bağımsız çözümlerde maksimum değeri elde ederken, NDSIIIWOA'nın da kararlı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPWOA'nın diğer versiyonlara göre daha düşük ve kararlı değerler ürettiği belirlenmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MSPRAO1 ve SPRAO1'in zaman kriterinde optimum değeri tüm bağımsız çözümlerde elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO1 ve SPRAO1'in optimum değeri kararlı bir şekilde elde ettiği, NDSIIIRAO1'in ise daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından üç versiyonun da yüksek değerler ürettiği, özellikle MSPRAO1 ve SPRAO1'in maksimum değeri elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPRAO1'in en düşük değerleri ürettiği belirlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları değerlendirildiğinde, üç versiyonun da zaman kriterinde optimum değeri tüm bağımsız çözümlerde elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO2 ve SPRAO2'nin optimum değeri kararlı bir şekilde elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından üç versiyonun da maksimum değeri elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPRAO2'nin en düşük ve kararlı değerleri ürettiği belirlenmiştir.

NSGAIII algoritması ile kıyaslandığında, diğer algoritmaların daha kararlı sonuçlar ürettiği ve özellikle MSP operatörü ile geliştirilen versiyonların daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu durum, önerilen algoritmaların NSGAIII'e göre daha etkili çözümler üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 114. 18 aktiviteli TCQSRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Tablo 175-178 arasında, her bir algoritmanın farklı versiyonlarına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması verilmiştir. Tablolarda, her algoritmanın en yüksek hiper hacim değerine sahip bağımsız çözümü esas alınarak ilgili pareto çözümleri seçilmiştir. Pareto çözümlerinde, 1. ve 2. çözümler minimum zaman, 3. ve 4. çözümler minimum maliyet, 5. ve 6. çözümler maksimum kalite, 7. ve 8. çözümler minimum güvenlik riski, 9. ve 10. çözümler dengeli çözümler olarak sunulmaktadır.

Tablo 175'te, GWO algoritmasının farklı versiyonlarının 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde üç versiyon da aynı sonucu üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde SPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Maksimum kalite hedefinde de SPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum güvenlik riski açısından ise MSPGWO ve NDSIIIGWO algoritmaları birbirine yakın ve daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 175. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	SPGWO				MSPGWO				NDSIIIGWO			
	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1	100	155720	93,69	268	100	146715	87,01	270	100	136620	80,43	242
2	100	156320	93,95	274	101	133220	79,15	262	104	147090	85,82	245
3	159	100020	65,79	219	148	100650	66,12	227	152	105440	72,95	218
4	159	100720	67,31	220	156	100670	65,88	223	145	105940	71,80	206
5	100	169820	97,63	285	107	166130	96,05	279	104	159558	92,43	270
6	100	168820	97,33	278	123	165170	95,09	258	108	156355	92,10	253
7	159	117040	69,52	201	144	127548	73,57	195	139	124208	73,76	195
8	149	116420	68,16	204	141	130348	75,56	201	126	131205	78,51	204
9	128	135190	80,62	246	128	124148	71,12	225	128	122880	84,37	257
10	130	130995	75,96	219	129	125730	84,23	260	129	144108	84,56	214

18 aktiviteli TCQSRTP problemi için WOA algoritması versiyonlarının ürettiği pareto çözümleri incelendiğinde, algoritmaların zaman ve kalite hedeflerinde aynı optimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Maliyet hedefinde versiyonlar benzer performans gösterirken, güvenlik riski minimizasyonunda MSPWOA daha etkili sonuçlar üretmiştir.

Tablo 176. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	SPWOA				MSPWOA				NDSIIIWOA			
	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1	100	146820	86,61	286	100	143115	89,05	258	100	143720	88,50	267
2	100	154820	93,70	284	100	144320	89,02	255	100	146820	90,47	272
3	169	99740	65,00	215	169	99740	65,00	215	169	99890	65,66	214
4	164	100678	65,79	221	169	100628	66,55	225	161	100108	66,03	215
5	100	169820	97,63	285	100	169820	97,63	285	100	169820	97,63	285
6	100	169220	97,37	279	109	168700	97,48	292	128	166490	94,90	261
7	151	122220	71,36	193	159	122420	70,49	192	148	138350	76,26	197
8	148	117520	70,38	200	142	122420	70,74	200	157	123300	73,86	198
9	118	110920	78,36	252	118	161600	91,78	252	118	118205	81,47	246
10	119	135210	86,24	253	119	121480	85,53	259	119	134720	77,46	223

Rao-1 algoritmasının farklı versiyonlarının 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için ürettiği pareto çözümleri Tablo 177'de karşılaştırılmıştır. Minimum zaman hedefinde üç versiyon da aynı optimum değere ulaşmıştır. Minimum maliyet hedefinde SPRAO1 ve MSPRAO1 versiyonları, maksimum kalite hedefinde yine bu iki versiyon daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Minimum güvenlik riski açısından ise MSPRAO1 versiyonu öne çıkmıştır.

Tablo 177. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	SPRAO1				MSPRAO1				NDSIIIRAO1			
	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1	100	155420	89,98	263	100	139000	86,14	255	100	136720	80,51	246
2	100	158320	94,31	283	100	151370	83,60	251	100	143970	86,23	272
3	161	99870	65,29	216	169	99740	65,00	215	153	104220	68,85	207
4	148	100510	66,42	225	152	101038	65,57	215	146	104500	69,43	224
5	100	169820	97,63	285	100	169820	97,63	285	102	168058	96,32	289
6	100	168820	97,33	278	124	168315	96,74	297	105	167560	96,12	279
7	151	117350	70,47	197	159	138290	76,66	189	147	124065	73,65	192
8	148	130815	75,68	201	165	109370	71,31	192	144	141460	78,89	196
9	119	125000	79,87	245	118	164920	92,23	257	118	121570	79,43	242
10	120	146720	85,42	244	119	118540	81,48	268	119	109198	74,97	233

Tablo 178'de, Rao-2 algoritmasının farklı versiyonlarının 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için pareto çözümleri sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde üç versiyon da aynı optimum değere ulaşırken, minimum maliyet hedefinde SPRAO2 ve MSPRAO2 versiyonları öne çıkmıştır. Maksimum kalite hedefinde tüm versiyonlar aynı en iyi değeri yakalamış, minimum güvenlik riski açısından ise MSPRAO2 versiyonu daha başarılı olmuştur.

Tablo 178. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	SPRAO2				MSPRAO2				NDSIIIRAO2			
	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1	100	147070	84,42	280	100	142315	87,85	256	100	135558	78,20	248
2	100	154820	93,70	284	100	143570	87,11	250	100	150320	81,80	259
3	169	99740	65,00	215	169	99740	65,00	215	146	102110	67,21	223
4	165	100740	65,00	210	169	100740	67,43	224	142	102420	67,40	224
5	100	169820	97,63	285	100	169820	97,63	285	100	169820	97,63	285
6	100	169220	97,37	279	100	169815	97,51	285	100	167670	94,91	286
7	169	107090	69,50	201	159	123190	72,28	190	144	124160	74,54	195
8	140	124358	75,12	204	159	121940	70,40	193	141	119220	73,26	196
9	118	130050	86,61	271	118	133115	76,65	218	118	138358	78,07	216
10	120	145520	91,29	269	120	107200	72,41	255	120	104320	70,43	237

Tablo 179'da, HV açısından en yüksek ortalama performansı gösteren MSPRAO2 algoritmasının ürettiği pareto çözümleri, NSGA-III algoritmasının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tabloda, hem Panwar ve Jha (2021) tarafından sunulan NSGA-III sonuçları (yalnızca minimum değerler) hem de bu çalışma kapsamında yeniden üretilen

NSGA-III çözümleri gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre, MSPRAO2 algoritması %56 daha az fonksiyon değerlendirmesi yapmasına rağmen, NSGA-III algoritmasına kıyasla daha düşük maliyet değerlerine ulaşmayı başarmıştır. Minimum risk açısından değerlendirildiğinde bu çalışma kapsamında yeniden üretilen genetik algoritmanın daha iyi sonuç ürettiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yapılan incelemeler sonucunda NSGA-III algoritmasının, MSPRAO2 algoritmasına göre bağımsız çözümlerde daha kararsız bir performans sergilediği tespit edilmiştir.

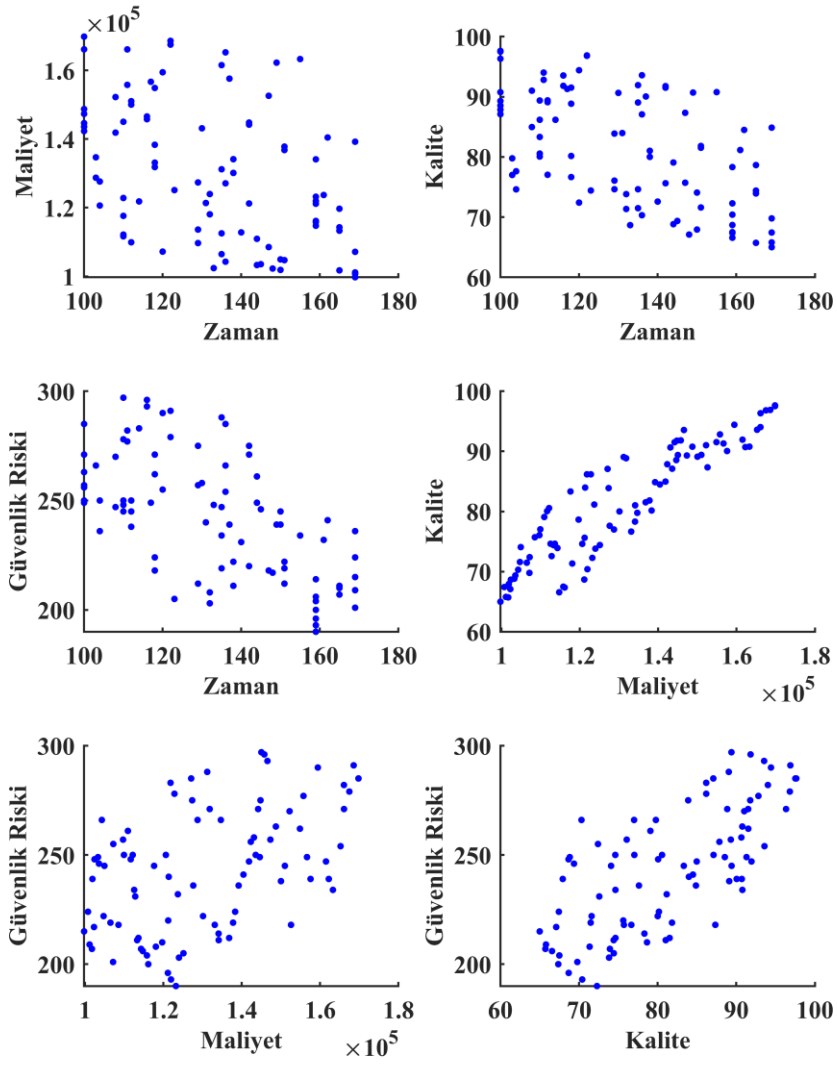
Tablo 179. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

	NSGAIII(2021)				NSGAIII (Bu çalışma)				MSPRAO2			
	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1	100	169820	97,63	285	100	135900	78,96	243	100	142315	87,85	256
2	-	-	-	-	100	140908	80,22	244	100	143570	87,11	250
3	145	100865	67,63	226	165	104340	69,95	195	169	99740	65,00	215
4	-	-	-	-	121	105160	70,11	251	169	100740	67,43	224
5	104	168820	97,63	290	100	169220	96,44	284	100	169820	97,63	285
6	-	-	-	-	100	159220	94,77	279	100	169815	97,51	285
7	144	138655	77,49	190	159	138435	76,98	188	159	123190	72,28	190
8	-	-	-	-	165	124440	75,53	192	159	121940	70,40	193
9	-	-	-	-	119	139320	80,72	219	118	133115	76,65	218
10	-	-	-	-	120	125250	74,08	219	120	107200	72,41	255

Tablo 180'de MSPRAO2 algoritması tarafından elde edilen en iyi uç noktalara ait pareto çözümleri opsiyonları ile sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 115'te pareto çözümleri gösterilmektedir.

Tablo 180. 13 Aktivite TCQSRTP için MSPRAO2 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	G.R.
Minimum Zaman	1	1,5,1,3,2,1,3,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	100	142315	87,85	256
	2	1,5,1,2,3,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1	100	143570	87,11	250
Minimum Maliyet	3	5,5,3,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,3,2,5,3,3	169	99740	65,00	215
	4	5,5,2,3,4,3,3,5,5,3,3,4,3,2,2,5,3,3	169	100740	67,43	224
Maksimum Kalite	5	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	100	169820	97,63	285
	6	1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	100	169815	97,51	285
Minimum Güvenlik Riski	7	5,5,3,3,3,2,3,5,5,3,2,4,1,2,1,2,3,3	159	123190	72,28	190
	8	5,5,3,3,3,2,3,5,5,3,3,4,1,3,1,5,3,3	159	121940	70,40	193



Şekil 115. MSPRAO2 tarafından üretilmiş 18 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski pareto grafiği

3.7.4. 18 Aktivite TCQSRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 181'de, 18 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, NSGAIII algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

NSGAIII algoritmasının GWO versiyonları ile karşılaştırması incelendiğinde, NDSIIIGWO çözümlerinin ortalama %2'sini domine ederken, NDSIIIGWO tarafından %10 oranında domine edilmiştir. SP ile geliştirilen GWO versiyonunda NSGAIII çözümlerin %20'sini domine ederken, SPGWO tarafından %4 oranında domine edilmiştir. MSP ile

geliştirilen GWO versiyonunda ise NSGAIII çözümlerin %15'ini domine ederken, MSPGWO tarafından %4 oranında domine edilmiştir.

WOA algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, NSGAIII algoritması NDSIIIWOA'nın ortalama %2'sini domine ederken, NDSIIIWOA tarafından %13 oranında domine edilmiştir. SP ile geliştirilen WOA versiyonunda NSGAIII çözümlerin %4'ünü domine ederken, SPWOA tarafından %11 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen WOA versiyonunda ise NSGAIII çözümlerin %8'ini domine ederken, MSPWOA tarafından %11 oranında domine edilmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, NSGAIII algoritması NDSIIIRAO1'in ortalama %8'ini domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %8 oranında domine edilmiştir. SPRAO1 ile karşılaştırıldığında NSGAIII çözümlerin %15'ini domine ederken, SPRAO1 tarafından %8 oranında domine edilmiştir. MSPRAO1 versiyonunda ise NSGAIII çözümlerin %8'ini domine ederken, MSPRAO1 tarafından %8 oranında domine edilmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, NSGAIII algoritması NDSIIIRAO2'nin ortalama %8'ini domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %8 oranında domine edilmiştir. SPRAO2 ile karşılaştırıldığında NSGAIII çözümlerin %11'ini domine ederken, SPRAO2 tarafından %4 oranında domine edilmiştir. MSPRAO2 versiyonunda ise NSGAIII çözümlerin %8'ini domine ederken, MSPRAO2 tarafından %9 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, algoritmaların NSGAIII ile yakın performans gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte, NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların, özellikle NDSIIIGWO (%10) ve NDSIIIWOA (%13) algoritmalarının NSGAIII'e karşı daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 181. 18 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların NSGAIII algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(NSGAIII, NDSIIIGWO)	0,0978	0,0000	0,0217	0,0254
C(NDSIIIGWO, NSGAIII)	0,2717	0,0000	0,1005	0,0611
C(NSGAIII, SPGWO)	0,3804	0,0543	0,2011	0,0762
C(SPGWO, NSGAIII)	0,1087	0,0109	0,0448	0,0253
C(NSGAIII, MSPGWO)	0,2826	0,0543	0,1518	0,0622
C(MSPGWO, NSGAIII)	0,1522	0,0000	0,0433	0,0378

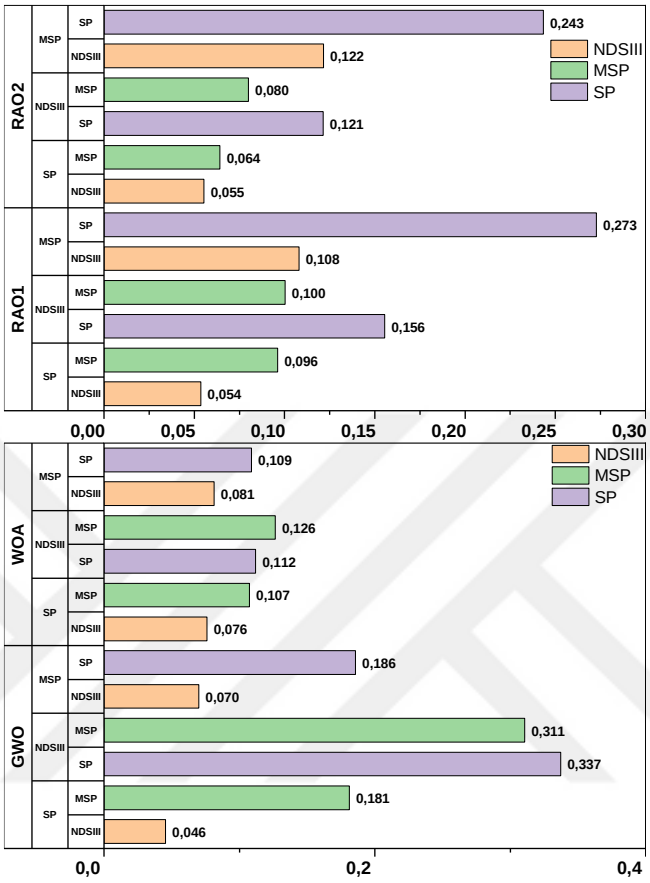
Tablo 181'in devamı

C(NSGAIII, NDSIIIWOA)	0,0978	0,0000	0,0259	0,0214
C(NDSIIIWOA, NSGAIII)	0,2935	0,0109	0,1322	0,0690
C(NSGAIII, SPWOA)	0,2065	0,0000	0,0413	0,0395
C(SPWOA, NSGAIII)	0,2391	0,0217	0,1105	0,0566
C(NSGAIII, MSPWOA)	0,2065	0,0109	0,0865	0,0486
C(MSPWOA, NSGAIII)	0,2500	0,0109	0,1117	0,0594
C(NSGAIII, NDSIIIRAO1)	0,2174	0,0000	0,0895	0,0486
C(NDSIIIRAO1, NSGAIII)	0,2283	0,0000	0,0833	0,0482
C(NSGAIII, SPRAO1)	0,2717	0,0435	0,1504	0,0470
C(SPRAO1, NSGAIII)	0,1196	0,0000	0,0372	0,0274
C(NSGAIII, MSPRAO1)	0,1413	0,0217	0,0824	0,0267
C(MSPRAO1, NSGAIII)	0,2283	0,0109	0,0877	0,0466
C(NSGAIII, NDSIIIRAO2)	0,1957	0,0109	0,0857	0,0381
C(NDSIIIRAO2, NSGAIII)	0,2500	0,0000	0,0872	0,0503
C(NSGAIII, SPRAO2)	0,2609	0,0435	0,1193	0,0440
C(SPRAO2, NSGAIII)	0,1196	0,0000	0,0407	0,0315
C(NSGAIII, MSPRAO2)	0,2065	0,0000	0,0801	0,0374
C(MSPRAO2, NSGAIII)	0,2174	0,0109	0,0974	0,0421

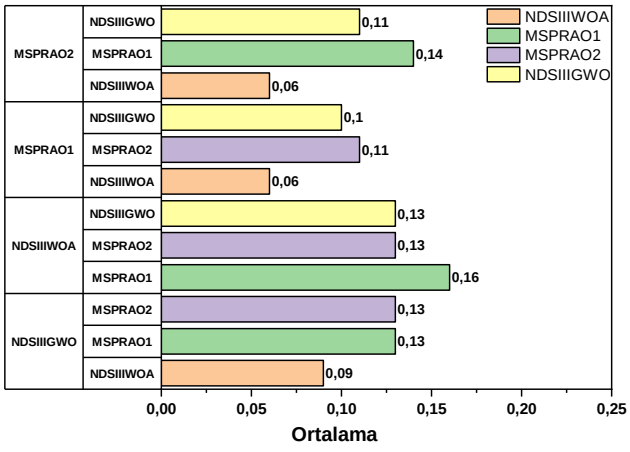
Şekil 116'da her bir algoritmanın kendi içinde versiyonlarının baskınlık karşılaştırmasına ait ortalama değerler sunulmaktadır. Yapılan incelemeler neticesinde WOA ve GWO algoritmalarında NDSIII ile geliştirilen versiyonun diğer iki versiyona göre daha baskın olduğu görülmektedir. Rao-1 ve Rao-2 algoritmasında ise MSP operatörü ile geliştirilen algoritmaların diğer iki versiyona göre daha baskın olduğu görülmüştür.

Şekil 117'de 18 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümden elde edilen ortalama C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir. NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, NDSIIIWOA'nın %9'unu, MSPRAO1'in %13'ünü ve MSPRAO2'nin %13'ünü domine ettiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması NDSIIIWOA tarafından %13, MSPRAO1 tarafından %10 ve MSPRAO2 tarafından %11 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, MSPRAO1'in %16'sını ve MSPRAO2'nin %13'ünü domine ettiği ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, NDSIIIWOA algoritması MSPRAO1 tarafından %6 ve MSPRAO2 tarafından %6 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen Rao-1 versiyonu incelendiğinde, NDSIIIWOA'nın %6'sını ve MSPRAO2'nin %11'ini domine ettiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, MSPRAO1 algoritması, MSPRAO2 tarafından %14 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm algoritmaların birbirlerine karşı benzer baskınlık oranlarına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 116. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması



Şekil 117. 18 aktivite zaman-maliyet-kalite- güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 182'de hiper hacim ve yayılım, Tablo 183'te ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 182. 18 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NSGAIII	0,8080	0,7636	0,7867	0,0145	1,0154	1,2049	1,1034	0,0582
MSPGWO	0,7756	0,6934	0,7293	0,0262	0,5593	0,7563	0,6706	0,0548
NDSIIIGWO	0,7955	0,7234	0,7619	0,0264	0,9431	1,1420	1,0430	0,0594
SPGWO	0,6821	0,6130	0,6447	0,0220	0,1528	0,2345	0,1966	0,0259
MSPWOA	0,8073	0,7349	0,7830	0,0240	0,6078	0,7568	0,6647	0,0540
NDSIIIWOA	0,8332	0,7694	0,8034	0,0170	0,9484	1,2186	1,0434	0,0945
SPWOA	0,7718	0,6880	0,7417	0,0271	0,1676	0,2472	0,2041	0,0235
MSPRAO1	0,8078	0,7915	0,8000	0,0062	0,4558	0,6978	0,5918	0,0677
NDSIIIRAO1	0,8260	0,7770	0,8019	0,0155	0,8009	1,0825	0,9056	0,0819
SPRAO1	0,7274	0,6462	0,6754	0,0241	0,1674	0,2679	0,2068	0,0340
MSPRAO2	0,8292	0,7860	0,8052	0,0150	0,4788	0,6867	0,5664	0,0667
NDSIIIRAO2	0,8174	0,7848	0,8029	0,0092	0,8266	1,0803	0,9109	0,0865
SPRAO2	0,7118	0,6532	0,6840	0,0216	0,1568	0,2543	0,1876	0,0275

Tablo 183. 18 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NSGAIII	0,9926	1,0600	1,0291	0,0178
MSPGWO	1,0654	1,1380	1,0930	0,0250
NDSIIIGWO	0,8762	0,9712	0,9178	0,0321
SPGWO	1,0829	1,1325	1,1127	0,0160
MSPWOA	1,0608	1,1315	1,1013	0,0254
NDSIIIWOA	0,9508	1,0128	0,9869	0,0173
SPWOA	1,0063	1,0947	1,0403	0,0297
MSPRAO1	1,0731	1,1179	1,1017	0,0116
NDSIIIRAO1	1,0029	1,0821	1,0391	0,0227
SPRAO1	1,0641	1,1213	1,0964	0,0157
MSPRAO2	1,0771	1,1238	1,1021	0,0140
NDSIIIRAO2	1,0267	1,0684	1,0445	0,0132
SPRAO2	1,0708	1,1175	1,0899	0,0147

Tablo 184'te performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmak ve Şekil 118'de grafiksel

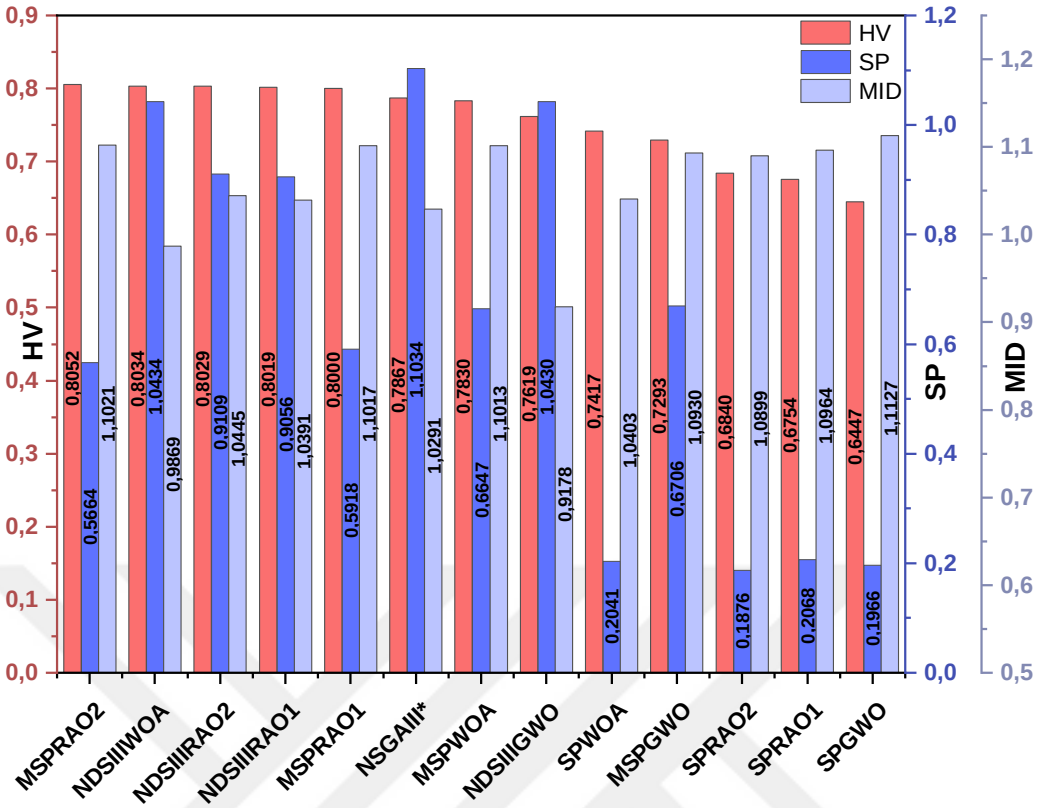
olarak sunulmaktadır. MSPRAO2 algoritmasının ürettiği HV değerleri incelendiğinde, 18 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen bu algoritmanın diğer yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPRAO2 algoritması (0.1876) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.9178) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen MSP versiyonlarının (MSPRAO2, MSPRAO1, MSPWOA), SP (güçlendirilmiş Pareto) ile geliştirilen versiyonlarına (SPRAO2, SPRAO1, SPWOA) göre çok daha iyi HV değerleri sunduğu tespit edilmiştir. MSP ile geliştirilen algoritmalar, güçlendirilmiş pareto versiyonlarına göre pareto cephesinin düzgün dağılımından (yayılım-SP) belirli oranda ödün vermiş olsalar da, hiper hacim açısından çok daha etkili sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, NDSIII ve MSP yaklaşımları ile geliştirilen WOA, RAO-1 ve RAO-2 algoritmaları %56 daha az fonksiyon değerlendirmesi (8800) kullanmalarına rağmen, Panwar ve Jha (2021) tarafından önerilen NSGA-III algoritmasına (20000) göre hem dağılım hem de hiper hacim açısından daha üstün sonuçlar üretmiştir. Bu durum, geliştirilen algoritmaların hem performans hem de hesaplama verimliliği açısından literatüre önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

Tablo 184. 18 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
MSPRAO2	8800	0,8052	0,5664	1,1021
NDSIIIWOA	8800	0,8034	1,0434	0,9869
NDSIIIRAO2	8800	0,8029	0,9109	1,0445
NDSIIIRAO1	8800	0,8019	0,9056	1,0391
MSPRAO1	8800	0,8000	0,5918	1,1017
NSGAIII*	20000	0,7867	1,1034	1,0291
MSPWOA	8800	0,7830	0,6647	1,1013
NDSIIIGWO	8800	0,7619	1,0430	0,9178
SPWOA	8800	0,7417	0,2041	1,0403
MSPGWO	8800	0,7293	0,6706	1,0930
SPRAO2	8800	0,6840	0,1876	1,0899
SPRAO1	8800	0,6754	0,2068	1,0964
SPGWO	8800	0,6447	0,1966	1,1127
*Bu Çalışma				



Şekil 118. 18 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.7.5. 180 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi

Çok amaçlı optimizasyonda kullanılan operatörlerin küçük ve orta ölçekli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemlerinin yanı sıra büyük ölçekli inşaat projelerine olan etkisini incelemek amacıyla, Tablo 174'te opsiyonları ile verilen 18 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi, 10 kat artırılarak 180 aktiviteli TCQSRTP problemine dönüştürülmüştür. 180 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi, toplamda 5,15E+97 farklı proje tamamlanma kombinasyonu içermektedir. Tüm algoritmalar 88 popülasyon, 200 iterasyon ile çözülmüştür.

Şekil 119'da on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliyet, güvenlik riski ve maksimum kalite değerleri gösterilmektedir. Gri kurt algoritması versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde tüm versiyonların birbirine yakın ancak optimum değerden uzak sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından üç versiyonun

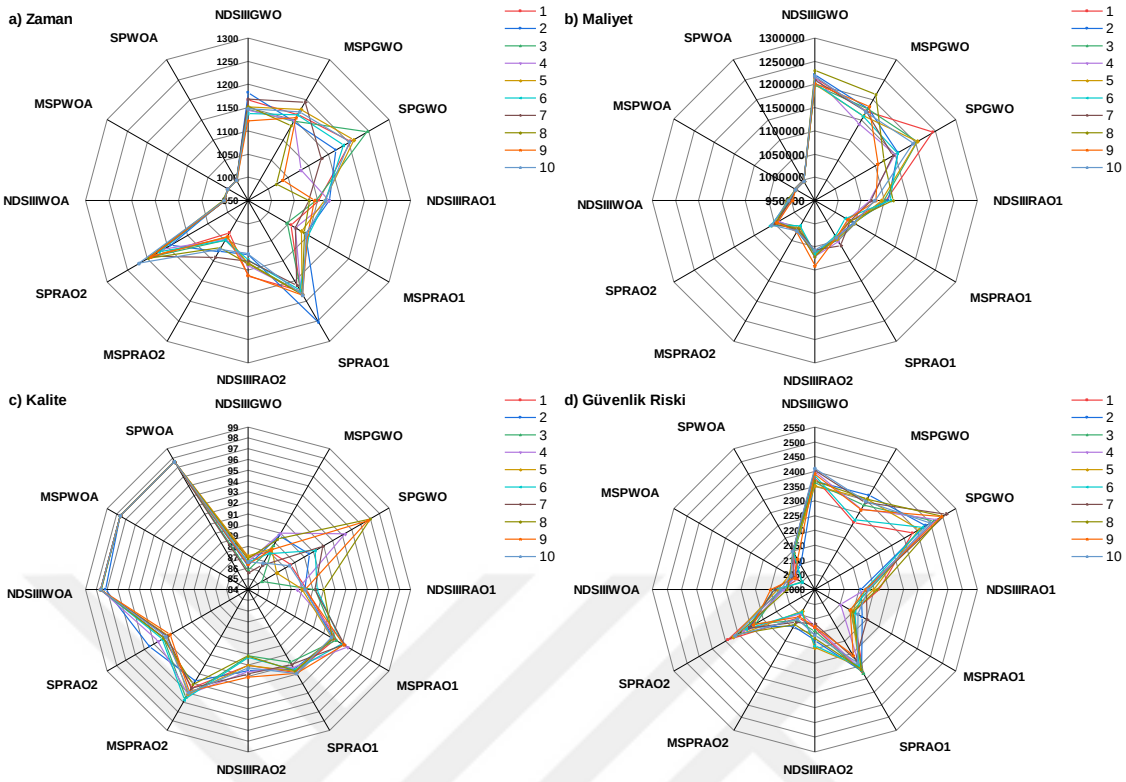
da yüksek değerler ürettiği ve değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPGWO ve SPGWO'nun daha yüksek değerler ürettiği, ancak NDSIIIGWO'nun daha düşük kalite değerleri elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPGWO'nun diğer versiyonlara göre daha düşük değerler ürettiği belirlenmiştir.

Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPWOA ve SPWOA'nın tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, NDSIIIWOA'nın da kararlı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPWOA ve SPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, NDSIIIWOA'nın daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPWOA ve SPWOA tüm bağımsız çözümlerde maksimum kalite değerini elde ederken, NDSIIIWOA'nın da yüksek kalite değerleri ürettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPWOA'nın daha düşük ve kararlı değerler ürettiği belirlenmiştir.

Rao-1 algoritması versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPRAO1'in diğer versiyonlara göre daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği, SPRAO1'in en yüksek değerleri elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO1'in en düşük ve kararlı değerleri ürettiği, NDSIIIRAO1'in ise en yüksek değerleri elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPRAO1'in en yüksek ve kararlı değerleri ürettiği, SPRAO1 ve NDSIIIRAO1'in daha düşük kalite değerleri elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPRAO1'in en düşük ve kararlı değerleri ürettiği, SPRAO1'in ise en yüksek değerleri elde ettiği belirlenmiştir.

Rao-2 algoritması versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde MSPRAO2'nin en düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği, SPRAO2'nin en yüksek değerleri elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO2'nin en düşük ve kararlı değerleri ürettiği, NDSIIIRAO2'nin ise en yüksek değerleri elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPRAO2'nin en yüksek ve kararlı değerleri ürettiği, diğer versiyonların daha düşük kalite değerleri elde ettiği gözlemlenmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPRAO2'nin en düşük ve kararlı değerleri ürettiği, SPRAO2'nin ise en yüksek değerleri elde ettiği belirlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, MSP operatörü ile geliştirilen versiyonların dört kriter açısından da daha kararlı ve başarılı sonuçlar ürettiği, özellikle MSPWOA'nın diğer algoritmalara göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 119. 180 aktiviteli TCQSRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Tablo 185'te, GWO algoritmasının farklı versiyonlarının 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için pareto çözümleri sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde (1. ve 2. çözümler) SPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde (3. ve 4. çözümler) SPGWO versiyonu en düşük değerlere ulaşmıştır. Maksimum kalite hedefinde (5. ve 6. çözümler) SPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum güvenlik riski açısından (7. ve 8. çözümler) ise MSPGWO versiyonu daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Dengeli çözümler açısından benzer sonuçlar üretmişlerdir.

Tablo 185. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPGWO				MSPGWO				NDSIIIGWO			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1037	1687426	96,79	2801	1164	1513197	87,07	2726	1137	1427206	86,57	2620
1039	1676088	96,46	2800	1179	1509881	86,44	2741	1145	1382001	85,98	2635
1294	1106643	76,48	2544	1396	1159465	76,38	2485	1366	1203375	77,79	2623
1294	1113043	76,69	2534	1375	1160591	75,91	2382	1363	1220154	77,79	2437
1037	1687426	96,79	2801	1207	1532874	87,84	2718	1137	1427206	86,57	2620

Tablo 185'in devamı

1039	1682988	96,61	2790	1229	1521341	87,39	2666	1217	1432995	86,30	2618
1278	1274161	79,44	2495	1374	1313812	78,45	2273	1282	1356729	80,43	2386
1244	1267398	79,18	2504	1395	1322827	79,76	2349	1381	1321275	80,19	2396
1300	1325763	81,69	2595	1301	1338891	84,29	2622	1306	1370005	80,93	2413
1312	1282809	81,17	2548	1309	1278266	79,21	2455	1317	1344272	81,38	2413

Tablo 186'da, WOA algoritmasının farklı versiyonlarının 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için pareto çözümleri karşılaştırılmıştır. Minimum zaman hedefinde üç versiyon da benzer sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde SPWOA ve MSPWOA aynı en düşük değere ulaşmıştır. Maksimum kalite hedefinde üç versiyon da aynı en yüksek değeri (97.63) yakalamıştır. Minimum güvenlik riski açısından MSPWOA versiyonu diğerlerine göre daha iyi performans göstermiştir. Dengeli çözümler açısından benzer sonuçlar üretmişlerdir.

Tablo 186. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPWOA				MSPWOA				NDSIIIWOA			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1000	1698200	97,63	2850	1000	1698200	97,63	2850	1002	1697950	97,60	2856
1010	1690655	97,23	2782	1000	1695700	97,55	2846	1035	1652500	95,70	2807
1690	997400	65,00	2150	1690	997400	65,00	2150	1658	1006780	65,31	2116
1678	1004878	65,71	2179	1690	1002676	65,57	2168	1550	1032028	67,34	2348
1000	1698200	97,63	2850	1000	1698200	97,63	2850	1002	1697950	97,60	2856
1010	1690655	97,23	2782	1000	1695700	97,55	2846	1035	1652500	95,70	2807
1690	997400	65,00	2150	1556	1177755	70,66	2049	1658	1006780	65,31	2116
1672	1036900	66,19	2158	1556	1167520	70,35	2057	1556	1220310	73,04	2136
1311	1237946	79,69	2458	1309	1133000	78,40	2474	1310	1466240	85,87	2416
1325	1246502	78,90	2408	1317	1502261	87,32	2600	1314	1374085	80,09	2484

Tablo 187'de, Rao-1 algoritmasının farklı versiyonlarının 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için pareto çözümleri verilmiştir. Minimum zaman hedefinde MSPRAO1 versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde MSPRAO1 en düşük değerlere ulaşmıştır. Maksimum kalite hedefinde MSPRAO1 versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum güvenlik riski açısından da MSPRAO1 versiyonu daha başarılı olmuştur.

Tablo 187. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPRAO1				MSPRAO1				NDSIIIRAO1			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1182	1585740	90,19	2685	1039	1548538	88,19	2798	1065	1614190	91,23	2801
1184	1648880	92,67	2701	1040	1512318	87,27	2752	1082	1607290	90,68	2803
1511	1046100	70,20	2322	1619	1026980	67,75	2218	1602	1056798	70,91	2178
1500	1053680	70,49	2343	1551	1034270	68,12	2246	1412	1063888	72,15	2336
1184	1648880	92,67	2701	1181	1663490	94,89	2817	1065	1614190	91,23	2801
1194	1639780	92,19	2696	1200	1643078	94,26	2786	1082	1607290	90,68	2803
1489	1084148	71,37	2300	1584	1091505	70,41	2105	1577	1101540	70,95	2155
1498	1102965	71,46	2308	1498	1253509	73,66	2173	1558	1172240	72,22	2158
1310	1412820	83,60	2559	1306	1133150	72,88	2325	1306	1142368	74,62	2427
1312	1353993	79,99	2509	1318	1081075	72,79	2540	1310	1503760	88,81	2765

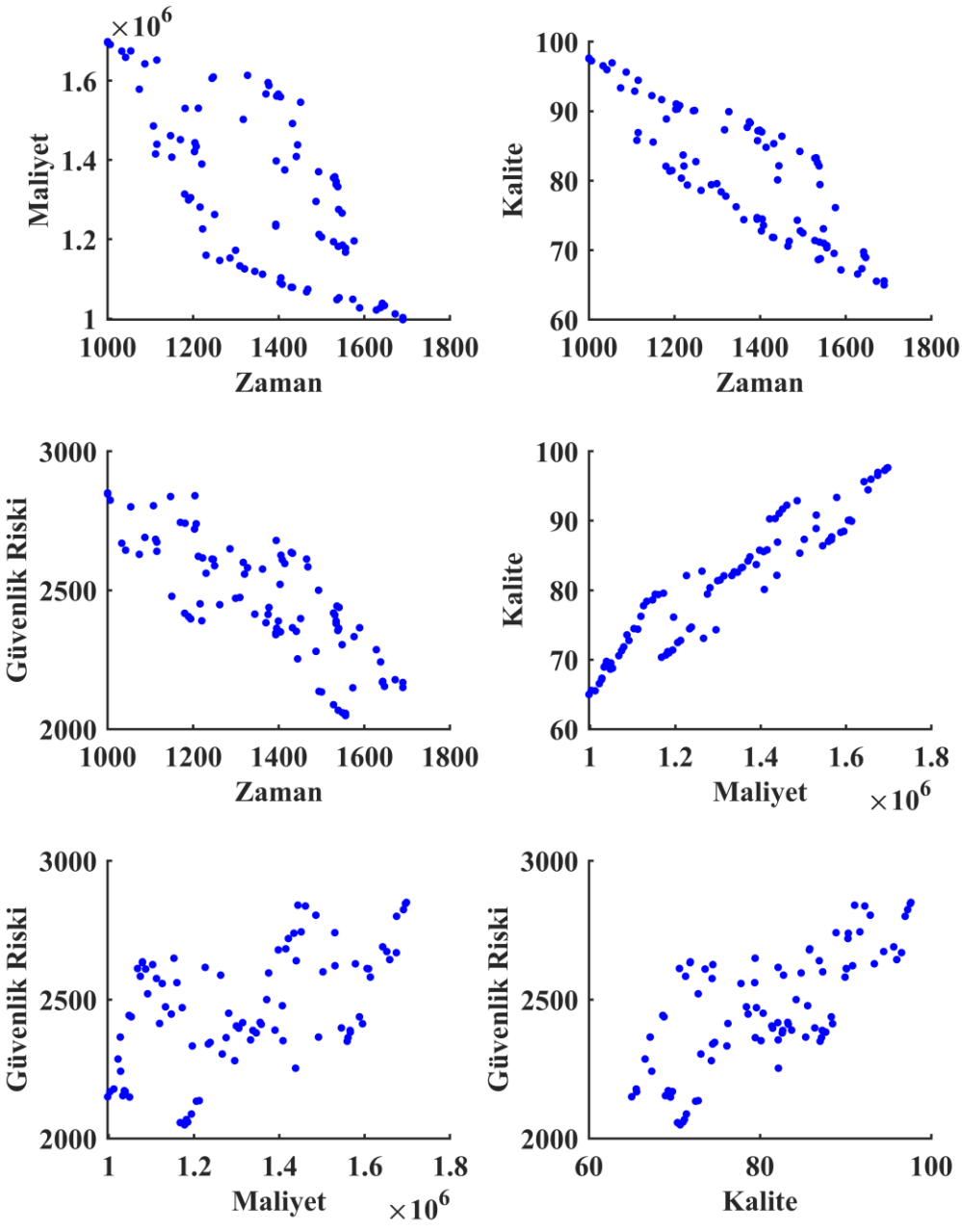
Tablo 188'de, Rao-2 algoritmasının farklı versiyonlarının 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için pareto çözümleri sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde MSPRAO2 versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde MSPRAO2 en düşük değerlere ulaşmıştır. Maksimum kalite hedefinde MSPRAO2 versiyonu diğer versiyonlara göre daha yüksek kalite değerlerine ulaşmıştır. Minimum güvenlik riski açısından da MSPRAO2 versiyonu en düşük değerlere ulaşmıştır.

Tablo 188. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

SPRAO2				MSPRAO2				NDSIIIRAO2			
Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R	Z	M	K	G.R
1143	1655540	93,66	2713	1039	1548538	88,19	2798	1065	1614190	91,23	2801
1152	1617750	92,36	2749	1040	1512318	87,27	2752	1082	1607290	90,68	2803
1495	1042580	70,08	2268	1619	1026980	67,75	2218	1602	1056798	70,91	2178
1494	1048065	70,45	2272	1551	1034270	68,12	2246	1412	1063888	72,15	2336
1186	1669250	94,51	2737	1181	1663490	94,89	2817	1065	1614190	91,23	2801
1209	1661400	93,98	2724	1200	1643078	94,26	2786	1082	1607290	90,68	2803
1512	1071188	71,14	2257	1584	1091505	70,41	2105	1577	1101540	70,95	2155
1495	1042580	70,08	2268	1498	1253509	73,66	2173	1558	1172240	72,22	2158
1308	1433440	86,24	2612	1300	1118783	74,47	2535	1306	1142368	74,62	2427
1317	1327119	80,04	2496	1306	1133150	72,88	2325	1310	1503760	88,81	2765

Pareto çözümlerinin uç noktalarını bulma kabiliyeti, çözüm uzayındaki daha dengeli dağılımı ve yüksek kaliteli çözümler üretmesi sayesinde performans ölçütlerinde en iyi ortalama HV değerini sağlayan MSPWOA algoritması, 180 aktiviteye sahip TCQSRTP problemini diğer algoritmalardan daha üstün bir şekilde çözmüştür. Tablo 189, MSPWOA algoritmasının elde ettiği uç noktalara ait Pareto çözümleri ve bu çözümler için kullanılan

opsiyonları detaylı olarak sunmaktadır. Bunun yanı sıra, Şekil 120 Pareto çözümlerinin grafiksel dağılımını görsel olarak göstermektedir.



Şekil 120. MSPWOA tarafından üretilmiş 180 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski pareto grafiği

Tablo 189. 290 Aktivite TCQETP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	Ç.E
Min. Zaman ve Maks. Kalite	1	1,1,1,

versiyonları karşılaştırıldığında, MSPWOA'nın NDSIIIWOA'yı %12 oranında, NDSIIIWOA'nın ise MSPWOA'yı %10 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, SP versiyonu NDSIIIRAO1'in %0.9'unu domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %6 oranında domine edilmiştir. SP ile MSP versiyonları karşılaştırıldığında, SPRAO1'in MSPRAO1'i %2 oranında, MSPRAO1'in ise SPRAO1'i %38 oranında domine ettiği görülmektedir. MSP ile NDSIII versiyonları karşılaştırıldığında, MSPRAO1'in NDSIIIRAO1'i %15 oranında, NDSIIIRAO1'in ise MSPRAO1'i %3 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, SP versiyonu NDSIIIRAO2'nin %1'ini domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir. SP ile MSP versiyonları karşılaştırıldığında, SPRAO2'nin MSPRAO2'yi %2 oranında, MSPRAO2'nin ise SPRAO2'yi %20 oranında domine ettiği görülmektedir. MSP ile NDSIII versiyonları karşılaştırıldığında, MSPRAO2'nin NDSIIIRAO2'yi %8 oranında, NDSIIIRAO2'in ise MSPRAO2'yi %3 oranında domine ettiği gözlemlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların GWO algoritmasında daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Diğer algoritmalarda ise MSP operatörü ile geliştirilen versiyonların daha başarılı olduğu, özellikle MSPRAO1'in SPRAO1'i %38 oranında domine etmesi göze çarpmaktadır.

Tablo 190. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

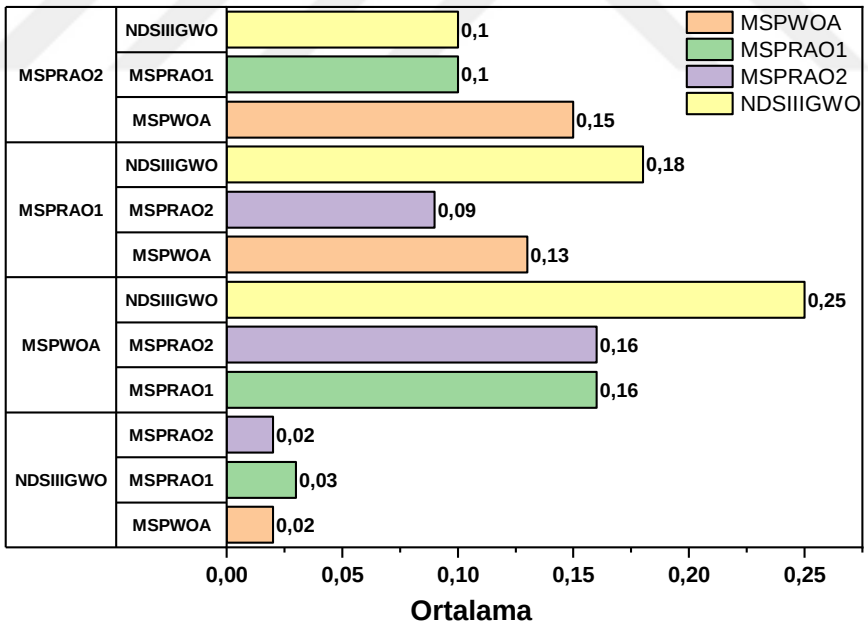
	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(SPGWO,NDSIIIGWO)	0,1196	0,0000	0,0138	0,0252
C(NDSIIIGWO, SPGWO)	0,9565	0,0326	0,4088	0,2690
C(SPGWO, MSPGWO)	0,5652	0,0000	0,1018	0,1405
C(MSPGWO, SPGWO)	0,5543	0,0000	0,1898	0,1230
C(MSPGWO, NDSIIIGWO)	0,1087	0,0000	0,0082	0,0183
C(NDSIIIGWO, MSPGWO)	0,8261	0,1087	0,3942	0,1622
C(SPWOA,NDSIIIWOA)	0,4130	0,0000	0,1047	0,0876
C(NDSIIIWOA, SPWOA)	0,2717	0,0000	0,0842	0,0573
C(SPWOA, MSPWOA)	0,2935	0,0000	0,0977	0,0605
C(MSPWOA, SPWOA)	0,2717	0,0000	0,1235	0,0646
C(MSPWOA, NDSIIIWOA)	0,3043	0,0000	0,1236	0,0798
C(NDSIIIWOA, MSPWOA)	0,3043	0,0000	0,1009	0,0585
C(SPRAO1,NDSIIIRAO1)	0,0435	0,0000	0,0092	0,0107
C(NDSIIIRAO1, SPRAO1)	0,2174	0,0000	0,0623	0,0502
C(SPRAO1, MSPRAO1)	0,0870	0,0000	0,0225	0,0191
C(MSPRAO1, SPRAO1)	0,6087	0,1522	0,3837	0,1015

Tablo 190’nın devamı

C(MSPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,2717	0,0217	0,1500	0,0531
C(NDSIIIRAO1, MSPRAO1)	0,1304	0,0000	0,0329	0,0239
C(SPRAO2,NDSIIIRAO2)	0,0761	0,0000	0,0135	0,0143
C(NDSIIIRAO2, SPRAO2)	0,1087	0,0000	0,0170	0,0255
C(SPRAO2, MSPRAO2)	0,0761	0,0000	0,0255	0,0222
C(MSPRAO2, SPRAO2)	0,4783	0,0000	0,2054	0,1052
C(MSPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,1957	0,0000	0,0848	0,0415
C(NDSIIIRAO2, MSPRAO2)	0,1739	0,0000	0,0384	0,0326

Şekil 121’de, 180 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümden elde edilen ortalama C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, MSP operatörü ile geliştirilen versiyonların NDSIIIGWO’ya göre daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Ayrıca, algoritmaların birbirlerine karşı gösterdikleri baskınlık oranları %9 ile %25 arasında değişmekte olup, en başarılı performansı MSPWOA algoritmasının gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 121. 180 aktivite zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 191'de hiper hacim ve yayılım, Tablo 192'de ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 191. 180 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MSPGWO	0,5568	0,4948	0,5288	0,0199	0,8455	0,9245	0,8968	0,0236
NDSIIIGWO	0,5301	0,4927	0,5111	0,0129	0,9787	1,0376	1,0040	0,0196
SPGWO	0,5511	0,4071	0,4807	0,0496	0,4291	0,8174	0,6743	0,1352
MSPWOA	0,7988	0,7471	0,7720	0,0188	0,5184	0,7137	0,6271	0,0592
NDSIIIWOA	0,7484	0,6830	0,7152	0,0227	1,0652	1,3192	1,1596	0,0823
SPWOA	0,7536	0,6959	0,7152	0,0193	0,1428	0,2346	0,1834	0,0267
MSPRAO1	0,7627	0,7205	0,7439	0,0128	0,6450	0,7373	0,6835	0,0315
NDSIIIRAO1	0,7291	0,6858	0,7044	0,0132	0,8905	0,9781	0,9251	0,0293
SPRAO1	0,5675	0,5405	0,5525	0,0105	0,2955	0,4150	0,3617	0,0329
MSPRAO2	0,8063	0,7177	0,7583	0,0288	0,5872	0,7011	0,6424	0,0369
NDSIIIRAO2	0,7661	0,7275	0,7467	0,0148	0,8209	0,9156	0,8755	0,0281
SPRAO2	0,5969	0,5477	0,5739	0,0142	0,3152	0,4376	0,3674	0,0417

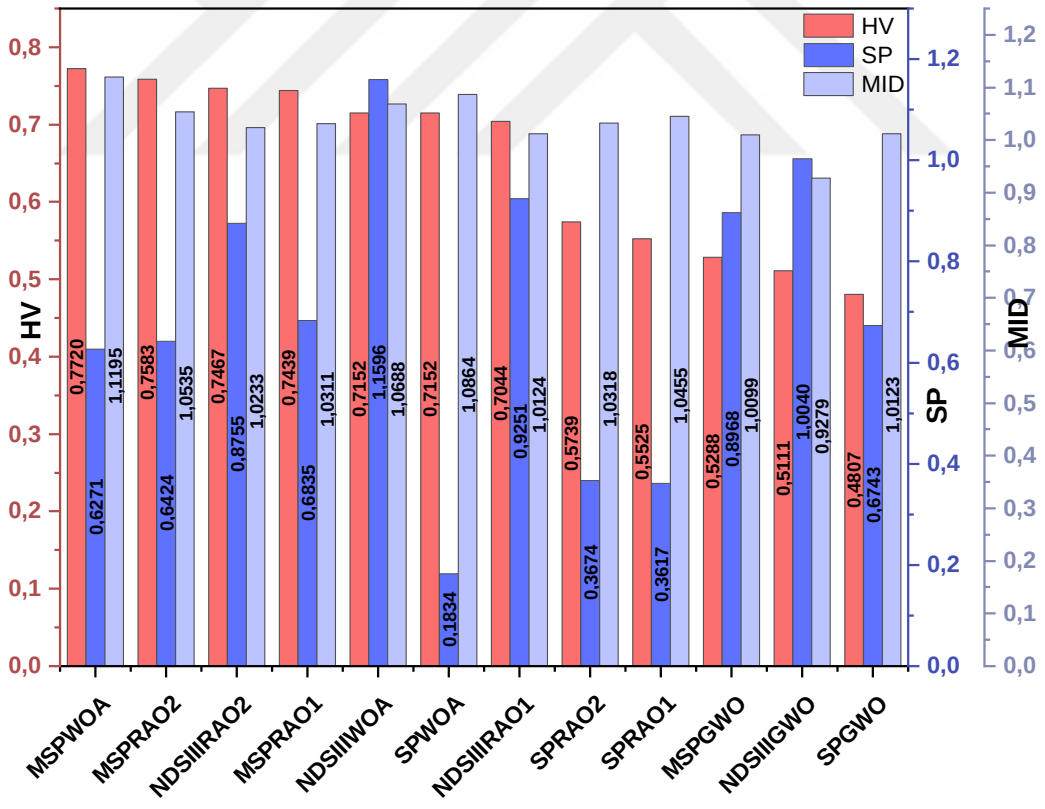
Tablo 192. 180 aktivite TCQSRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
MSPGWO	0,9860	1,0277	1,0099	0,0137
NDSIIIGWO	0,8824	0,9507	0,9279	0,0211
SPGWO	0,9686	1,0488	1,0123	0,0234
MSPWOA	1,0914	1,1428	1,1195	0,0191
NDSIIIWOA	1,0455	1,0861	1,0688	0,0138
SPWOA	1,0604	1,1055	1,0864	0,0147
MSPRAO1	1,0102	1,0749	1,0311	0,0186
NDSIIIRAO1	0,9917	1,0292	1,0124	0,0126
SPRAO1	1,0316	1,0619	1,0455	0,0110
MSPRAO2	1,0397	1,0727	1,0535	0,0097
NDSIIIRAO2	1,0069	1,0404	1,0233	0,0125
SPRAO2	1,0102	1,0507	1,0318	0,0129

Tablo 193'te performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmakta ve Şekil 122'de grafiksel olarak sunulmaktadır. MSPWOA algoritmasının ürettiği HV değerleri incelendiğinde, 180 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen bu

algoritmanın diğer yaklaşımlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu SPWOA algoritması (0.1834) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.9279) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyonunda farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen MSP (modifiye güçlendirilmiş pareto) versiyonlarının (MSPWOA, MSPRAO2, MSPRAO1), SP (Güçlendirilmiş Pareto) ile geliştirilen versiyonlarına (SPWOA, SPRAO2, SPRAO1) göre çok daha iyi HV değerleri sunduğu tespit edilmiştir. MSPWOA algoritması, özellikle HV metriğinde en iyi performansı sergileyerek, 180 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemi için etkili bir çözüm yaklaşımı sunduğunu kanıtlamıştır.



Şekil 122. 180 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

Tablo 193. 180 aktivite TCQSRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
MSPWOA	17600	0,7720	0,6271	1,1195
MSPRAO2	17600	0,7583	0,6424	1,0535
NDSIIIRAO2	17600	0,7467	0,8755	1,0233
MSPRAO1	17600	0,7439	0,6835	1,0311
NDSIIIWOA	17600	0,7152	1,1596	1,0688
SPWOA	17600	0,7152	0,1834	1,0864
NDSIIIRAO1	17600	0,7044	0,9251	1,0124
SPRAO2	17600	0,5739	0,3674	1,0318
SPRAO1	17600	0,5525	0,3617	1,0455
MSPGWO	17600	0,5288	0,8968	1,0099
NDSIIIGWO	17600	0,5111	1,0040	0,9279
SPGWO	17600	0,4807	0,6743	1,0123

3.7.7. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Problemleri Genel Değerlendirme

Bu bölümde, çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan algoritmaların ve operatörlerin genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. Rao serileri, Gri Kurt Optimizasyonu ve Balina Optimizasyonu algoritmaları SP, MSP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleriyle geliştirilmiş ve performansları 13, 18 ve 180 aktiviteli projeler üzerinde detaylı olarak incelenmiştir.

13 aktiviteli problemde MSPRAO2 ve NDSIIIGWO algoritmaları 0.8733 hiper hacim değeri ile en iyi performansı göstermiştir. Yayılım açısından SPRAO2 algoritması 0.5936 değeri ile en iyi sonucu verirken, ortalama ideal mesafede NDSIIIGWO algoritması 1.1169 değeri ile öne çıkmıştır. Geliştirilen algoritmalar, literatürde bulunan MOPSO algoritmasına göre %40 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanmasına rağmen daha iyi sonuçlar üretmeyi başarmıştır.

18 aktiviteli problemde, MSPRAO2 algoritması 0.8052 hiper hacim değeri ile en iyi performansı sergilerken, yayılım açısından SPWOA algoritması 0.1834 değeri ile başarılı olmuştur. Ortalama ideal mesafede ise NDSIIIGWO algoritması 0.9178 değeri ile en iyi sonucu elde etmiştir. Bu problem boyutunda NDSIII ve MSP yaklaşımları ile geliştirilen algoritmalar, NSGA-III algoritmasına göre %56 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanmasına rağmen daha başarılı sonuçlar üretmiştir.

180 aktiviteli büyük ölçekli problemde MSPWOA algoritması 0.7720 hiper hacim değeri ile en iyi performansı göstermiştir. Yayılım açısından SPWOA algoritması 0.1834 değeri ile başarılı olurken, ortalama ideal mesafede NDSIIIGWO algoritması 0.9279 değeri ile öne çıkmıştır. Büyük ölçekli problemde özellikle MSP operatörü ile geliştirilen versiyonların daha kararlı ve başarılı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Algoritmalar açısından değerlendirildiğinde, WOA ve Rao-2 algoritması özellikle tüm problemlerde tutarlı ve yüksek performans gösterirken, GWO algoritması ideal noktaya yakın çözümler üretmede başarılı olmuştur. Rao-1 algoritması ise küçük ve orta ölçekli problemlerde daha etkili sonuçlar vermiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen MSP operatörü, SP'nin seçim mekanizmasını geliştirerek önemli avantajlar sağlamıştır. MSP ile geliştirilen algoritmalar, SP versiyonlarına göre yayılım açısından belirli oranda ödün vermiş olsalar da hiper hacim ve C-metrik değerleri açısından çok daha iyi sonuçlar üretmiştir. MSP operatörünün bir diğer önemli avantajı, özellikle büyük ölçekli problemlerde daha kararlı ve tutarlı sonuçlar üretmesidir. Ayrıca literatürdeki algoritmalara göre daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak daha başarılı sonuçlar elde etmesi, hesaplama verimliliği açısından da önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Operatörlerin etkisi incelendiğinde, MSP operatörü özellikle büyük ölçekli problemlerde daha başarılı olurken, NDSIII operatörü ideal noktaya yakın çözümler üretmede öne çıkmıştır. SP operatörü ise yayılım açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. SP ile geliştirilen algoritmalar yayılım açısından iyi sonuçlar üretmesine rağmen, çözüm kalitesi açısından MSP ve NDSIII operatörlerinin gerisinde kalmıştır. MSP ile geliştirilen algoritmalar, SP ile geliştirilen algoritmalara göre yayılım açısından ödün vermiş olsa da hiper hacim ve C-metrik değerleri açısından çok daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Her problem boyutunda performans ölçütlerinde farklı algoritmaların öne çıkması, problem karakteristiklerine göre algoritmaların ve operatörlerin performanslarının değiştiğini göstermektedir. Özellikle MSP ve NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonların literatürdeki algoritmalara göre daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu durum, geliştirilen algoritmaların hem performans hem de hesaplama verimliliği açısından literatüre önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

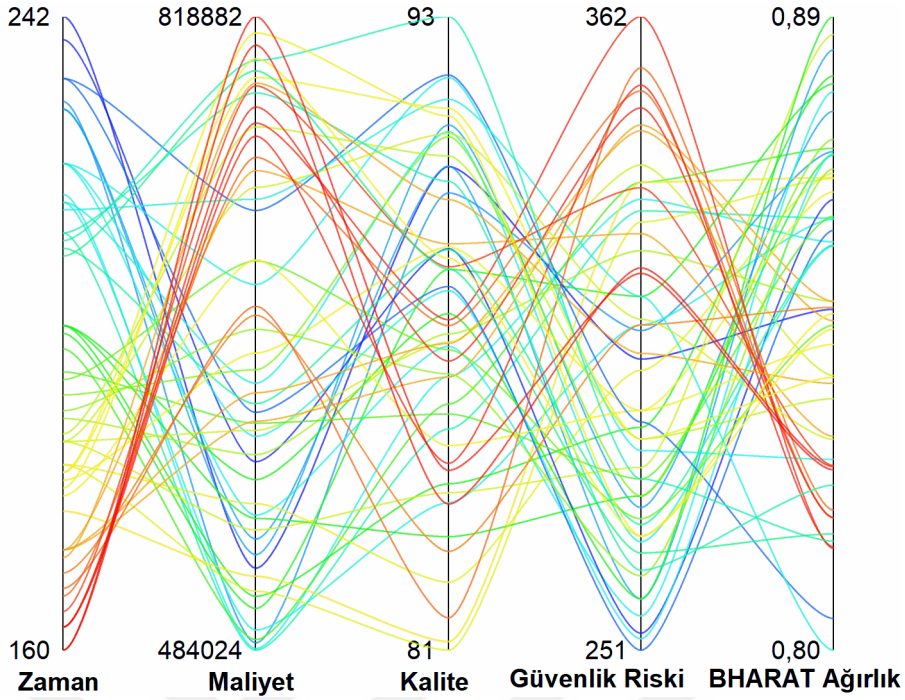
3.7.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Güvenlik Riski Optimizasyonunda Bharat ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi

Bu bölümde, 13, 18 ve 180 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski optimizasyon problemlerinin çözümleri neticesinde elde edilen pareto çözümleri arasından en uygun alternatiflerin belirlenmesi amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Her bir problem kategorisinde en iyi performansı gösteren algoritmanın pareto çözümleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu doğrultuda, 13 aktiviteli problem için MSPRAO2, 18 aktiviteli problem için MSPRAO2 ve 180 aktiviteli problemler için MSPWOA algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümleri kullanılmıştır. Analiz sürecinde zaman, maliyet, kalite ve güvenlik riski kriterlerine eşit önem verilmiş ve her dört kriter eşit ağırlıkta (wt=wc=wq=ws=0.25) değerlendirilmiştir. BHARAT yöntemi kullanılarak her bir problem kategorisi için en iyi üç alternatif belirlenmiştir. Bu sayede proje yöneticilerine yönelik sistematik bir karar destek mekanizması oluşturulmuştur.

Şekil 123'te 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite ve güvenlik riski değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 160-242 gün aralığında, maliyetlerin 484024-818882 aralığında, kalite değerlerinin 81-93 aralığında ve güvenlik riski değerlerinin 251-362 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.80-0.89) ilişkilendirilmektedir. BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 194'te gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen opsiyonlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri, güvenlik riski değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır.

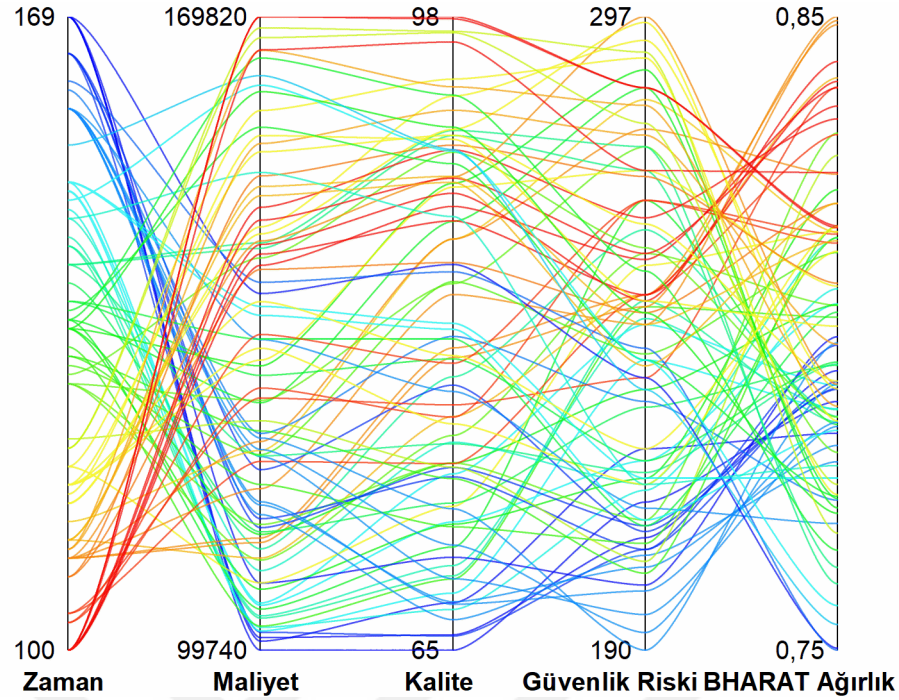
Tablo 194. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	Güvenlik Riski	BHARAT Ağrılık
1	1,1,2,1,2,1,1,1,2,1,2,1,1	202	574131,90	87,08	260	0,8852
2	2,1,2,1,2,1,2,1,4,1,1,1,1	187	547462,62	83,75	283	0,8828
3	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	230	542853,76	89,82	260	0,8807



Şekil 123. 13 aktiviteli TCQSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Şekil 124'te 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite ve güvenlik riski değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 100-169 gün aralığında, maliyetlerin 99740-169820 aralığında, kalite değerlerinin 65-98 aralığında ve güvenlik riski değerlerinin 190-297 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 195'te gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen opsiyonlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri, güvenlik riski değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, kriterlerin eşit ağırlıkta kullanılması durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 110 gün sürede tamamlanıp 111650$ maliyet, 80.06 kalite değeri ve 248 güvenlik riski değeri ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.8471 olarak hesaplanmıştır.

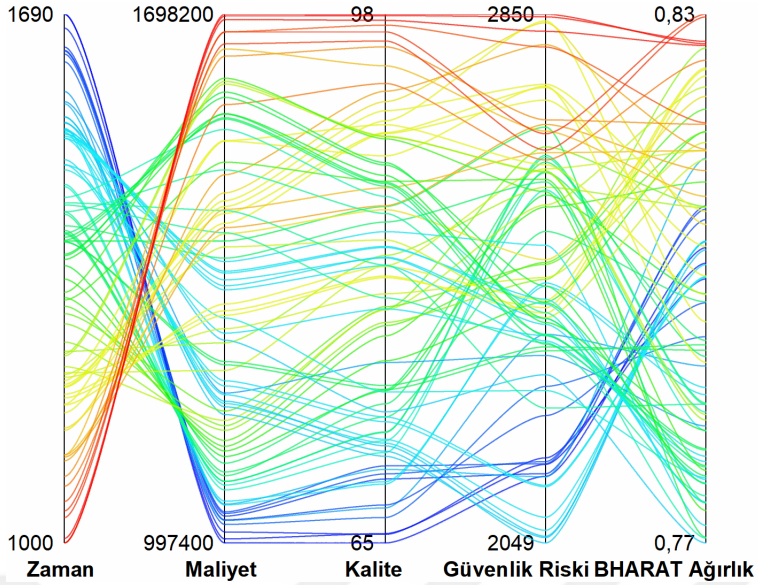


Şekil 124. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 195. 18 aktiviteli TCQSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	Güvenlik Riski	BHARAT Ağrılık
1	1,5,1,3,4,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,2,1,1	110	111650	80,06	248	0,8471
2	1,3,1,3,3,3,3,2,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1	110	117615	83,32	245	0,8465
3	1,4,1,3,4,3,3,4,1,1,3,1,1,1,1,2,1,1	110	112158	80,56	250	0,8459

Şekil 125'te 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite ve güvenlik riski değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 1000-1690 gün aralığında, maliyetlerin 997400-1698200 aralığında, kalite değerlerinin 65-98 aralığında ve güvenlik riski değerlerinin 2049-2850 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.77-0.83) ilişkilendirilmektedir. BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 196'da gösterilmiştir.



Şekil 125. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

Tablo 196. 180 aktiviteli TCQSRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	Güvenlik Riski	BHARAT Ağırlık
1	2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1, 1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,2,1,1,2,2,1, 1,1,1,1,1,2,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1, 2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2, 1,1,1,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1, 2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,2,2,1,1,1, 1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,2,1, 1,2,2,1,1,2,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1	1033	1674430	96,53	2669	0,8301
2	2,2,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,2, 1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,2,1,1,2,2,1, 1,2,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1, 2,1,1,2,2,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2, 1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,2,1,1, 2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1, 1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1, 1,2,2,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1,1,2,1,1	1042	1658800	95,97	2644	0,8297
3	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1, 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1

3.8. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemleri

Çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski ödünleşim (TCQESRTP) problemlerinin incelenmesi kapsamında, 25 ve 250 aktiviteli projeler üzerinde algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi Sharma ve Trivedi (2023b) tarafından karşıt tabanlı baskın olmayan sıralama genetik algoritma III (OBNSGAIII) ile çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski ödünleşim problemlerini derinlemesine incelemek amacıyla Rao serileri, Gri kurt optimizasyonu (GWO) ve Balina optimizasyonu algoritması (WOA) kullanılmıştır. Bu algoritmalar ayrı ayrı operatörleri değiştirilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) ve NDSIII çok amaçlı seçim ve eleme operatörleri ile geliştirilmiştir. Dört amaçlı problemlerde güçlendirilmiş pareto operatörünün (SP), MSP ve NDSIII operatörlerine göre tüm problemlerde hiper hacim açısından geride kalması sebebiyle beş amaçlı problemlerde incelemesi yapılmamıştır.

Ayrıca, geliştirilen algoritmaların 25 aktiviteli TCQESRTP problemleri üzerindeki performanslarını daha doğru bir şekilde değerlendirebilmek için, literatürde kullanılan OBNSGAIII algoritması yeniden kodlanarak test edilmiştir. Bu algoritma, karşıt tabanlı baskın olmayan sıralama genetik algoritması olup, çok amaçlı seçim ve eleme işlemlerinde referans tabanlı baskın olmayan sıralama yöntemini temel almaktadır. OBNSGAIII algoritmasıyla ilgili detaylı bilgilere Sharma ve Trivedi'nin (2023b) çalışmasına başvurulabilir.

Son olarak, geliştirilen algoritmaların büyük ölçekli projelerdeki performansını analiz etmek amacıyla, 25 aktiviteli proje on kat büyütülerek 250 aktiviteye genişletilmiştir. Bu sayede, kullanılan optimizasyon algoritmalarının ve çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin büyük ölçekli TCQESRTP problemi üzerindeki performans değişimleri incelenmiştir. Algoritmaların etkinliği, C-metrik, hiper hacim, yayılım ve ortalama ideal mesafe gibi performans kriterleri üzerinden detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

3.8.1. 25 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi

25 aktiviteye sahip zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski ödünleşim problemi, ilk olarak Marzouk vd. (2008) tarafından zaman-maliyet-çevresel etki problemi

olarak ele alınmıştır. Daha sonra, Sharma ve Trivedi (2023b) bu probleme kalite ve güvenlik riski kriterlerini ekleyerek 25 aktiviteli projeyi TCQESRTP formatına dönüştürmüştür. Sharma ve Trivedi (2023), TCQESRTP problemini çözmek için karşıt tabanlı baskın olmayan sıralama genetik algoritma III (OBNSGAIII) yöntemini, 256 bireyden oluşan bir popülasyon ve 100 iterasyon kullanarak test etmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında, Rao serileri, Gri Kurt algoritması ve Balina algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalarda kullanılan çok amaçlı seçim ve eleme operatörlerinin optimizasyon sürecindeki etkisini araştırmak amacıyla güçlendirilmiş pareto yönteminin parametrelerinin değiştirilmiş hali (MSP) ve referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörleri ile ayrı ayrı geliştirilmiştir. Her bir algoritma için popülasyon boyutu 128, iterasyon sayısı ise 150 olarak belirlenmiştir. Böylece, literatürdeki OBNSGAIII algoritması ile karşılaştırıldığında %50 daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha yüksek performans göstermesi hedeflenmiştir.

25 aktiviteli problem, toplamda 53,747,712 farklı proje tamamlanma opsiyonu sahiptir. Probleme ait aktiviteler arası öncülük ilişkileri ve zaman-maliyet-çevresel etki opsiyonları Tablo 197'de gösterilmektedir.

Tablo 197. 25 Aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel eti-güvenlik riski opsiyonları

Akt.	Öncül	Mod	Z.	M.	K.	Ç.E.	G.R.
1		1	20	40000	0,84	4,57	1,49
		2	18	50400	0,92	5,58	3,39
		3	15	54000	0,78	5,04	3,73
		4	14	58800	0,74	5,83	4,79
2	1	1	7	25400	0,81	4,33	4,82
		2	5	29000	0,86	5,35	2,79
		3	4	31000	0,84	5,68	3,85
3	2	1	140	15000	0,89	1,17	3,79
4	3	1	3	20000	0,92	1,10	3,43
		2	1	20800	0,82	1,14	4,10
5	4	1	3	38000	0,9	1,14	2,71
		2	2	39000	0,87	1,16	2,11
		3	1	39400	0,81	1,18	3,58
6	5	1	1	28000	0,87	4,88	3,96
7	6	1	5	8000	0,85	1,14	3,80
		2	3	9000	0,82	1,16	4,28
		3	2	10000	0,78	1,18	2,18
8	7	1	7	76000	0,86	1,14	4,25
		2	5	77200	0,85	1,16	4,67
		3	3	77600	0,83	1,18	3,39
		4	2	78000	0,84	1,20	3,79

Tablo 197’nin devamı

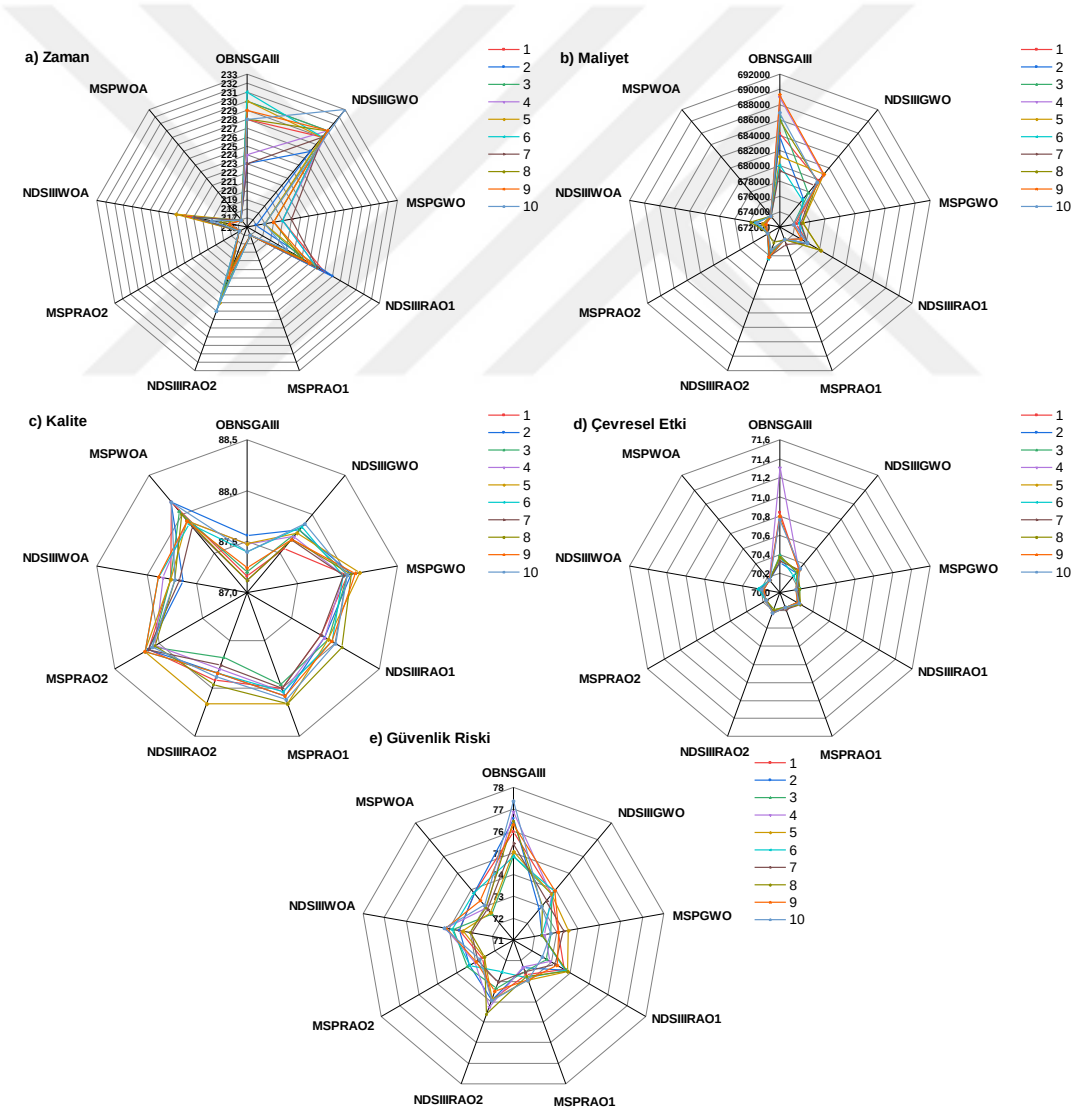
9	8	1	4	50000	0,82	4,88	3,72
		2	3	55000	0,8	4,90	2,96
		3	2	60000	0,79	4,92	3,28
10	9	1	10	6000	0,86	1,14	2,86
		2	8	6800	0,85	1,16	3,53
		3	5	8000	0,89	1,18	3,16
11	10	1	3	26000	0,92	1,14	2,38
		2	2	26500	0,88	1,16	2,23
		3	1	27000	0,87	1,18	1,49
12	11	1	1	20000	0,91	4,88	4,12
13	12	1	8	16000	0,9	4,16	3,47
		2	5	20000	0,89	6,00	3,59
14	13	1	15	30000	0,89	4,57	4,75
		2	12	34000	0,86	5,58	2,17
		3	10	36000	0,84	5,04	2,19
15	14	1	5	19000	0,87	4,33	2,91
		2	3	24000	0,85	5,68	3,83
16	15	1	2	16000	0,82	1,10	3,98
		2	1	16400	0,84	1,12	2,93
17	16	1	2	35400	0,85	1,14	2,45
		2	1	36000	0,83	1,16	2,23
18	17	1	1	24000	0,9	4,88	3,23
19	18	1	3	7000	0,83	1,14	3,55
		2	2	8000	0,86	1,16	3,77
20	19	1	5	70000	0,81	1,14	2,38
		2	3	72000	0,95	1,16	3,40
		3	2	75000	0,84	1,18	3,28
21	20	1	3	40000	0,92	4,88	2,81
		2	2	45000	0,86	4,90	3,59
22	21	1	8	6000	0,87	1,14	2,49
		2	5	6800	0,82	1,16	4,80
23	22	1	3	24000	0,87	1,14	2,70
		2	2	24800	0,82	1,16	2,93
24	23	1	1	18000	0,83	4,88	3,12
25	24	1	8	16000	0,88	4,16	3,76

Şekil 126’da on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliyet, çevresel etki, güvenlik riski ve maksimum kalite değerleri gösterilmektedir.

Gri kurt algoritması versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde MSPGWO’nun daha düşük değerler ürettiği, NDSIIIGWO’nun ise daha yüksek değerler elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPGWO’nun daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği, NDSIIIGWO’nun ise daha yüksek değerler elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPGWO’nun NDSIIIGWO’ya göre daha yüksek değerler ürettiği

gözlemlenmiştir. Çevresel etki ve güvenlik riski bakımından MSPGWO'nun NDSIIIGWO'ya göre daha düşük ve kararlı değerler ürettiği belirlenmiştir.

Balina optimizasyon algoritması (WOA) versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPWOA'nın tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, NDSIIIWOA'nın ise daha yüksek değerler ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, NDSIIIWOA'nın daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPWOA'nın daha yüksek ve kararlı değerler ürettiği, NDSIIIWOA'nın ise daha düşük değerler elde ettiği gözlemlenmiştir. Çevresel etki ve güvenlik riski bakımından MSPWOA'nın NDSIIIWOA'ya göre daha düşük ve kararlı değerler ürettiği belirlenmiştir.



Şekil 126. 25 aktiviteli TCQESRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPRAO1'in tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, NDSIIIRAO1'in ise daha yüksek değerler ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO1'in daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği, NDSIIIRAO1'in ise daha yüksek değerler elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPRAO1'in daha yüksek değerler ürettiği gözlemlenmiştir. Çevresel etki ve güvenlik riski bakımından MSPRAO1'in NDSIIIRAO1'e göre daha düşük ve kararlı değerler ürettiği belirlenmiştir. Rao-2 algoritmasının versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde MSPRAO2'nin tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, NDSIIIRAO2'nin ise daha yüksek değerler ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPRAO2'nin daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPRAO2'nin daha yüksek değerler ürettiği gözlemlenmiştir. Çevresel etki ve güvenlik riski bakımından MSPRAO2'nin NDSIIIRAO2'ye göre daha düşük ve kararlı değerler ürettiği belirlenmiştir. OBNSGA III algoritması ile kıyaslandığında, özellikle MSP operatörü ile geliştirilen versiyonların beş kriter açısından da daha kararlı ve başarılı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Tablo 198-201 arasında, her bir algoritmanın farklı versiyonlarına ait Pareto çözümlerinin karşılaştırması sunulmaktadır. Bu tablolarda, algoritmaların en yüksek hiper hacim değerine sahip bağımsız çözümleri temel alınarak ilgili Pareto çözümleri seçilmiştir. Pareto çözümleri, belirli hedeflere göre gruplandırılmıştır: 1. ve 2. çözümler minimum zamanı, 3. ve 4. çözümler minimum maliyeti, 5. ve 6. çözümler maksimum kaliteyi, 7. ve 8. çözümler minimum çevresel etkiyi, 9. ve 10. çözümler ise minimum güvenlik riskini temsil etmektedir.

Tablo 198'de, GWO algoritmasının farklı versiyonlarının 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde (1. ve 2. çözümler), MSPGWO versiyonu diğer versiyonlara göre daha iyi performans göstermiştir. Minimum maliyet hedefinde (3. ve 4. çözümler), her iki versiyon da benzer sonuçlar üretmiş olsa da, MSPGWO daha iyi bir değer sağlamıştır. Maksimum kalite hedefinde (5. ve 6. çözümler), her iki versiyon da yakın sonuçlara ulaşmış, ancak MSPGWO daha yüksek kalite değeri sunmuştur. Minimum çevresel etki açısından (7. ve 8. çözümler), MSPGWO versiyonu daha üstün sonuçlar elde ederken, minimum güvenlik riski hedefinde (9. ve 10. çözümler) iki versiyon da benzer bir performans sergilemiştir.

Tablo 198. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	MSPGWO					NDSIIIGWO				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	219	743600	84,48	83,88	76,55	227	718800	84,92	82,14	73,84
2	220	738800	84,64	82,82	75,76	229	715200	86,36	81,17	76,76
3	265	675000	86,80	82,55	70,21	261	676800	86,52	80,13	70,27
4	265	675400	86,80	82,30	70,21	256	681000	87,52	83,62	70,31
5	260	691200	88,04	82,99	72,26	251	692200	87,80	84,64	71,36
6	260	688800	87,80	85,44	71,26	251	698000	87,60	80,12	73,33
7	250	693000	86,04	72,32	72,40	244	695800	85,96	72,85	72,46
8	251	692400	86,12	72,54	72,38	242	696200	85,80	73,69	72,50
9	265	675400	86,80	82,30	70,21	261	676800	86,52	80,13	70,27
10	265	675000	86,80	82,55	70,21	256	681000	87,52	83,62	70,31

Tablo 199'da, WOA algoritmasının farklı versiyonlarının TCQESRTP problemi için pareto çözümleri karşılaştırılmıştır. Minimum zaman hedefinde MSPWOA versiyonu daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde iki versiyon da aynı değerlere ulaşmıştır. Maksimum kalite hedefinde versiyonlar benzer performans gösterirken, minimum çevresel etki hedefinde NDSIIIWOA biraz daha başarılı olmuştur. Minimum güvenlik riski açısından iki versiyon da aynı sonuçları üretmiştir.

Tablo 199. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	MSPWOA					NDSIIIWOA				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	217	746000	84,44	85,34	76,90	222	733200	85,04	82,35	75,18
2	218	743000	84,88	85,46	76,88	224	729600	84,84	84,38	74,16
3	268	673800	86,76	82,93	70,17	268	673800	86,76	82,93	70,17
4	267	674800	86,64	82,33	70,19	265	676200	87,40	82,90	70,21
5	255	693200	88,16	83,29	72,30	256	690200	87,68	84,34	71,32
6	257	682800	87,84	81,39	71,29	258	698800	87,64	80,48	73,25
7	243	696800	86,08	73,07	72,48	241	700000	86,24	72,96	74,30
8	240	700800	86,04	73,19	74,32	242	697400	86,12	73,04	71,92
9	268	673800	86,76	82,93	70,17	268	673800	86,76	82,93	70,17
10	267	674800	86,64	82,33	70,19	265	676200	87,40	82,90	70,21

Tablo 200'de, RAO1 algoritmasının farklı versiyonlarının pareto çözümleri sunulmuştur. Minimum zaman hedefinde MSPRAO1 versiyonu daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde MSPRAO1 daha düşük değerlere ulaşmıştır. Maksimum kalite hedefinde iki versiyon da benzer performans göstermiştir. Minimum çevresel etki hedefinde MSPRAO1 daha başarılı olurken, minimum güvenlik riski açısından iki versiyon da benzer sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 201'de, RAO2 algoritmasının farklı versiyonlarının pareto çözümleri verilmiştir. Minimum zaman hedefinde MSPRAO2 versiyonu daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet hedefinde MSPRAO2 daha düşük değerlere ulaşmıştır. Maksimum kalite hedefinde iki versiyon da benzer performans gösterirken, minimum çevresel etki açısından MSPRAO2 daha başarılı olmuştur. Minimum güvenlik riski hedefinde ise iki versiyon da benzer sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 200. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için RAO1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	MSPRAO1					NDSIII RAO1				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	217	746000	84,44	85,34	76,90	221	734000	84,84	82,58	75,20
2	218	745000	84,60	87,44	76,88	224	722600	85,52	83,60	76,59
3	268	673800	86,76	82,93	70,17	264	676200	86,56	80,26	70,23
4	267	674600	86,56	83,16	70,19	261	677000	86,36	82,57	70,25
5	255	693200	88,16	83,29	72,30	249	695800	88,00	82,61	72,38
6	246	696600	87,72	85,22	72,38	255	690800	87,92	85,74	71,30
7	241	700000	86,24	72,96	74,30	251	692400	86,12	72,54	72,38
8	243	701000	86,24	73,16	72,48	249	694400	86,68	73,56	72,40
9	268	673800	86,76	82,93	70,17	264	676200	86,56	80,26	70,23
10	267	674600	86,56	83,16	70,19	261	677000	86,36	82,57	70,25

Tablo 201. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için RAO2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

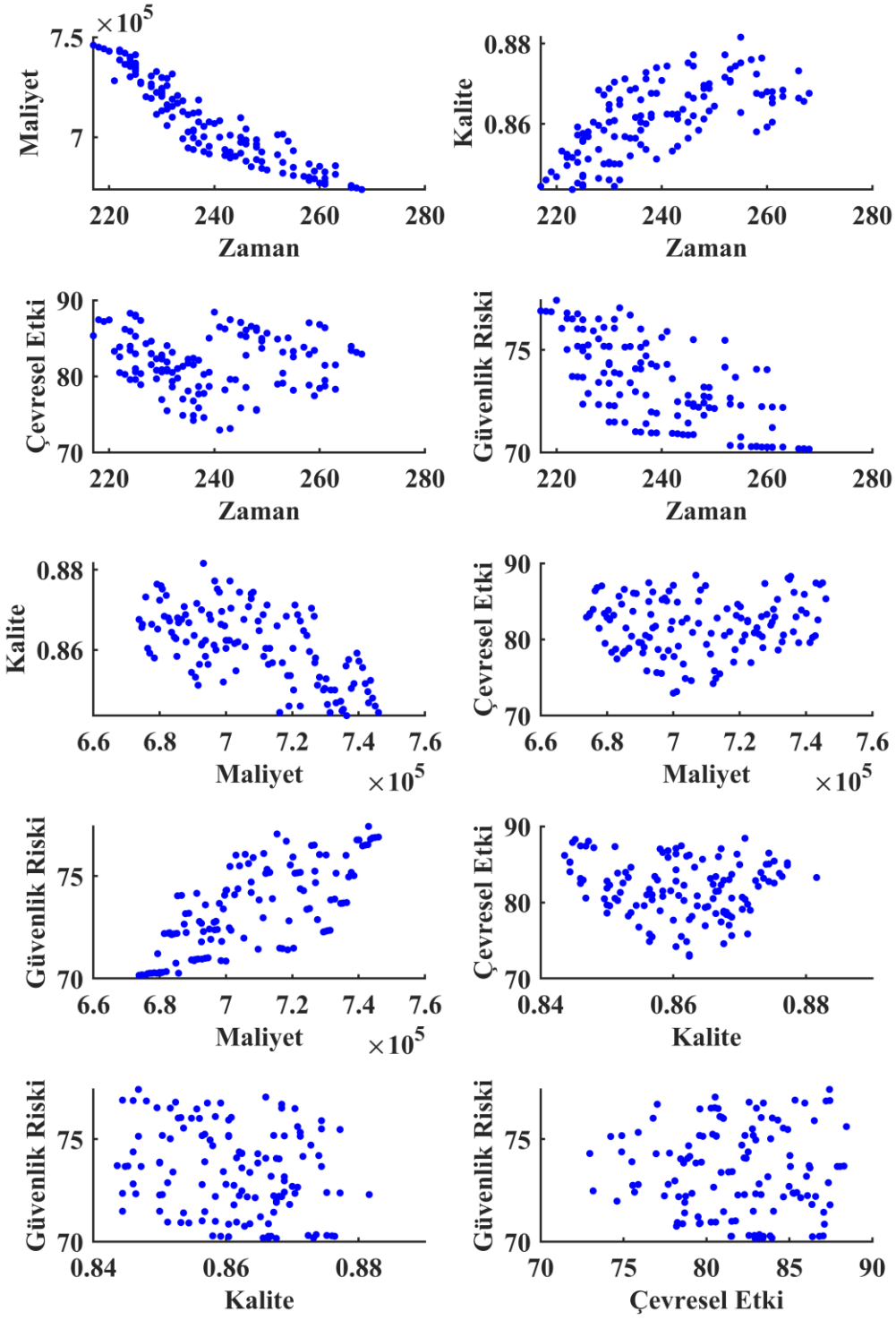
No	MSPRAO2					NDSIIIRAO2				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	217	746000	84,44	85,34	76,90	221	735200	84,56	83,14	74,74
2	218	744000	84,52	84,28	76,57	224	729000	84,52	89,90	75,47
3	268	673800	86,76	82,93	70,17	264	676200	86,56	80,26	70,23
4	265	674600	86,56	85,24	70,19	264	677200	87,52	83,12	70,23
5	255	693200	88,16	83,29	72,30	257	695200	87,92	80,41	73,27
6	247	703400	87,84	84,52	75,51	242	705800	87,76	81,21	75,56
7	249	694400	86,04	72,56	71,84	239	699200	85,84	73,93	71,98
8	248	692000	86,32	74,02	74,22	246	704000	85,96	74,18	73,21
9	268	673800	86,76	82,93	70,17	264	677200	87,52	83,12	70,23
10	265	674600	86,56	85,24	70,19	264	676200	86,56	80,26	70,23

Bir sonraki bölümde, performans metriklerinden ortalama HV (hiper hacim) ölçütü açısından yapılan değerlendirmede, en yüksek değere MSPRAO1 algoritmasının ulaştığı görülmüştür. Sharma ve Trivedi (2023) çalışmalarında, OBNSGAIII algoritması için yalnızca en iyi bağımsız çözüm yerine tüm çözümler arasından elde edilen en iyi sonuçlar sunulmuştur. Tablo 202'de, MSPRAO1 algoritmasının en yüksek HV değerine sahip Pareto çözümü, OBNSGAIII algoritmasının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan analizde,

MSPRAO1 algoritmasının, %50 daha az fonksiyon değerlendirmesiyle OBNSGAIII algoritmasına göre tüm amaçlarda üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, OBNSGAIII algoritması tarafından elde edilen Pareto çözümlerinden 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 13 ve 18. çözümlerin MSPRAO1 algoritması tarafından domine edildiği tespit edilmiştir. Tablo 203'te, MSPRAO1 algoritması tarafından elde edilen uç noktalara ait Pareto çözümleri ve bu çözümlerde kullanılan opsiyonlar sunulmaktadır. Şekil 127'de ise bu Pareto çözümlerinin grafiksel dağılımı gösterilmektedir.

Tablo 202. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için MSPRAO1 algoritmasına ait Pareto çözümlerinin OBNSGAIII Pareto çözümleriyle karşılaştırılması

	OBSNSGAIII (2023)					MSPRAO1				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	227	730600	84,80	82,62	76,24	217	746000	84,44	85,34	76,90
2	228	731600	85,40	85,16	76,22	218	745000	84,60	87,44	76,88
3	229	729800	85,40	84,63	75,39	219	744200	84,80	87,21	76,86
4	231	722500	85,30	86,31	75,04	220	743000	84,68	87,42	77,42
5	232	718800	85,40	84,43	73,05	221	728200	85,32	83,30	76,05
6	233	712400	85,90	79,84	76,06	222	738600	85,16	83,87	75,02
7	234	716600	86,30	83,19	74,77	223	742000	85,16	80,27	76,51
8	235	714500	85,50	82,14	75,13	224	735400	84,52	88,29	73,69
9	236	717100	84,90	81,40	73,74	225	731400	84,44	85,27	72,36
10	237	703900	85,90	79,14	73,78	226	726800	85,68	80,37	75,24
11	239	709000	86,40	80,23	73,51	227	720200	86,04	84,30	75,93
12	240	709000	87,30	82,04	74,53	228	730600	84,64	82,96	72,34
13	241	705100	85,60	80,88	71,93	229	722400	86,72	82,32	75,18
14	242	711700	86,80	81,54	75,11	230	720400	85,00	82,82	71,49
15	243	703600	86,30	88,95	72,21	231	716200	84,44	84,04	71,49
16	244	707100	87,00	85,83	73,77	232	710000	86,48	79,36	73,84
17	245	695000	86,60	79,33	74,24	233	717000	85,68	81,03	71,47
18	246	693100	85,40	82,68	71,78	234	712800	85,64	74,89	75,17
19	247	701500	86,40	77,42	71,88	235	694600	85,64	81,75	71,02
20	248	691900	86,60	83,74	72,74	236	693800	85,84	81,52	71,00
21	249	710000	87,40	82,67	76,48	237	697000	86,00	77,69	72,80
22	250	694000	86,40	82,37	73,18	238	692800	86,16	80,27	70,96
23	251	686500	86,60	83,61	71,36	239	691600	85,12	80,55	70,96
24	252	698000	87,30	83,04	73,31	240	706800	87,08	88,44	75,61
25	253	691200	86,80	81,65	71,68	241	700000	86,24	72,96	74,30
26	254	691400	86,20	78,70	73,16	242	693800	86,24	86,24	73,60



Şekil 127. MSPRAO1 tarafından üretilmiş 25 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski pareto grafiği

Tablo 203. 25 Aktivite TCQSRTP için MSPRAO1 algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

	No	Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	Ç.E	G.R.
Minimum Zaman	1	4,3,1,2,3,1,3,4,3,3,3,1,2,3,2,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1	217	746000	84,44	85,34	76,90
	2	4,3,1,2,3,1,2,4,3,3,3,1,2,3,2,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1	218	745000	84,60	87,44	76,88
Minimum Maliyet ve Güvenlik Riski	3	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	268	673800	86,76	82,93	70,17
	4	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1	267	674600	86,56	83,16	70,19
Maksimum Kalite	5	2,2,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,1,1,1,1	255	693200	88,16	83,29	72,30
	6	2,2,1,1,1,1,2,3,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,2,2,1,2,1,1,1	246	696600	87,72	85,22	72,38
Minimum Çevresel Etki	7	1,2,1,1,2,1,3,3,2,3,3,1,2,2,1,2,2,1,2,1,1,1,1,1,1	241	700000	86,24	72,96	74,30
	8	1,2,1,1,2,1,3,3,3,3,3,1,1,2,1,2,2,1,2,1,1,1,1,1,1	243	701000	86,24	73,16	72,48

3.8.2. 25 Aktivite TCQESRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 204'te, 25 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların, OBNSGAIII algoritması ile on bağımsız çözümden elde edilen ortalama C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

OBNSGAIII algoritmasının GWO versiyonları ile karşılaştırması incelendiğinde, NDSIIIGWO çözümlerinin %0'ını domine ederken, NDSIIIGWO tarafından %67 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen GWO versiyonunda OBNSGAIII çözümlerin %0.8'ini domine ederken, MSPGWO tarafından %41 oranında domine edilmiştir.

WOA algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, OBNSGAIII algoritması NDSIIIWOA'nın %0.1'ini domine ederken, NDSIIIWOA tarafından %59 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen WOA versiyonunda OBNSGAIII çözümlerin %0.7'sini domine ederken, MSPWOA tarafından %51 oranında domine edilmiştir.

Rao-1 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, OBNSGAIII algoritması NDSIIIRAO1'in %0.3'ünü domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %41 oranında domine edilmiştir. MSPRAO1 ile karşılaştırıldığında OBNSGAIII çözümlerin %0.3'ünü domine ederken, MSPRAO1 tarafından %52 oranında domine edilmiştir.

Rao-2 algoritmasının versiyonları ile karşılaştırıldığında, OBNSGAIII algoritması NDSIIIRAO2'nin %0.5'ini domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %36 oranında domine edilmiştir. MSPRAO2 ile karşılaştırıldığında OBNSGAIII çözümlerin %0.5'ini domine ederken, MSPRAO2 tarafından %48 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm algoritmaların OBNSGAIII'e göre oldukça üstün performans sergilediği görülmektedir. En yüksek baskınlık oranı NDSIIIGWO'nun %67 ile OBNSGAIII'ü domine etmesi olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, NDSIIIWOA'nın %59, MSPRAO1'in %52 ve MSPWOA'nın %51 oranında OBNSGAIII'ü domine etmesi, geliştirilen algoritmaların başarısını göstermektedir.

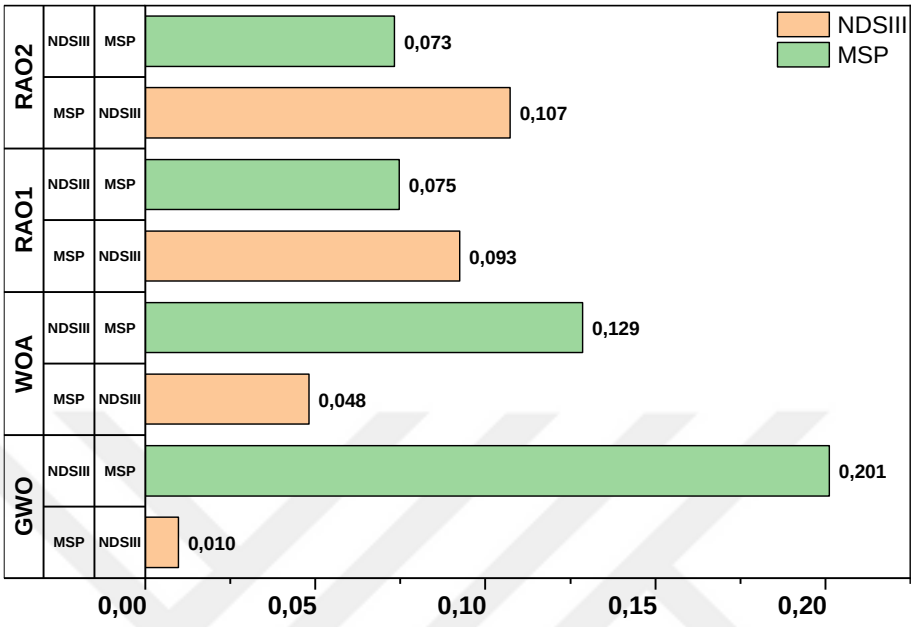
Tablo 204. 25 aktivite çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski optimizasyon problemi için geliştirilen algoritmaların OBNSGAIII algoritması ile C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(OBNSGAIII, NDSIIIGWO)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C(NDSIIIGWO, OBNSGAIII)	0,9219	0,2891	0,6788	0,1113
C(OBNSGAIII, MSPGWO)	0,0547	0,0000	0,0086	0,0125
C(MSPGWO, OBNSGAIII)	0,6914	0,0977	0,4117	0,1375
C(OBNSGAIII, NDSIIIWOA)	0,0313	0,0000	0,0012	0,0046
C(NDSIIIWOA, OBNSGAIII)	0,8477	0,2461	0,5904	0,1393
C(OBNSGAIII, MSPWOA)	0,0625	0,0000	0,0076	0,0136
C(MSPWOA, OBNSGAIII)	0,8125	0,1328	0,5172	0,1313
C(OBNSGAIII, NDSIIIRAO1)	0,0313	0,0000	0,0031	0,0057
C(NDSIIIRAO1, OBNSGAIII)	0,7305	0,1367	0,4155	0,1317
C(OBNSGAIII, MSPRAO1)	0,0156	0,0000	0,0031	0,0051
C(MSPRAO1, OBNSGAIII)	0,8086	0,2461	0,5266	0,1265
C(OBNSGAIII, NDSIIIRAO2)	0,0547	0,0000	0,0055	0,0089
C(NDSIIIRAO2, OBNSGAIII)	0,8086	0,0820	0,3638	0,1353
C(OBNSGAIII, MSPRAO2)	0,0469	0,0000	0,0054	0,0089
C(MSPRAO2, OBNSGAIII)	0,7734	0,1680	0,4854	0,1330

Şekil 128'de, 25 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için algoritmaların kendi içlerinde C-metrik performans karşılaştırmaları gösterilmektedir.

GWO algoritmasında MSP operatörü NDSIII'ü %1 oranında domine ederken, NDSIII operatörü MSP'yi %20 oranında domine etmiştir. WOA algoritmasında MSP operatörü NDSIII'ü %4.8 oranında domine ederken, NDSIII operatörü MSP'yi %12.9 oranında domine etmiştir. Rao-1 algoritmasında MSP operatörü NDSIII'ü %9.3 oranında domine ederken, NDSIII operatörü MSP'yi %7.5 oranında domine etmiştir. Rao-2 algoritmasında

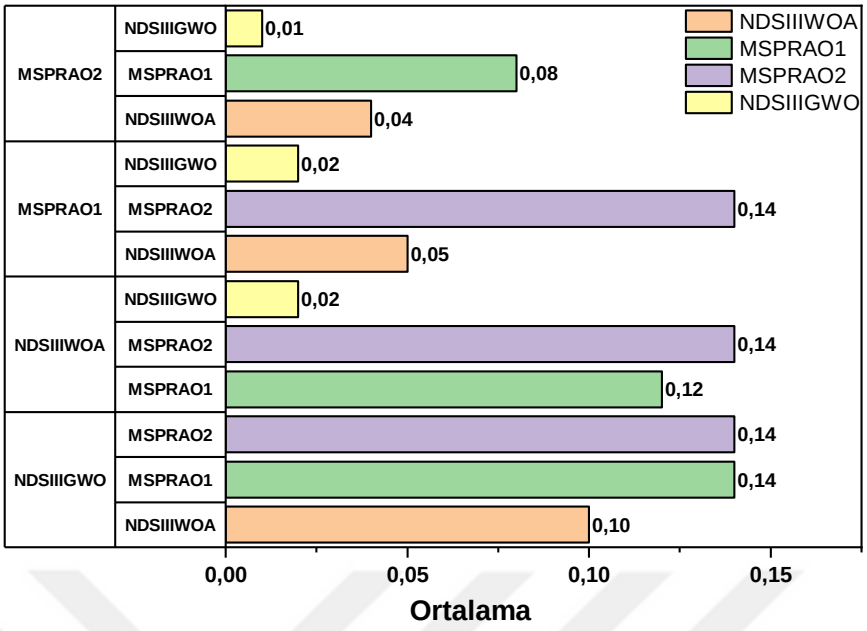
MSP operatörü NDSIII'ü %10.7 oranında domine ederken, NDSIII operatörü MSP'yi %7.3 oranında domine etmiştir.



Şekil 128. 25 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için, her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

Şekil 129'da 25 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümden elde edilen ortalama C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir. NDSIIIGWO algoritması NDSIIIWOA'nın %10'unu, MSPRAO1'in %14'ünü ve MSPRAO2'nin %14'ünü domine etmiştir. Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması NDSIIIWOA tarafından %2, MSPRAO1 tarafından %2 ve MSPRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir. NDSIIIWOA algoritması MSPRAO1'in %12'sini ve MSPRAO2'nin %14'ünü domine ederken, MSPRAO1 tarafından %5 ve MSPRAO2 tarafından %4 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, algoritmaların kendi içlerinde NDSIII operatörünün GWO ve WOA algoritmalarında daha başarılı olduğu, Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarında ise MSP operatörünün biraz daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 129. 25 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 205'te hiper hacim ve yayılım, Tablo 206'da ortalama ideal mesafe değerleri yer almaktadır. Bu değerler, her algoritma için on bağımsız çözüm sonucunda elde edilmiş olup, en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleriyle sunulmuştur.

Tablo 205. 25 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
OBNSGAIII	0,6878	0,5940	0,6433	0,0308	1,0000	1,0092	1,0009	0,0029
NDSIIIGWO	0,8590	0,8104	0,8256	0,0136	1,0246	1,1378	1,0651	0,0342
MSPGWO	0,8849	0,8256	0,8637	0,0187	0,6809	0,8145	0,7487	0,0462
NDSIIIWOA	0,8927	0,8560	0,8698	0,0121	1,0701	1,2239	1,1399	0,0535
MSPWOA	0,9026	0,8397	0,8792	0,0192	0,6613	0,8283	0,7461	0,0569
NDSIIIRAO1	0,8942	0,8468	0,8641	0,0157	0,9161	1,0408	0,9735	0,0320
MSPRAO1	0,9143	0,8831	0,8962	0,0087	0,5023	0,7152	0,6329	0,0638
NDSIIIRAO2	0,8649	0,8327	0,8510	0,0132	0,9226	1,1617	1,0271	0,0770
MSPRAO2	0,9067	0,8681	0,8854	0,0111	0,6229	0,7621	0,6707	0,0417

Tablo 206. 25 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
OBNSGAIII	1,1547	1,2479	1,1924	0,0266
NDSIIIGWO	0,9450	1,0015	0,9737	0,0203
MSPGWO	1,1675	1,2435	1,2081	0,0302
NDSIIIWOA	1,0338	1,1239	1,0829	0,0345
MSPWOA	1,2191	1,3434	1,2591	0,0358
NDSIIIRAO1	1,1077	1,1650	1,1277	0,0180
MSPRAO1	1,2135	1,2761	1,2412	0,0185
NDSIIIRAO2	1,0918	1,1721	1,1440	0,0270
MSPRAO2	1,2259	1,3110	1,2654	0,0263

Tablo 207'de performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve Şekil 130'da grafiksel olarak sunulmaktadır. MSPRAO1 algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.8962) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu MSPRAO1 (2023) algoritması (0.6329) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.9737) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

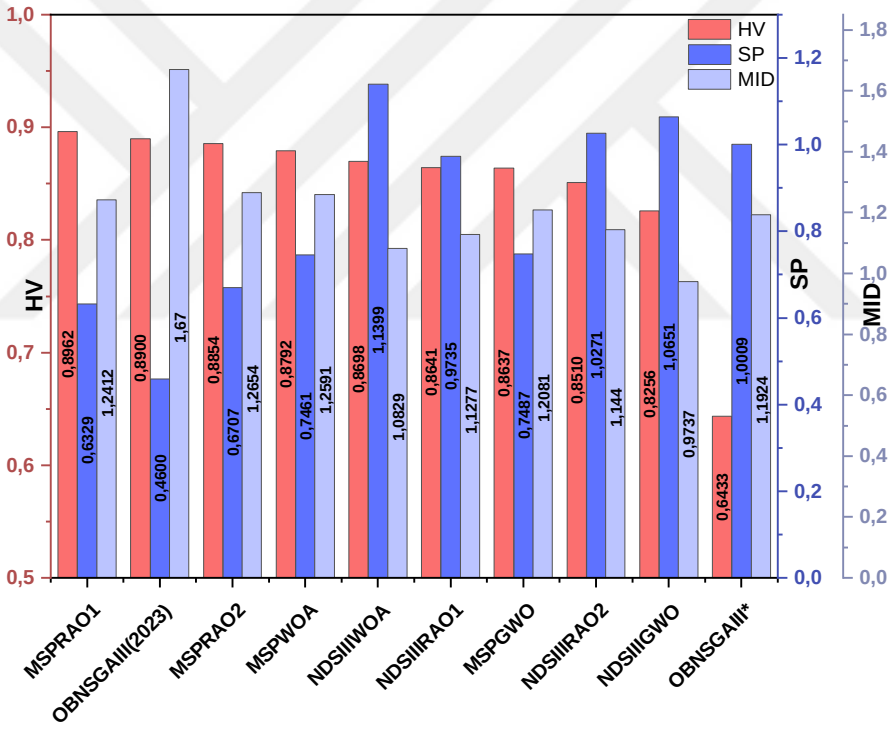
Bu bulgular, her bir algoritmanın beş amaçlı optimizasyon probleminde farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen MSP (modifiye güçlendirilmiş pareto) versiyonlarının (MSPRAO1, MSPRAO2, MSPWOA), NDSIII ile geliştirilen versiyonlara göre çok daha iyi HV değerleri sunduğu tespit edilmiştir.

Genel değerlendirmede, literatürdeki OBNSGAIII (2023) ile bu çalışmada üretilen QBNSGAIII* algoritmasının HV değerlerindeki farklılığın metodolojik bir yaklaşımdan kaynaklandığını düşünülmektedir. Bu çalışmada, tüm algoritmaların ürettiği Pareto çözümleri birleştirilerek "gerçek Pareto cephesi" kabul edilmiş ve her bir algoritmaya ait HV değerleri bu referans setinin HV değerine oranı alınarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında üretilen OBNSGAIII ile Sharma ve Trivedi (2023) tarafından üretilen Pareto çözümleri benzer olmasına rağmen, HV değerlerinde görülen farklılık sadece değerlendirme metodolojisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmalar %50 daha az fonksiyon değerlendirmesine rağmen hiper hacim ve yayılım açısından daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Tablo 207. 25 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
MSPRAO1	19200	0,8962	0,6329	1,2412
OBNSGAIII(2023)	38400	0,8900	0,4600	1,6700
MSPRAO2	19200	0,8854	0,6707	1,2654
MSPWOA	19200	0,8792	0,7461	1,2591
NDSIIIWOA	19200	0,8698	1,1399	1,0829
NDSIIIRAO1	19200	0,8641	0,9735	1,1277
MSPGWO	19200	0,8637	0,7487	1,2081
NDSIIIRAO2	19200	0,8510	1,0271	1,1440
NDSIIIGWO	19200	0,8256	1,0651	0,9737
OBNSGAIII*	38400	0,6433	1,0009	1,1924

*Bu Çalışma



Şekil 130. 25 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.8.3. 250 Aktivite Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Ödünleşim Problemi

Çok amaçlı optimizasyonda kullanılan operatörlerin küçük ve orta ölçekli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemlerinin yanı sıra büyük ölçekli inşaat

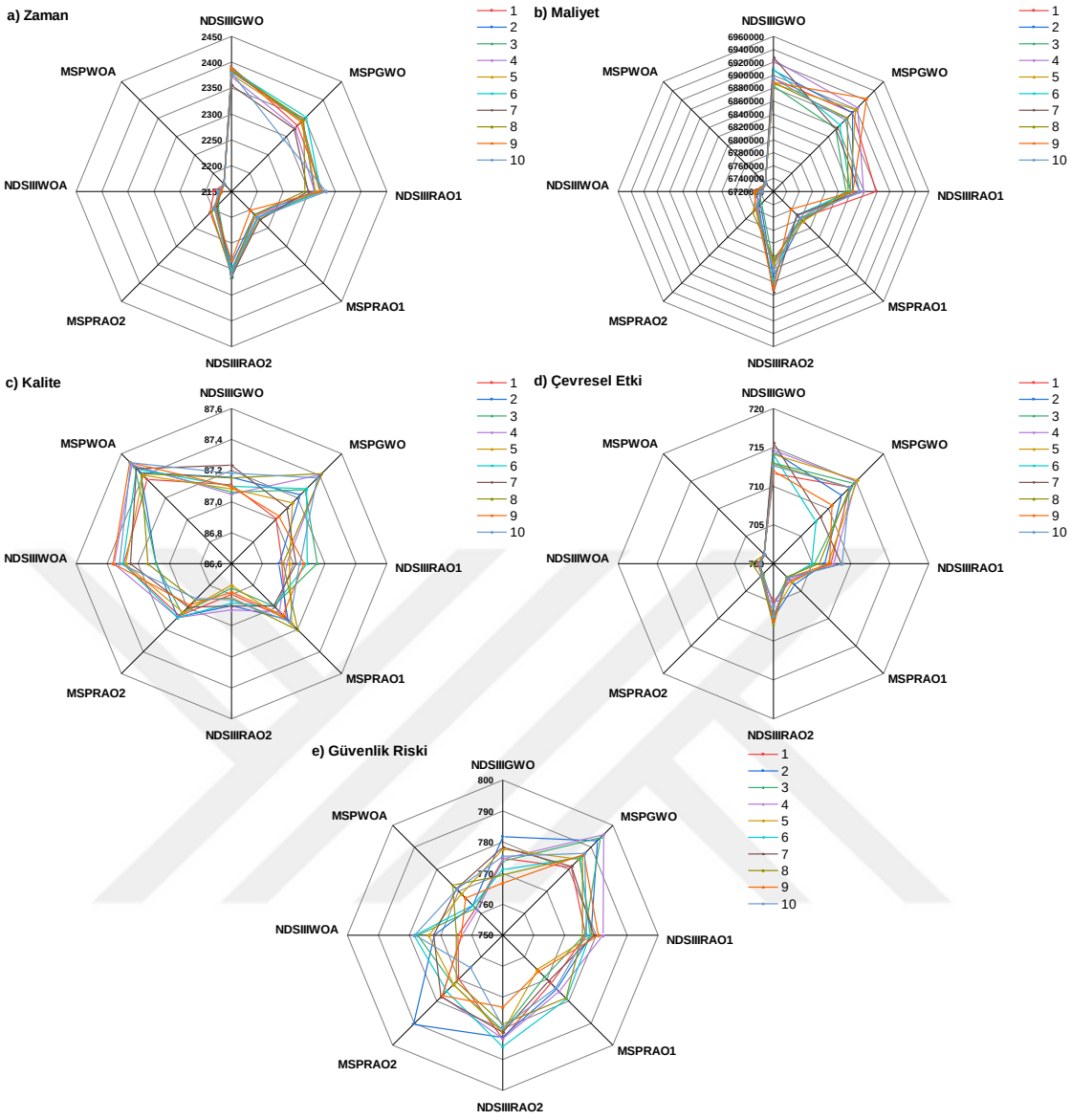
projelerine olan etkisini incelemek amacıyla, Tablo 197'de opsiyonları ile verilen 25 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi, 10 kat artırılarak 25 aktiviteli TCQESRTP problemine dönüştürülmüştür. 250 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi, toplamda 2,01E+77 farklı proje tamamlanma kombinasyonu içermektedir. Tüm algoritmalar 128 popülasyon, 300 iterasyon ile çözülmüştür.

Şekil 131'de on bağımsız çözüm sonucunda elde edilen minimum zaman, maliyet, güvenlik riski, çevresel etki ve maksimum kalite değerleri gösterilmektedir.

Gri kurt algoritması versiyonları değerlendirildiğinde, zaman kriterinde MSPGWO'nun daha düşük değerler ürettiği, NDSIIIGWO'nun ise daha yüksek değerler elde ettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPGWO'nun daha düşük ve kararlı sonuçlar ürettiği, NDSIIIGWO'nun ise daha yüksek değerler elde ettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından her iki versiyonun da benzer değerler ürettiği gözlemlenmiştir. Çevresel etki ve güvenlik riski bakımından MSPGWO'nun NDSIIIGWO'ya göre daha yüksek değerler ürettiği belirlenmiştir.

Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) versiyonları incelendiğinde, zaman kriterinde MSPWOA'nın tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ettiği, NDSIIIWOA'nın ise daha yüksek değerler ürettiği görülmektedir. Maliyet açısından MSPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, NDSIIIWOA'nın daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Kalite açısından MSPWOA'nın daha yüksek ve kararlı değerler ürettiği, NDSIIIWOA'nın ise daha düşük değerler elde ettiği gözlemlenmiştir. Çevresel etki açısından MSPWOA tüm bağımsız çözümlerde optimum değeri elde ederken, NDSIIIWOA'nın daha yüksek değerler ürettiği tespit edilmiştir. Güvenlik riski bakımından MSPWOA'nın, NDSIIIWOA'ya göre daha düşük değerler ürettiği belirlenmiştir.

Rao-1 ve Rao-2 algoritmasına bakıldığında MSP serilerinin NDSIII serilerine göre uç noktaları bulmada daha başarılı oldukları tespit edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde Rao-1 ve WOA algoritmalarının diğer algoritmalara göre uç noktaları bulmada daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 131. 25 aktiviteli TCQESRTP probleminde algoritmaların on bağımsız çözümde her bir kriter için ulaştığı en iyi değerler

Tablo 208-211 arasında, farklı algoritma versiyonlarına ait Pareto çözümlerinin karşılaştırmaları yer almaktadır. Bu tablolarda, algoritmaların en yüksek hiper hacim (HV) değerine ulaşan bağımsız çözümleri baz alınarak ilgili Pareto çözümleri seçilmiştir. Pareto çözümleri belirli hedefler doğrultusunda kategorilere ayrılmıştır: 1. ve 2. çözümler minimum süreyi, 3. ve 4. çözümler minimum maliyeti, 5. ve 6. çözümler maksimum kaliteyi, 7. ve 8. çözümler minimum çevresel etkiyi, 9. ve 10. çözümler ise minimum güvenlik riskini temsil etmektedir.

Tablo 208'de, GWO algoritmasının farklı versiyonlarının 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için pareto çözümlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. GWO algoritmasının farklı

versiyonlarının çeşitli hedeflerde farklı performanslar göstermesi, her versiyonun kendine özgü güçlü yönlerini ortaya koymaktadır. MSPGWO versiyonu özellikle zaman, maliyet ve kalite hedeflerinde başarılı olurken, NDSIIIGWO versiyonu çevresel etki ve güvenlik riski minimizasyonunda daha iyi performans göstermiştir. Bu durum, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde her versiyon farklı hedeflerde üstünlük sağlayarak, probleme farklı açılardan katkı sunmuşlardır.

Tablo 208. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için GWO algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	MSPGWO					NDSIIIGWO				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	2292	7252000	85,50	833,08	753,80	2384	7102800	86,07	838,09	733,43
2	2298	7243000	85,48	848,56	755,10	2385	7090400	85,69	834,09	733,76
3	2525	6876500	86,30	809,36	722,56	2497	6888700	86,70	797,03	713,59
4	2519	6880000	86,12	794,78	723,87	2474	6908400	86,34	803,19	713,39
5	2513	7003700	87,38	820,80	730,88	2452	6982100	87,15	793,43	727,06
6	2520	7008700	87,34	812,85	730,55	2432	7017000	87,04	795,16	737,52
7	2497	6919500	86,22	787,36	726,97	2460	6954300	86,67	769,35	723,47
8	2478	6930300	86,28	787,82	725,86	2453	6938700	86,32	773,94	727,04
9	2502	6941000	86,41	827,21	713,90	2470	6921200	86,40	811,59	712,87
10	2512	6916300	86,51	830,10	715,46	2474	6908400	86,34	803,19	713,39

Tablo 209'da, WOA algoritmasının farklı versiyonlarının pareto çözümleri karşılaştırılmıştır. MSPWOA versiyonu minimum zaman, maksimum kalite ve minimum çevresel etki hedeflerinde daha iyi sonuçlar üretmiştir. Minimum maliyet ve güvenlik riski açısından ise iki versiyon da aynı değerlere ulaşmıştır.

Tablo 209. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için WOA algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	MSPWOA					NDSIIIWOA				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	2170	7460000	84,44	853,40	769,00	2184	7414800	84,56	841,86	761,79
2	2175	7453400	84,45	855,26	767,61	2188	7408800	84,57	839,60	760,94
3	2680	6738000	86,76	829,30	701,70	2680	6738000	86,76	829,30	701,70
4	2679	6743000	86,75	828,54	701,72	2675	6743000	86,86	830,74	701,76
5	2637	6872800	87,37	849,97	713,08	2555	6965600	87,29	814,29	727,89
6	2644	6860200	87,32	852,94	711,98	2600	6909800	87,20	844,13	716,51
7	2412	7053600	86,13	762,29	721,08	2466	6982400	86,50	764,43	722,27
8	2404	7056800	86,16	765,49	721,24	2456	7006800	86,56	769,49	724,35
9	2680	6738000	86,76	829,30	701,70	2680	6738000	86,76	829,30	701,70
10	2679	6743000	86,75	828,54	701,72	2675	6743000	86,86	830,74	701,76

Tablo 210'da, RAO1 algoritmasının farklı versiyonlarının pareto çözümleri sunulmuştur. MSPRAO1 versiyonu tüm hedeflerde (minimum zaman, minimum maliyet, maksimum kalite, minimum çevresel etki ve minimum güvenlik riski) NDSIIIRAO1'e göre daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Tablo 211'de, RAO2 algoritmasının farklı versiyonlarının pareto çözümleri verilmiştir. MSPRAO2 versiyonu, minimum zaman, minimum maliyet, maksimum kalite ve minimum güvenlik riski hedeflerinde daha iyi performans gösterirken, minimum çevresel etki açısından iki versiyon da benzer sonuçlar üretmiştir.

Tablo 210. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için Rao-1 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	MSPRAO1					NDSIIIRAO1				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	2202	7434400	84,65	860,70	766,74	2292	7312600	85,67	823,29	759,21
2	2206	7423200	84,64	860,88	766,66	2309	7249500	85,24	828,33	745,45
3	2648	6758800	86,60	820,02	702,63	2563	6835200	86,30	815,49	707,64
4	2647	6759800	86,61	820,24	702,65	2543	6844700	86,27	852,43	706,73
5	2529	6930400	87,07	828,30	725,94	2522	6938600	86,93	846,79	714,91
6	2623	6834600	86,88	826,01	714,31	2543	6878000	86,92	810,58	720,53
7	2489	6969200	85,83	766,49	718,68	2472	6982800	86,19	775,60	725,12
8	2495	6952000	85,80	772,07	716,60	2416	7044800	85,40	781,18	732,04
9	2648	6758800	86,60	820,02	702,63	2538	6854300	86,28	856,91	705,90
10	2647	6759800	86,61	820,24	702,65	2543	6844700	86,27	852,43	706,73

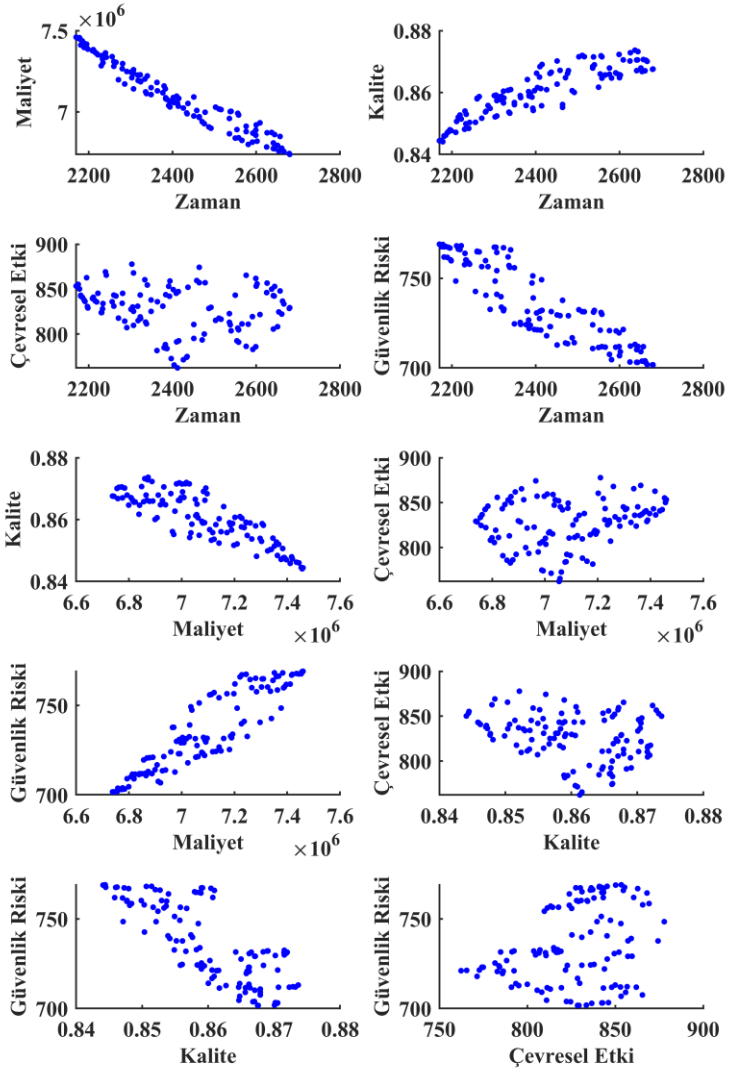
Tablo 211. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için Rao-2 algoritmasına ait pareto çözümlerinin kıyaslaması

No	MSPRAO2					NDSIIIRAO2				
	Z	M	K	ÇE.	G.R	Z	M	K	ÇE.	G.R
1	2208	7437600	84,63	853,02	766,62	2284	7314100	85,27	842,13	747,07
2	2218	7431500	84,64	856,25	768,28	2297	7291500	85,28	839,86	741,70
3	2639	6758200	86,56	827,16	702,32	2565	6869000	86,74	834,49	709,71
4	2636	6759000	86,54	829,47	702,34	2551	6878800	86,24	808,15	707,45
5	2539	6951100	87,08	841,11	727,82	2548	6907800	86,78	817,80	721,43
6	2505	6982500	86,95	838,98	731,27	2549	6929800	86,76	821,18	711,40
7	2447	7009300	86,20	770,01	728,74	2473	6998600	85,97	773,21	720,57
8	2450	7008600	86,14	771,89	727,72	2506	6937100	85,59	779,93	714,17
9	2639	6758200	86,56	827,16	702,32	2551	6878800	86,24	808,15	707,45
10	2635	6761200	86,62	831,02	702,32	2504	6902000	86,08	857,52	707,81

Bu sonuçlar, özellikle MSP versiyonlarının genel olarak daha başarılı olduğunu, ancak NDSIII versiyonlarının da belirli hedeflerde üstünlük sağlayabildiğini göstermektedir. Bu durum çok amaçlı optimizasyon problemlerinin doğasını yansıtmakta, her versiyonun farklı

hedeflerde gösterdiği başarı, algoritmaların keşif ve arama stratejilerindeki çeşitliliğinin bir sonucudur.

MSPWOA algoritması, 250 aktiviteli TCQESRTP probleminde diğer algoritmalara göre daha üstün bir performans sergilemiştir. Bu üstünlük, algoritmanın Pareto çözümlerinin uç noktalarını etkili bir şekilde bulabilmesi, çözüm uzayında dengeli bir dağılım sağlaması ve yüksek kaliteli çözümler üretebilmesi ile kanıtlanmış, bu sayede en yüksek ortalama HV değerine ulaşılmıştır. Algoritmanın başarısını gösteren uç noktalara ait Pareto çözümleri ve kullanılan opsiyonlar Tablo 212'de ayrıntılı olarak gösterilirken, bu çözümlerin dağılımı Şekil 132'de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 132. MSPWOA tarafından üretilmiş 250 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski pareto grafiği

Tablo 212. 250 Aktivite TCQSRTP için MSPWOA algoritması ile elde edilen pareto çözümleri

Kullanılan Opsiyonlar	Z	M	K	Ç.E	G.R.
4,3,1,2,3,1,3,4,3,3,3,1,2,3,2,2,2,1,2,3,2,2,2,1,1,

3.8.4. 250 Aktivite TCQESRTP İçin Performans Ölçütlerinin Değerlendirilmesi

Tablo 213'te, 250 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmanın MSP ve NDSIII versiyonları arasındaki on bağımsız çözümden elde edilen ortalama C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

GWO algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, MSPGWO NDSIIIGWO'nun çözümlerinin %0.4'ünü domine ederken, NDSIIIGWO tarafından %45 oranında domine edilmiştir. WOA algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MSPWOA NDSIIIWOA'nın %11'ini domine ederken, NDSIIIWOA tarafından %4 oranında domine edilmiştir. Rao-1 algoritmasının versiyonları karşılaştırıldığında, MSPRAO1 NDSIIIRAO1'in %13'ünü domine ederken, NDSIIIRAO1 tarafından %3 oranında domine edilmiştir. Rao-2 algoritmasının versiyonları incelendiğinde, MSPRAO2 NDSIIIRAO2'nin %17'sini domine ederken, NDSIIIRAO2 tarafından %2 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, GWO algoritmasında NDSIII operatörünün oldukça başarılı olduğu, diğer algoritmalarda ise MSP operatörünün daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

Tablo 213. 250 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmanın kendi içinde C-metrik performans karşılaştırması

	En İyi	En Kötü	Ortalama	Std.
C(MSPGWO,NDSIIIGWO)	0,0313	0,0000	0,0049	0,0077
C(NDSIIIGWO, MSPGWO)	0,7188	0,2266	0,4547	0,1024
C(MSPWOA, NDSIIIWOA)	0,2578	0,0078	0,1138	0,0604
C(NDSIIIWOA, MSPWOA)	0,1250	0,0000	0,0458	0,0272
C(MSPRAO1, NDSIIIRAO1)	0,2969	0,0156	0,1352	0,0558
C(NDSIIIRAO1, MSPRAO1)	0,1484	0,0000	0,0356	0,0273
C(MSPRAO2, NDSIIIRAO2)	0,3281	0,0156	0,1772	0,0626
C(NDSIIIRAO2, MSPRAO2)	0,1094	0,0000	0,0270	0,0222

Şekil 133'te, 250 aktiviteli zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmanın en iyi versiyonlarının on bağımsız çözümden elde edilen ortalama C-metrik performans karşılaştırması gösterilmektedir.

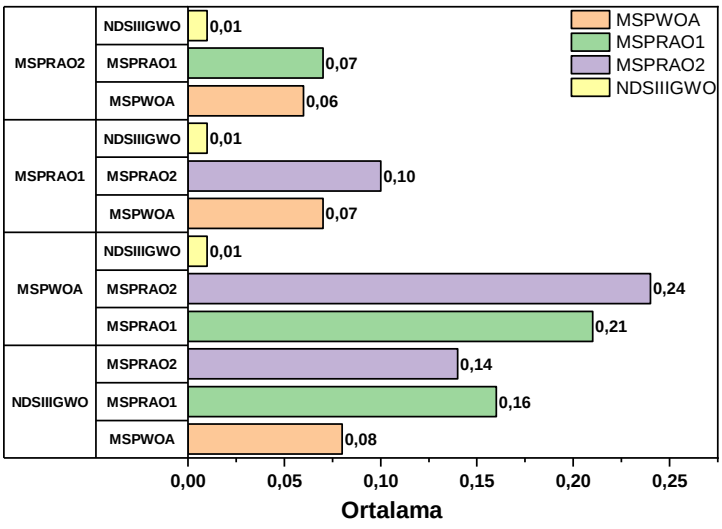
NDSIIIGWO algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırıldığında, MSPWOA'nın %8'ini, MSPRAO1'in %16'sını ve MSPRAO2'nin %14'ünü domine ettiği gözlemlenmiştir.

Öte yandan, NDSIIIGWO algoritması MSPWOA tarafından %1, MSPRAO1 tarafından %1 ve MSPRAO2 tarafından %1 oranında domine edilmiştir.

MSP ile geliştirilen WOA algoritmasının pareto baskınlığı karşılaştırmasında, MSPRAO1'in %21'ini ve MSPRAO2'nin %24'ünü domine ettiği görülmüştür. Diğer taraftan, MSPWOA algoritması MSPRAO1 tarafından %7 ve MSPRAO2 tarafından %6 oranında domine edilmiştir. MSP ile geliştirilen Rao-1 versiyonu incelendiğinde, MSPWOA'nın %7'sini ve MSPRAO2'nin %10'unu domine ettiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, MSPRAO1 algoritması MSPRAO2 tarafından %7 ve MSPWOA tarafından %21 oranında domine edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, NDSIIIGWO algoritmasının diğer versiyonlara göre baskınlık açısından daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

Ancak, C-metrik performans değerlendirmesi tek başına algoritmaların başarısını ölçmek için yeterli değildir. C-metrik yalnızca iki çözüm kümesinin birbirine göre pareto baskınlığını göstermekte olup, çözüm kümelerinin çeşitliliğini, pareto cephesine olan yakınlığını ve çözümlerin dağılımını değerlendirememektedir. Bu nedenle, algoritmaların performanslarını daha kapsamlı değerlendirebilmek için hiper hacim (HV) metriğinin de incelenmesi gerekmektedir. HV metriği, referans noktası ile çözüm kümesinin oluşturduğu hacmi hesaplayarak hem yakınsama hem de çeşitlilik açısından daha detaylı bir analiz sunmaktadır.



Şekil 133. 250 aktivite zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski problemi için her algoritmaya ait en iyi versiyonların C-metrik performansları karşılaştırması

Tablo 214'te hiper hacim ve yayılım değerleri, Tablo 215'te ise ortalama ideal mesafe sonuçları gösterilmektedir. Bu veriler, her bir algoritmanın on bağımsız çözüm çalışması sonucunda elde edilmiş ve en iyi, en kötü, ortalama ile standart sapma değerleri şeklinde sunulmuştur.

Tablo 214. 250 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait HV ve SP performans ölçütleri karşılaştırması

Algoritma Performans Kriterleri	Hiper Hacim (HV)				Yayılım (SP)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIIGWO	0,6912	0,6383	0,6692	0,0165	1,0173	1,0471	1,0256	0,0092
MSPGWO	0,6758	0,6074	0,6393	0,0260	0,9049	0,9593	0,9346	0,0170
NDSIIIWOA	0,8750	0,8164	0,8446	0,0227	1,0465	1,2557	1,1876	0,0610
MSPWOA	0,9059	0,8504	0,8798	0,0192	0,5537	0,7918	0,6698	0,0815
NDSIIIRAO1	0,7526	0,6985	0,7231	0,0165	0,9333	0,9949	0,9657	0,0169
MSPRAO1	0,8351	0,7864	0,8055	0,0165	0,5898	0,6873	0,6488	0,0355
NDSIIIRAO2	0,7290	0,6894	0,7122	0,0109	0,9389	0,9978	0,9704	0,0201
MSPRAO2	0,8326	0,7464	0,8051	0,0237	0,5598	0,6836	0,6181	0,0372

Tablo 215. 250 aktivite TCQESRTP için algoritmalara ait MID performans ölçütü karşılaştırması

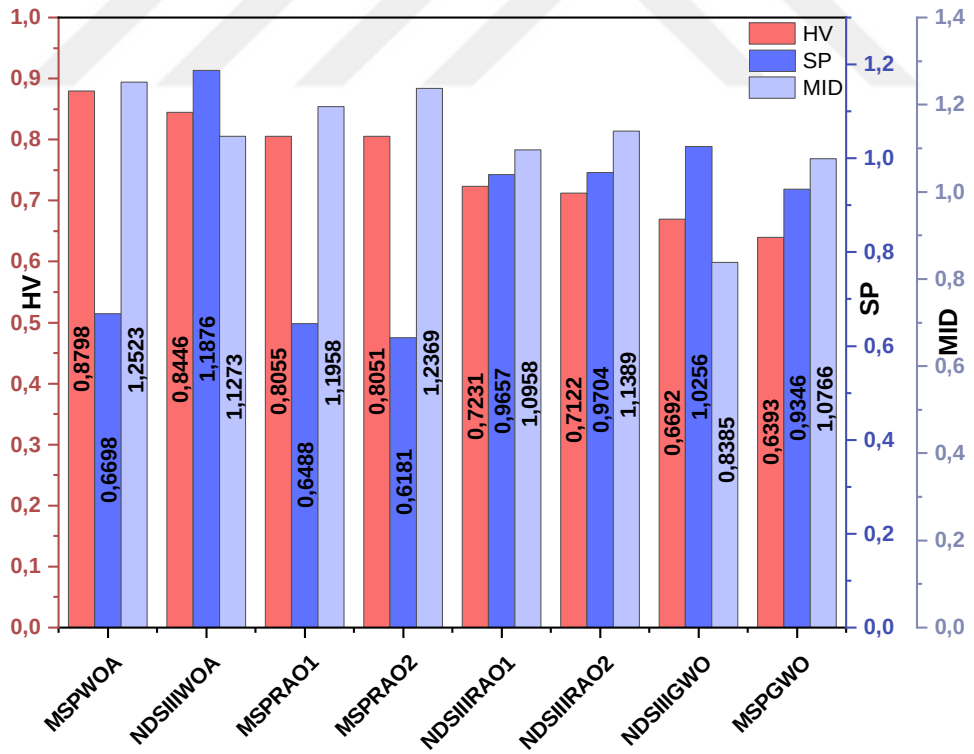
Algoritmalar	Ortalama İdeal Mesafe (MID)			
	En İyi	En Kötü	Ort.	Std.
NDSIIIGWO	0,7832	0,8875	0,8385	0,0300
MSPGWO	1,0414	1,1152	1,0766	0,0240
NDSIIIWOA	1,1000	1,1629	1,1273	0,0238
MSPWOA	1,2024	1,2871	1,2523	0,0274
NDSIIIRAO1	1,0642	1,1196	1,0958	0,0185
MSPRAO1	1,1772	1,2267	1,1958	0,0143
NDSIIIRAO2	1,1039	1,1604	1,1389	0,0151
MSPRAO2	1,2082	1,2846	1,2369	0,0248

Tablo 216'da performans ölçütlerinin ortalama değerleri sunulmakta ve algoritmalar en yüksek hiper hacim değerinden en düşüğüne doğru sıralanmakta ve Şekil 134'te grafiksel olarak sunulmaktadır. MSPWOA algoritmasının HV performans ölçütü açısından diğer algoritmalardan daha iyi sonuçlar (0.8798) verdiği görülmektedir. Pareto cephelerinin yayılımına bakıldığında ise en iyi sonucu MSPRAO2 algoritması (0.6181) vermiştir. Ortalama ideal mesafe (MID) ölçütü açısından, NDSIIIGWO algoritmasının elde ettiği Pareto çözümlerinin (0.8385) ideal noktaya daha yakın olduğu ve dolayısıyla daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, her bir algoritmanın beş amaçlı büyük ölçekli optimizasyon probleminde farklı üstün yönlerinin bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen MSP (parametreleri değiştirilmiş güçlendirilmiş pareto) versiyonlarının (MSPWOA, MSPRAO1, MSPRAO2), NDSIII ile geliştirilen versiyonlara göre çok daha iyi HV değerleri sunduğu tespit edilmiştir.

Tablo 216. 250 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri

	NFE	HV	SP	MID
MSPWOA	38400	0,8798	0,6698	1,2523
NDSIIIWOA	38400	0,8446	1,1876	1,1273
MSPRAO1	38400	0,8055	0,6488	1,1958
MSPRAO2	38400	0,8051	0,6181	1,2369
NDSIIIRAO1	38400	0,7231	0,9657	1,0958
NDSIIIRAO2	38400	0,7122	0,9704	1,1389
NDSIIIGWO	38400	0,6692	1,0256	0,8385
MSPGWO	38400	0,6393	0,9346	1,0766



Şekil 134. 250 aktivite TCQESRTP problemi için algoritmaların ortalama performans ölçütleri grafiksel gösterimi

3.8.5. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Problemleri Genel Değerlendirme

Çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski optimizasyon problemlerinin çözümünde, Rao serileri, Gri kurt optimizasyonu ve Balina optimizasyonu algoritmaları MSP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleriyle geliştirilmiş ve performansları 25 ve 250 aktiviteli projeler üzerinde detaylı olarak incelenmiştir.

25 aktiviteli problemde MSPRAO1 algoritması 0.8962 hiper hacim değeri ile en iyi performansı gösterirken, yayılım açısından MSPRAO1 algoritması 0.6329 değeri ile en iyi sonucu vermiştir. Ortalama ideal mesafede ise NDSIIIGWO algoritması 0.9737 değeri ile öne çıkmıştır. Geliştirilen algoritmalar literatürdeki OBNSGAIII algoritmasına göre %50 daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak daha iyi sonuçlar üretmeyi başarmıştır.

250 aktiviteli büyük ölçekli problemde MSPWOA algoritması 0.8798 hiper hacim değeri ile en iyi performansı gösterirken, yayılım açısından MSPRAO2 algoritması 0.6181 değeri ile başarılı olmuştur. Ortalama ideal mesafede ise NDSIIIGWO algoritması 0.8385 değeri ile öne çıkmıştır.

Metasezgisel algoritmaların özellikleri incelendiğinde, WOA algoritması özellikle büyük ölçekli problemde tutarlı ve yüksek performans gösterirken, GWO algoritması ideal noktaya yakın çözümler üretmede başarılı olmuştur. Rao serileri ise küçük ölçekli problemlerde daha etkili sonuçlar vermiştir.

Operatörlerin etkisi değerlendirildiğinde, MSP operatörü hiper hacim ve yayılım açısından daha başarılı olurken, NDSIII operatörü ideal noktaya yakın çözümler üretmede öne çıkmıştır. Problem boyutuna göre farklı algoritmaların performans ölçütlerinde üstünlük göstermesi, algoritmaların ve operatörlerin başarısının problem karakteristiklerine göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, WOA algoritması büyük ölçekli problemlerde daha etkili sonuçlar üretirken, Rao serileri küçük ölçekli problemlerde daha başarılı olmuştur. Bu durum, problem yapısına göre algoritmaların arama stratejilerinin ve operatörlerin çözüm uzayını araştırma yeteneklerinin farklı etkinlik gösterdiğini ve tek bir yaklaşımın tüm problem tipleri için en iyi çözümü garanti edemeyeceğini göstermektedir.

3.8.6. Çok Amaçlı Zaman-Maliyet-Kalite-Çevresel Etki-Güvenlik Riski Optimizasyonunda BHARAT ile En İyi Pareto Çözümlerinin Seçimi

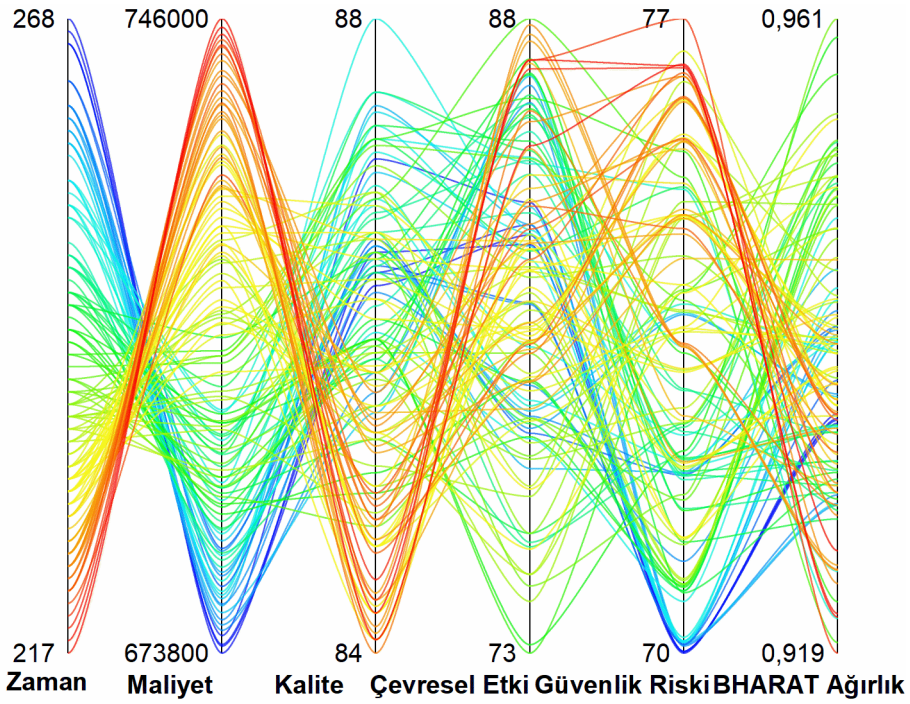
Bu bölümde, 25 ve 250 aktiviteli çok amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski optimizasyon problemlerinin çözümleri neticesinde elde edilen pareto çözümleri arasından en uygun alternatiflerin belirlenmesi amacıyla BHARAT çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmıştır. Her bir problem kategorisinde en iyi performansı gösteren algoritmanın pareto çözümleri değerlendirmeye alınmıştır. Bu doğrultuda, 25 aktiviteli problem için MSPRAO1 ve 250 aktiviteli problemler için MSPWOA algoritmaları tarafından üretilen pareto çözümleri kullanılmıştır. Analiz sürecinde zaman, maliyet, kalite, çevresel etki ve güvenlik riski kriterlerine eşit önem verilmiş ve her beş kriter eşit ağırlıkta (wt=wc=wq=we=ws=0.20) değerlendirilmiştir. BHARAT yöntemi kullanılarak her bir problem kategorisi için en iyi üç alternatif belirlenmiştir.

Şekil 135'te 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite, çevresel etki ve güvenlik riski değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 217-268 gün aralığında, maliyetlerin 673800-746000 aralığında, kalite değerlerinin 84-88 aralığında, çevresel etki değerlerinin 73-88 aralığında ve güvenlik riski değerlerinin 70-77 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.919-0.961) ilişkilendirilmektedir.

BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 217'de gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen opsiyonlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri, çevresel etki değeri, güvenlik riski değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, kriterlerin eşit ağırlıkta kullanılması durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 238 gün sürede tamamlanıp 705400$ maliyet, 86.76 kalite değeri, 74.6 çevresel etki değeri ve 71.98 güvenlik riski değeri ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.9608 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 217. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	Çevresel Etki	Güvenlik Riski	BHARAT Ağırlık
1	1,2,1,1,2,1,3,4,3,3,3,1,1,3,1,2,2,1,2,2,1,1,1,1,1	238	705400	86,76	74,6	71,98	0,9608
2	1,2,1,1,2,1,3,3,3,3,3,1,1,2,1,2,2,1,2,1,1,1,1,1,1	243	701000	86,24	73,16	72,48	0,9596
3	1,2,1,1,2,1,3,3,2,3,3,1,2,2,1,2,2,1,2,1,1,1,1,1,1	241	700000	86,24	72,96	74,3	0,9571



Şekil 135. 25 aktiviteli TCQESRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

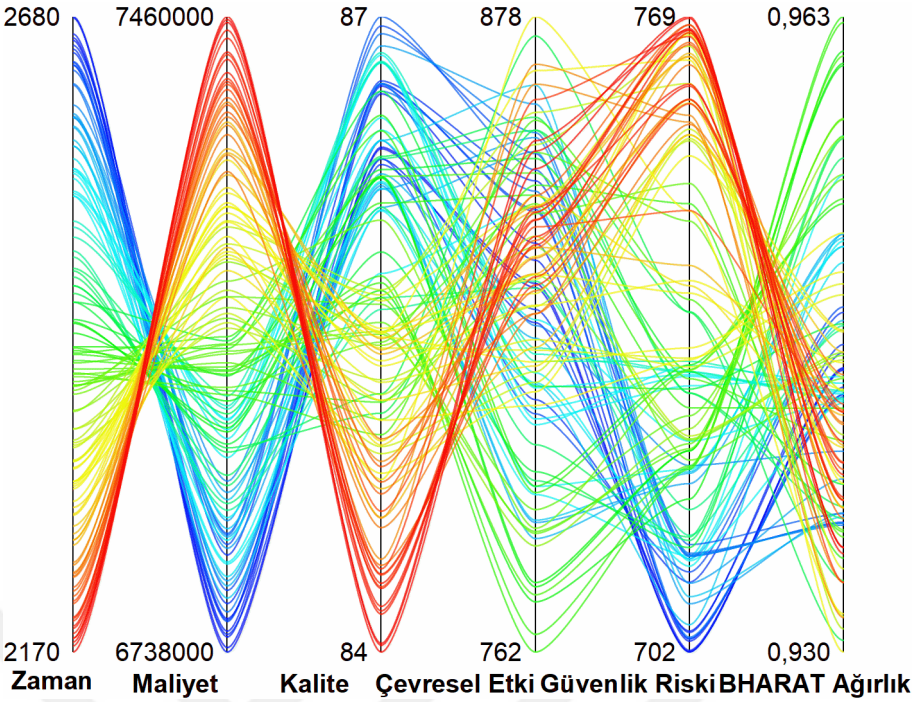
Şekil 136'da 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için elde edilen pareto çözümlerine ait BHARAT ağırlıkları ile zaman, maliyet, kalite, çevresel etki ve güvenlik riski değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Pareto çözümleri incelendiğinde, sürelerin 2170-2680 gün aralığında, maliyetlerin 6738000-7460000 aralığında, kalite değerlerinin 84-87 aralığında, çevresel etki değerlerinin 762-878 aralığında ve güvenlik riski değerlerinin 702-769 aralığında dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Her bir çizgi, grafikte bir pareto çözümünü temsil etmekte ve BHARAT yöntemiyle elde edilen ağırlıklarla (0.930-0.963) ilişkilendirilmektedir.

BHARAT yöntemi uygulaması sonucunda en yüksek ağırlık değerine sahip üç pareto çözümü Tablo 218'de gösterilmiştir. Tabloda sunulan her bir seçenek için tercih edilen

opsiyonlar, projenin bitiş süresi, toplam maliyeti, kalite değeri, çevresel etki değeri, güvenlik riski değeri ve BHARAT ağırlık değerleri bulunmaktadır. Değerlendirme sonucunda, kriterlerin eşit ağırlıkta kullanılması durumunda en iyi çözüm olarak belirlenen ilk seçenek, 2412 gün sürede tamamlanıp 7053600$ maliyet, 86.13 kalite değeri, 762.29 çevresel etki değeri ve 721.08 güvenlik riski değeri ile gerçekleşmiş ve BHARAT ağırlık değeri 0.9628 olarak hesaplanmıştır. İkinci en iyi alternatif 2404 günde tamamlanmakta, 7056800$ maliyet gerektirmekte, 86.16 kalite değeri, 765.49 çevresel etki değeri ve 721.24 güvenlik riski değeri sağlamakta olup, 0.9625 BHARAT ağırlık değerine sahiptir.

Tablo 218. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi için BHARAT yöntemi ile belirlenen ilk üç pareto çözümü

No	Kullanılan Opsiyonlar	Zaman	Maliyet	Kalite	Çevresel Etki	Güvenlik Riski	BHARAT Ağrılık
1	1,3,1,1,3,1,3,3,3,3,3,1,1,2,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,3,2,1,1,2,1,3,3,2,3,2,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,3,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,3,2,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,3,1,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1	2412	7053600	86,13	762,29	721,08	0,9628
2	1,3,1,1,3,1,3,4,3,3,3,1,1,2,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,3,2,1,1,2,1,3,4,2,3,2,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,3,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,4,2,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,4,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,3,4,2,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,3,1,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,4,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,3,4,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,4,2,3,2,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1	2404	7056800	86,16	765,49	721,24	0,9625
3	1,3,1,1,3,1,3,3,3,3,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,1,1,2,1,3,3,1,3,2,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,3,3,2,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,3,3,1,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,3,1,3,1,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,2,1,3,3,3,3,3,1,1,3,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,3,3,1,3,2,1,1,3,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1	2426	7023400	86,09	771,39	717,91	0,9610



Şekil 136. 250 aktiviteli TCQESRTP problemi pareto çözümlerinin BHARAT yöntemi ile değerlendirilmesi

3.9. Çok Amaçlı İnşaat Proje Planlama Problemleri Genel Değerlendirme

Bu çalışmada geliştirilen operatörlerin performansı, farklı problem boyutları göz önüne alınarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin (NDSII, SP, NDSIII ve MSP) performansları, farklı metasezgisel algoritmalarla (Rao serileri, WOA ve GWO) entegre edilerek test edilmiş ve her problem sınıfı için detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir algoritmanın performansını değerlendirmek için farklı metrikler kullanılmış olup, bu metriklerin her biri çözümlerin farklı özelliklerini değerlendirmektedir. C-metrik, algoritmaların ürettiği Pareto çözümlerinin birbirlerine karşı baskınlık oranlarını göstermekte ancak çözümlerin kalitesi ve dağılımı hakkında bilgi vermemektedir. MID (ortalama ideal mesafe) metriği, üretilen çözümlerin ideal noktaya olan uzaklığını ölçerek performansını değerlendirmekte, ancak çözümlerin çeşitliliğini ve geniş bir alanı kapsamasını dikkate almamaktadır. Yayılım metriği ise yalnızca çözümlerin Pareto cephesi üzerindeki homojen dağılımını ölçmekte, çözümlerin kalitesini göz ardı etmektedir. Hiper hacim metriği, çözümlerin hem kalitesini (geniş bir alanı kapsaması, iyi yayılması ve baskın olması) hem de çeşitliliğini aynı anda

değerlendirebilen en kapsamlı ölçütlerden biridir. Bu nedenle, algoritmaların genel performans karşılaştırmasında hiper hacim metriği öncelikli olarak dikkate alınmıştır.

Ayrıca, çalışma kapsamında önerilen algoritmaların performanslarını karşılaştırmak ve performans metrikleri açısından güvenilir bir değerlendirme sağlamak amacıyla, literatürde tüm işlem adımları açıkça belirtilen algoritmalar orijinal çalışmalarındaki şekliyle yeniden üretilmiştir. Böylece literatürdeki algoritmaların yeniden uygulanmasıyla elde edilen sonuçların orijinal çalışmalarla tutarlılığı doğrulanmış ve bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmaların güvenilir bir karşılaştırması yapılabilmiştir.

İki amaçlı zaman-maliyet problemlerinde SP operatörü ile geliştirilen algoritmalar, NDSII operatörüne göre önemli performans artışları sağlamıştır. Bu problem boyutunda, SP operatörü ile geliştirilen versiyonlar, literatürde Tran (2020) tarafından önerilen MOSGO algoritmasına göre çok daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak daha yüksek hiper hacim değerine sahip çözümler üretmiştir. Özellikle WOA algoritmasının SP operatörü ile entegrasyonu tüm problem boyutlarında tutarlı ve yüksek performans gösterirken, Rao serileri özellikle küçük ölçekli problemlerde başarılı olmuştur.

Üç amaçlı problemlerde hem SP hem de NDSIII operatörleri belirgin şekilde öne çıkmıştır. NDSII ile geliştirilen versiyonlar literatürdeki çalışmalara göre düşük performans gösterirken, SP ve NDSIII operatörleri ile algoritmaların performansları önemli ölçüde artırılmıştır. Bu durum, üç amaçlı problemlerde operatör seçiminin optimizasyon performansı üzerindeki kritik etkisini açıkça ortaya koymaktadır. NDSIII operatörü özellikle dengeli çözümler üretme ve ortalama ideal mesafeli sonuçlar bulma konusunda üstün performans sergilerken, SP operatörü pareto cephesi üzerinde daha homojen bir dağılım elde etmede başarılı olmuştur. SP ve NDSII operatörü ile geliştirilen algoritmaların uç noktaları bulmada NDSIII operatörüne göre belirgin bir üstünlüğü gözlemlenmiştir. Ancak NDSII ile geliştirilen algoritmaların ürettiği pareto çözümlerinin, hiper hacim metriği açısından diğer algoritmalara göre oldukça geride kalmıştır. SP ve NDSIII operatörü ile geliştirilen algoritma kombinasyonlarından biri veya birkaçı literatürde yer alan OMODE (Luong vd. 2021; Cheng ve Tran, 2015), SMA (Son ve Khoi, 2024), MOABCDE (Tran vd., 2015), MOGA(Afshar ve Dolabi, 2014) ve eMOGOA (Son vd., 2023) gibi algoritmalara kıyasla daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak performans metriklerinde çok daha iyi değerler üretmeyi başarmıştır. Böylece literatürde önerilen algoritmalara göre daha az fonksiyon değerlendirmesiyle, üretilen pareto çözümlerinde çeşitlilik, yayılım ve yakınsama düzeyleri artırılmıştır. Performans analizleri, WOA algoritmasının özellikle SP operatörü ile

entegrasyonunun büyük ölçekli problemlerde tutarlı ve yüksek kaliteli sonuçlar verdiğini göstermiştir. GWO algoritması uç noktalarda diğer algoritmalara göre daha zayıf kalmasına rağmen, NDSIII operatörü ile dengeli ve ideal noktaya yakın çözümler üretmede etkili olmuştur. Bu sonuçlar, algoritmaların farklı operatörlerle entegrasyonunun çok amaçlı optimizasyon problemlerindeki başarıyı önemli ölçüde etkilediğini ve problem karakteristiğine uygun operatör seçiminin kritik önem taşıdığını göstermektedir. SP ve NDSIII operatörlerinin sağladığı performans artışı, bu operatörlerin çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili araçlar olduğunu kanıtlamaktadır.

Dört amaçlı problemler incelendiğinde, SP operatörünün pareto cephesinin kapsamını ve çözüm çeşitliliğini birlikte değerlendiren hiper hacim metriği açısından düşmesi sebebiyle MSP operatörü geliştirilmiştir. Güçlendirilmiş pareto operatörüne göre çözümlerin homojen dağılımında ödün verilmesine rağmen elde edilen sonuçların kalitesinde ciddi iyileştirmeler gözlenmiştir. Dört amaçlı problemlere ait sonuçlar incelendiğinde, MSP ve NDSIII ile geliştirilen algoritmaların hiper hacim değerleri açısından farklı problemlerde birbirine üstünlük sağladığı tespit edilmiştir. NDSIII ile geliştirilen algoritmaların ortalama ideal mesafe açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülürken pareto sonuçlarının homojen dağılımı açısından MSP ile geliştirilen algoritmaların NDSIII'e göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Problemlere ait amaçların en iyi değerlerinin elde edilmesinde MSP ile geliştirilen algoritmaların, NDSIII ile geliştirilen versiyonlarına göre daha optimuma yakın ve kararlı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Her problem türünde MSP ve NDSIII operatörleri ile geliştirilen farklı metasezgisel algoritma versiyonlarından bir veya birkaçı, literatürdeki; MOSGO (Huynh vd., 2021), MOPSO (Sharma vd., 2023), NSGA-III (Panwar ve Jha, 2021) ve SMAOTM (Son ve Khoi, 2023b) algoritmalarına kıyasla hem hesaplama verimliliği hem de performans metrikleri açısından daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Beş amaçlı problemlerde MSP operatörü ile geliştirilen algoritmalar, NDSIII operatörü ile geliştirilen versiyonlarına göre hiper hacim ve yayılım açısında daha iyi sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. NDSIII ile geliştirilen algoritmaların ise ortalama ideal mesafe açısından MSP ile geliştirilen versiyonlara göre daha iyi sonuç ürettiği görülmüştür. Literatürde yer alan OBNSGAIII (Sharma ve Trivedi, 2023) algoritmasına göre bu çalışma kapsamında önerilen NDSIII ve MSP operatörünü kullanan tüm algoritma kombinasyonlarının daha az fonksiyon değerlendirmesiyle performans metriklerinde çok daha iyi sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında metasezgisel algoritmalarda geliştirmeler yapmadan, yalnızca çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin değiştirilerek performanslarının artırılabileceği gösterilmiştir.

4. SONUÇLAR

Literatürde inşaat proje planlama problemlerindeki çok amaçlı optimizasyon çalışmalarının incelenmesi sonucunda, algoritmaların performansını artırmak için genellikle karşıt tabanlı yaklaşımlar, kaotik başlatma stratejileri ve hibrit algoritmalar gibi metasezgisel yöntemlerin geliştirildiği görülmüştür. Ancak, çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin geliştirilmesine yeterli önemin verilmediği ve genellikle kalabalık mesafe tabanlı yöntemlerin uygulandığı tespit edilmiştir. Literatürde tespit edilen diğer önemli eksiklik ise, inşaat sektöründe çok amaçlı optimizasyon çalışmalarının sonuçlarını proje yönetimi süreçlerine entegre edebilecek, farklı operatör ve algoritmaların kolayca eklenebileceği, karar vericilere optimizasyon sürecinde ve çözüm seçiminde destek sağlayabilecek, ayrıca seçilen çözümleri doğrudan proje takvimine aktarabilecek kapsamlı ve bütünleşik bir yazılımın bulunmamasıdır.

Literatürdeki bu iki temel eksikliği gidermek amacıyla tez çalışmasında, öncelikle çok amaçlı inşaat proje planlama problemlerinin çözümünde metasezgisel algoritmaların performansını artırmak için farklı seçme ve eleme operatörlerinin entegrasyonu sağlanmış, ayrıca teorik optimizasyon çalışmalarını proje yönetimi süreçlerine aktaracak bir yazılım geliştirilmiştir.

Bu kapsamda literatürde sadece genetik algoritmada kullanılan güçlendirilmiş pareto (SP) operatörü ve yalnızca genetik ve diferansiyel evrim algoritmalarında kullanılan referans tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSIII) operatörü ilk kez farklı metasezgisel algoritmalara entegre edilmiştir. SP operatörünün üç amaçlı problemlerde NDSIII ile benzer performans göstermesine rağmen, dört amaçlı (zaman-maliyet-kalite-çevresel etki ve zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski) problemlerde hiper hacim değerlerinde önemli düşüşler gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, literatürde de belirtildiği gibi SP operatörünün dört ve daha fazla amaçlı problemlerde çözüm kalitesi açısından yetersiz kaldığını doğrulamaktadır. Bu sınırlılığı gidermek amacıyla bu çalışmada, k-ortalamalar kümeleme yöntemi ve Mahalanobis uzaklık metriğini kullanan modifiye edilmiş güçlendirilmiş pareto (MSP) operatörü geliştirilmiştir. Dört amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki ve zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski problemlerinde yapılan testlerde, geliştirilen MSP operatörü, pareto cephesinin kapsamını ve çözüm çeşitliliğini birlikte değerlendiren hiper hacim metriği açısından önemli artışlar sağlamıştır. SP operatörüne göre çözümlerin homojen dağılımında

kısmi bir ödün verilmesine rağmen, elde edilen sonuçların kalitesinde ciddi iyileştirmeler gözlenmiştir.

Geliştirilen operatörlerin performansını kapsamlı bir şekilde test etmek için yedi farklı problem sınıfı ele alınmıştır: iki amaçlı zaman-maliyet, üç amaçlı zaman-maliyet-kalite, zaman-maliyet-çevresel etki, zaman-maliyet-güvenlik riski, dört amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki, zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski ve beş amaçlı zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski optimizasyon problemleri. Bu geniş problem setinin çözümü için son yıllarda farklı alanlarda başarılı sonuçlar gösteren, Gri kurt optimizasyonu (GWO), Balina optimizasyon algoritması (WOA) ve Rao serileri gibi üç temel algoritma seçilmiştir.

Geliştirilen yaklaşımların performansı problem boyutlarına göre değerlendirildiğinde, ilk olarak iki amaçlı zaman-maliyet problemlerinde SP operatörünün önemli performans artışları sağladığı görülmektedir. Kalabalık mesafe tabanlı baskın olmayan sıralama (NDSII) operatörü ile geliştirilen algoritmalara kıyasla, SP operatörü ile geliştirilen versiyonların çözüm kalitesi açısından üstün sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. SP operatörü ile geliştirilen algoritmaların, literatürdeki MOSGO algoritmasına göre çok daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanarak daha kaliteli çözümler üretmesi, hesaplama verimliliği açısından önemli bir avantaj sağlamıştır.

Problem boyutu artırılarak üç amaçlı problemler incelendiğinde hem SP hem de NDSIII operatörlerinin etkisi daha belirgin hale geldiği saptanmıştır. NDSII ile geliştirilen algoritmalar literatürdeki sonuçlara göre oldukça geri kalırken, SP ve NDSIII çok amaçlı seçme ve eleme operatörleri ile geliştirilen algoritmaların performansları önemli ölçüde artmıştır. NDSIII operatörü özellikle dengeli çözümler üretmede ve ideal noktaya yakın sonuçlar bulmada başarılı olurken, SP operatörü pareto cephesi üzerinde daha homojen bir dağılım sağlamıştır. Bir algoritmanın farklı operatörlerle geliştirilen versiyonları arasındaki önemli performans farkları, operatör seçiminin çok amaçlı optimizasyon başarısındaki önemini ortaya koymuştur. NDSIII ve SP operatörleriyle geliştirilen algoritma versiyonları incelenen her problem sınıfında farklı başarı düzeyleri göstermiş ve problem tipine göre farklı algoritma-operatör kombinasyonları öne çıkmıştır. Bu kombinasyonlardan bir veya birkaçı OMODE, SMA, MOGA, eMOGOA ve MOABCDE gibi literatürdeki mevcut algoritmalara göre çok daha az fonksiyon değerlendirmesi ile daha kaliteli sonuçlar elde etmiştir.

Analizler dört amaçlı problemler (zaman-maliyet-kalite-çevresel etki ve zaman-maliyet-kalite-güvenlik riski) doğrultusunda değerlendirildiğinde, MSP operatörü ile geliştirilen algoritmalar, SP versiyonlarına göre hiper hacim ve C-metrik değerleri açısından daha üstün sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. NDSIII operatörü ise ideal noktaya yakın çözümler üretmede daha başarılı olmuştur. Bu problem boyutunda SP operatörünün hiper hacim açısından yetersizlikleri belirgin hale gelmiş, ancak geliştirilen MSP operatörü bu sınırlılıkları başarıyla gidermiş ve üstün performans göstermiştir. Her problem türünde MSP ve NDSIII operatörleri ile geliştirilen farklı metasezgisel algoritma versiyonlarından bir veya birkaçı, literatürdeki MOSGO, MOPSO, NSGA-III ve SMAOTM algoritmalarını hem hesaplama verimliliği hem de çözüm kalitesi açısından geride bırakmıştır.

Son olarak beş amaçlı problemler (zaman-maliyet-kalite-çevresel etki-güvenlik riski) ele alındığında MSP ve NDSIII operatörleri test edilmiş, MSP operatörü bu problem boyutunda belirgin şekilde öne çıkmıştır. MSP operatörü ile geliştirilen algoritmalar, özellikle büyük ölçekli problemlerde daha tutarlı ve kaliteli sonuçlar elde etmiştir. Farklı operatörlerle geliştirilen algoritmalar, literatürdeki OBNSGAIII algoritmasına göre daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanılmasına rağmen, performans kriterlerinde daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Teorik geliştirmelerin pratikte uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla, MATLAB ve MS Project entegrasyonlu modüler bir yazılım programı geliştirilmiştir. Program, modüler yapısı sayesinde farklı operatörlerin ve algoritmaların kolaylıkla eklenebilmesine olanak tanımaktadır. Amaç fonksiyonları doğrudan MATLAB üzerinden tanımlanabilmekte veya zaman ve maliyet verileri MS Project'ten otomatik olarak çekilebilmektedir. Yazılım, karar vericilere çok amaçlı seçme-eleme operatörlerini ve metasezgisel algoritmaları bir arayüz üzerinden seçme ve optimizasyon sürecini başlatma imkânı sunmaktadır. Ayrıca, pareto optimal çözüm kümesi içerisinden en uygun çözümün seçilebilmesi için en iyi bütünsel uyarlanabilir özellik sıralama tekniği (BHARAT) başta olmak üzere çeşitli çok kriterli karar verme yöntemlerinin entegre edilebileceği esnek bir altyapı sağlamaktadır. Seçilen pareto çözümüne göre MS Project'teki iş takvimi otomatik olarak güncellenebilmekte ve böylece teorik optimizasyon sonuçları pratik proje yönetimi uygulamalarına doğrudan entegre edilebilmektedir.

Tüm bu çalışmalar ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda, bu araştırmanın literatüre sağladığı katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Çok amaçlı inşaat proje planlama problemlerinin çözümünde metasezgisel algoritmaların performansını artırmak için farklı operatörler geliştirilmiş ve operatör seçiminin önemi ortaya konulmuştur.
- ✓ Çok amaçlı inşaat planlama problemlerinde NDSIII ve SP operatörlerinin farklı metasezgisel algoritmalarla entegrasyonu sağlanmış, bu entegrasyonun algoritmaların performansını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir.
- ✓ Dört ve daha fazla amaçlı problemlerin çözümü için k-ortalamalar kümeleme yöntemi ve Mahalanobis uzaklık metriğini kullanan özgün bir MSP operatörü geliştirilmiş, çok fazla amaçlı problemlerde daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.
- ✓ Geliştirilen operatörler sayesinde literatürdeki algoritmalara göre çok daha az fonksiyon değerlendirmesi kullanılmasına rağmen, daha kaliteli çözümler elde edilmiş ve hesaplama verimliliğinde önemli iyileştirmeler sağlanmıştır.
- ✓ MATLAB ve MS Project entegrasyonlu modüler bir yazılım geliştirilerek, teorik optimizasyon çalışmalarının pratikte uygulanabilirliği artırılmış ve akademik çalışmaların sektörel uygulamalara dönüşümü kolaylaştırılmıştır.
- ✓ Karar destek mekanizması için çok kriterli karar verme yöntemleri entegre edilmiş, karar vericilerin pareto optimal çözümler arasından tercihlerine göre en uygun alternatifi seçebilmelerine olanak sağlanmıştır.
- ✓ MS Project ile entegrasyon sayesinde seçilen pareto çözümünün proje takvimine otomatik aktarılması sağlanmış, böylece optimizasyon sonuçlarının doğrudan proje yönetimi süreçlerine entegrasyonu gerçekleştirilmiştir.
- ✓ Metasezgisel algoritmalar ve çok amaçlı seçme-eleme operatörlerinin kolayca eklenebileceği esnek bir yazılım altyapısı oluşturulmuş, böylece gelecekte geliştirilecek yeni yöntemlerin de sisteme entegre edilebilmesine imkân tanınmıştır.
- ✓ Geliştirilen yazılıma hiper hacim başta olmak üzere farklı performans metrikleri entegre edilebilmekte, böylece çalışmadan elde edilen sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması, çok amaçlı seçme ve eleme operatörlerinin metasezgisel algoritmalarla entegrasyonu yoluyla inşaat proje planlaması alanına önemli katkılar sağlamıştır. Ancak bu alanda yapılabilecek iyileştirmeler ve yeni uygulama alanları için aşağıdaki araştırma konuları önerilmektedir:

- ✓ Geliştirilen operatörlerin farklı meta sezgisel algoritmalara entegrasyonu test edilebilir ve operatörlerin performansı daha geniş bir algoritma (Aritmetik optimizasyon, Jaya, Akış yönü, Çoklu evren algoritmaları vb.) yelpazesinde incelenebilir.
- ✓ Çok amaçlı optimizasyon operatörlerinin paralel hesaplama teknikleriyle entegrasyonu araştırılarak, büyük ölçekli problemlerde hesaplama verimliliği daha da artırılabilir.
- ✓ Geliştirilen yazılımın web tabanlı bir platforma dönüştürülmesi ve bulut teknolojileriyle entegrasyonu sağlanarak, daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşılabilir.
- ✓ Büyük veri analizi teknikleri kullanılarak geçmiş optimizasyon sonuçlarından öğrenme yapılabilir ve benzer problemler için daha hızlı çözümler üretilebilir. Veri madenciliği ve makine öğrenmesi teknikleri ile optimizasyon süreci iyileştirilebilir.
- ✓ MS Project dışındaki proje yönetimi yazılımlarıyla da entegrasyon sağlanarak, yazılımın farklı platformlarda kullanılabilirliği artırılabilir. Yaygın kullanılan diğer proje yönetimi araçlarıyla uyumlu hale getirilebilir.
- ✓ Proje risklerinin ve belirsizliklerin daha iyi modellenebilmesi için bulanık mantık entegre edilebilir. Böylece gerçek dünya problemlerinin daha gerçekçi bir şekilde ele alınması sağlanabilir.
- ✓ Proje yönetim parametrelerine kaynak dengeleme entegre edilerek problemlere yeni bir boyut kazandırılabilir.

6. KAYNAKLAR

Afshar, A., & Dolabi, H. R. Z. (2014). Multi-objective optimization of time-cost-safety using genetic. *Int. J. Optim. Civil Eng.*, 4(4), 433–450.

Afshar, A., Kaveh, A., & Shoghli, O. R. (2007). Multi-objective optimization of time-cost-quality using multi-colony ant algorithm. *Asian Journal Of Civil Engineering (Building And Housing)*, 8(2), 113–124.

Albayrak, G., & Özdemir, İ. (2018). Multimodal optimization for time-cost trade-off in construction projects using a novel hybrid method based on FA and PSO. *Revista de la construcción*, 17(2), 304–318.

Aminbakhsh, S., & Sonmez, R. (2016). Discrete particle swarm optimization method for the large-scale discrete time–cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, 51, 177–185.

Aminbakhsh, S., & Sonmez, R. (2017). Pareto front particle swarm optimizer for discrete time-cost trade-off problem. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(1).

Audet, C., Bigeon, J., Cartier, D., Le Digabel, S., & Salomon, L. (2021). Performance indicators in multiobjective optimization. *European Journal of Operational Research*, 292(2), 397–422.

Banihashemi, S. A., Khalilzadeh, M., Shahraki, A., Malkhalifeh, M. R., & Ahmadizadeh, S. S. R. (2021). Optimization of environmental impacts of construction projects: a time–cost–quality trade-off approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(3), 631–646.

Burns, S. A., Liu, L., & Feng, C. W. (1996). The LP/IP hybrid method for construction time-cost trade-off analysis. *Construction Management and Economics*, 14(3), 265–276.

Chand, S., & Wagner, M. (2015). Evolutionary many-objective optimization: A quick-start guide. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 20(2), 35–42.

Cheng, M.-Y., & Tran, D.-H. (2015). Opposition-based multiple-objective differential evolution to solve the time–cost–environment ımpact trade-off problem in construction projects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(5), 1–10.

Cheng, M. Y., Tran, D. H., & Cao, M. T. (2016). Chaotic initialized multiple objective differential evolution with adaptive mutation strategy (CA-MODE) for construction project time-cost-quality trade-off. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(2), 210–223.

Choudhry, R. M. (2017). Achieving safety and productivity in construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(2), 311–318.

Corne, D. W., Jerram, N. R., Knowles, J. D., & Oates, M. J. (2001). PESA-II: region-based selection in evolutionary multiobjective optimization. *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 283–290.

Corne, D. W., Knowles, J. D., & Oates, M. J. (2000). The Pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization. *In: Schoenauer, M., et al. Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. PPSN 2000. Lecture Notes in Computer Science*, vol 1917. Springer, Berlin, Heidelberg

Deb, K., & Jain, H. (2014). An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part ı: solving problems with box constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4), 577–601.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.

Dhawan, A., Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2022). Simulated annealing-based time–cost trade-off model for construction projects. *In Artificial Intelligence and Sustainable Computing: Proceedings of ICSISCET 2020*, s. 33-43. Singapore.

Eirgash, M. A., & Toğan, V. (2023). A novel oppositional teaching learning strategy based on the golden ratio to solve the Time-Cost-Environmental impact Trade-Off optimization problems. *Expert Systems with Applications*, 224 (3).

Eirgash, M. A., Toğan, V., & Dede, T. (2019). A multi-objective decision making model based on TLBO for the time – cost trade-off problems. *Structural Engineering and Mechanics*, 71(2), 139–151.

El-Rayes, K., & Kandil, A. (2005). Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(4), 477–486.

Fallah-Mehdipour, E., Haddad, O.B., Tabari, M. M.R., & Mariño, M. A. (2012). Extraction of decision alternatives in construction management projects: Application and adaptation of NSGA-II and MOPSO. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2794–2803.

Feng, C.-W., Liu, L., & Burns, S. A. (1997). Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off Problems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11(3), 184–189.

Fonseca, C. M., & Fleming, P. J. (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization. *Discussion and Generalization*. Icga, 93(7).

Ge, F., Hou, X., Chen, D., Shen, L., & Liu, H. (2024). A dynamic multi-objective evolutionary algorithm based on Mahalanobis distance and intra-cluster individual correlation rectification. *Information Sciences*, 678, 120922.

Geem, Z. W. (2010). Multiobjective optimization of time-cost trade-off using harmony search. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(6), 711–716.

Gen, M., & Cheng, R. (1999). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization.* John Wiley ve Sons.

Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, *Addion wesley*, *1989*(102), 36.

Horn, J., Nafpliotis, N., & Goldberg, D. E. (1994). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *In Proceedings of the first IEEE conference on evolutionary computation. IEEE world congress on computational intelligence*, 82–87.

Hu, Y., Zheng, J., Jiang, S., Yang, S., Zou, J., & Wang, R. (2024). A Mahalanobis Distance-Based Approach for Dynamic Multiobjective Optimization With Stochastic Changes. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 28(1), 238–251.

Huang, M., Wan, Z., Cheng, X., Xu, Z., Lei, Y., & Pan, D. (2022). Two-stage damage identification method based on fractal theory and whale optimization algorithm. *Advances in Structural Engineering*, 25(11), 2364–2381.

Huynh, V. H., Nguyen, T. H., Pham, H. C., Huynh, T. M. D., Nguyen, T. C., & Tran, D. H. (2021). Multiple objective social group optimization for time–cost–quality–carbon dioxide in generalized construction projects. *International Journal of Civil Engineering*, 19(7), 805–822.

Inyim, P., Rivera, J., & Zhu, Y. (2015). Integration of building ınformation modeling and economic and environmental impact analysis to support sustainable building design. *Journal of Management in Engineering*, 31(1), 1–11.

Jain, S., & Dubey, K. K. (2023). Employing the Latin hypercube sampling to improve the NSGA III performance in multiple-objective optimization. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(8), 3319–3330.

Kalemci, E. N., & İkizler, S. B. (2020). Rao-3 algorithm for the weight optimization of reinforced concrete cantilever retaining wall. *Geomechanics and Engineering*, 20(6), 527–536.

Kalemci, E. N., İkizler, S. B., Dede, T., & Angın, Z. (2020). Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. *Structures*, 23, 245–253.

Kannimuthu, M., Raphael, B., Palaneeswaran, E., & Kuppuswamy, A. (2019). Optimizing time, cost and quality in multi-mode resource-constrained project scheduling. *Built Environment Project and Asset Management*, 9(1), 44–63.

Kaveh, A. (2017). Sizing optimization of skeletal structures using the enhanced whale optimization algorithm. *Applications of metaheuristic optimization algorithms in civil engineering*, 47-69.

Kaveh, A., Rajabi, F., & Mirvalad, S. (2021). Many-objective optimization for construction project scheduling using non-dominated sorting differential evolution algorithm based on reference points. *Scientia Iranica*, 28(6), 3112–3128.

Kelley, J. E. (1961). Critical-Path planning and scheduling: mathematical basis. *Operations Research*, 9(3), 296–320.

Kelley, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path planning and scheduling. *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, IRE-AIEE-ACM 1959.

Knowles, J., & Corne, D. (2002). On metrics for comparing nondominated sets. *In proceedings of the 2002 congress on evolutionary computation*. CEC'02 (Cat. No.02TH8600), 1, 711–716.

Liu, G., Li, X., & Alam, K. M. (2023). Multiple objective immune wolf colony algorithm for solving time-cost-quality tradeoff problem. *Plos one*, 18(2).

Liu, S., Tao, R., & Tam, C. M. (2013). Optimizing cost and CO2 emission for construction projects using particle swarm optimization. *Habitat International*, 37, 155–162.

Lu, C., Gao, L., & Yi, J. (2018). Grey wolf optimizer with cellular topological structure. *Expert Systems with Applications*, 107, 89–114.

Luong, D. L., Tran, D. H., & Nguyen, P. T. (2021). Optimizing multi-mode time-cost-quality trade-off of construction project using opposition multiple objective difference evolution. *International Journal of Construction Management*, 21(3), 271–283.

Magalhães-Mendes, J. (2016). Multiobjective optimization of construction project time-cost-quality trade-off using a genetic algorithm. *WSEAS Transactions on Computers*, 14, 310.

Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., & Niaki, S. T. A. (2017). Multi-skilled project scheduling with level-dependent rework risk; three multi-objective mechanisms based on cuckoo search. *Applied Soft Computing*, 54, 46–61.

Marzouk, M., & Abdelakder, E. M. (2019). On the use of multi-criteria decision making methods for minimizing environmental emissions in construction projects. *Decision Science Letters*, 8(4), 373–392.

Marzouk, M., Madany, M., Abou-Zied, A., & El-said, M. (2008). Handling construction pollutions using multi-objective optimization. *Construction Management and Economics*, 26(10), 1113–1125.

Meyer, W. L., & Shaffer, L. R. (1963). Extensions of the critical path method through the application of integer programming. *Civil Engineering Construction Research Series 2*, Univ. of Illinois.

Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51–67.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61.

Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., & Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time-cost-quality trade-off problems in construction projects. *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3089–3104.

Mungle, S., Benyoucef, L., Son, Y. J., & Tiwari, M. K. (2013). A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time-cost-quality trade-off problems: A case study of highway construction project. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8), 1953–1966.

Ng, S. T., & Zhang, Y. (2008). Optimizing construction time and cost using ant colony optimization approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(9), 721–728.

Ozcan-Deniz, G., Zhu, Y., & Ceron, V. (2012). Time, cost, and environmental impact analysis on construction operation optimization using genetic algorithms. *Journal of Management in Engineering*, 28(3), 265–272.

Panwar, A., & Jha, K. N. (2019). A many-objective optimization model for construction scheduling. *Construction Management and Economics*, 37(12), 727–739.

Panwar, A., & Jha, K. N. (2021). Integrating Quality and Safety in Construction Scheduling Time-Cost Trade-Off Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(2).

Pham, HA., Truong, VH., & Tran, TD. (2022). Discrete truss optimization using Rao algorithms. *In CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures* s. 127-135. Springer Singapore.

Pham, V. H. S., Nguyen Dang, N. T., & Nam, N. Van. (2024). Optimizing time and cost in construction projects with a hybridized multi-verse optimizer and opposition-based learning. *Engineering, Construction and Architectural Management*.

Pham, V. H. S., Vo Duy, P., & Nguyen Dang, N. T. (2023). Optimizing time, cost, and carbon in construction: grasshopper algorithm empowered with tournament selection and opposition-based learning. *Scientific Reports*, 13(1), 22212.

Polat, G., Kaplan, B., & Bingol, B. N. (2015). Subcontractor Selection using Genetic Algorithm. *Procedia Engineering*, 123, 432–440.

Rao, R. V. (2020). Rao algorithms: Three metaphor-less simple algorithms for solving optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(1).

Rao, R. V. (2024). BHARAT: A simple and effective multi-criteria decision-making method that does not need fuzzy logic, Part-2: Role in multi- and many-objective optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 15(1), 1–12.

Rao, R. V., & Lakshmi, R. J. (2021). Ranking of Pareto-optimal solutions and selecting the best solution in multi- and many-objective optimization problems using R-method. *Soft Computing Letters*, 3, 100015.

Rao, R. V., & Pawar, R. B. (2020). Quasi-oppositional-based Rao algorithms for multi-objective design optimization of selected heat sinks. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(6), 830–863.

Riquelme, N., Von Lucken, C., & Baran, B. (2015). Performance metrics in multi-objective optimization. *2015 Latin American Computing Conference (CLEI)*, 1–11.

Sakellaropoulos, S., & Chassiakos, A. P. (2004). Project time–cost analysis under generalised precedence relations. *Advances in Engineering Software*, 35(10), 715–724.

Sang-To, T., Le-Minh, H., Mirjalili, S., Abdel Wahab, M., & Cuong-Le, T. (2022). A new movement strategy of grey wolf optimizer for optimization problems and structural damage identification. *Advances in Engineering Software*, 173, 103276.

Saxena, D. K., Ray, T., Deb, K., & Tiwari, A. (2009). Constrained many-objective optimization: A way forward. *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 545–552.

Sharma, K., Soni, A., & Trivedi, M. K. (2023). A Particle Swarm Optimization-Based Model for Quality–Safety Trade-Off Optimization Under Constraint Duration and Cost of Construction Project. *In Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques: Select Proceedings of AEOTIT 2022*, s. 115-126. Singapore: Springer Nature Singapore.

Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2022a). AHP and NSGA-II-Based time–cost–quality trade-off optimization model for construction projects. *In Artificial Intelligence and Sustainable Computing: Proceedings of ICSISCET 2020 2022*, s. 45-63.

Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2022b). Latin hypercube sampling-based NSGA-III optimization model for multimode resource constrained time–cost–quality–safety trade-off in construction projects. *International Journal of Construction Management*, 22(16), 3158–3168.

Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2023a). Discrete OBNSGA III method-based robust multi-objective scheduling model for civil construction projects. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(7), 2247-2264.

Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2023b). Modelling the resource constrained time-cost-quality-safety risk-environmental impact trade-off using opposition-based NSGA III. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(8), 3083-3098.

Shir, O. M., Emmerich, M., & Back, T. (2007). Self-Adaptive Niching CMA-ES with Mahalanobis Metric. *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 820–827.

Shishehgarkhaneh, M., Azizi, M., Basiri, M., & Moehler, R. (2022). Bim-based resource tradeoff in project scheduling using fire hawk optimizer (FHO). Buildings, 12(9), 1472.

Son, P. V. H., & Khoi, L. N. Q. (2022). Utilizing artificial intelligence to solving time – cost – quality trade-off problem. *Sci Rep* **12**, 20112 (2022).

Son, P. V. H., & Khoi, L. N. Q. (2023a). Building projects with time–cost–quality–environment trade-off optimization using adaptive selection slime mold algorithm. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(5), 1333–1350.

Son, P. V. H., & Khoi, L. N. Q. (2023b). Time–cost–quality–CO2 emissions optimization in construction management using slime mold algorithm opposition tournament mutation. *Soft Computing*, 27(17), 12071–12098.

Son, P. V. H., & Khoi, L. N. Q. (2023c). Optimization in construction management using adaptive opposition slime mould algorithm. *Advances in Civil Engineering*, 2023(1), 7228896.

Son, P. V. H., & Khoi, L. N. Q. (2024). Application of slime mold algorithm to optimize time, cost and quality in construction projects. *International Journal of Construction Management*, 24(13), 1375–1386.

Son, P. V. H., & Tri, B. N. (2024). Construction management multiple-objective trade-off problems using the flow direction algorithm (FDA). *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(4), 3415–3429.

Sonmez, R., & Bettemir, Ö.H. (2012). A hybrid genetic algorithm for the discrete time–cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, 39(13), 11428–11434.

Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Muiltiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, 2(3), 221–248.

Tao, X., Li, H., Mao, C., Wang, C., Hui Yap, J. B., Sepasgozar, S., Shirowzhan, S., & Rose, T. (2019). Developing shuffled frog-leaping algorithm (SFLA) method to solve power load-constrained TCRTO problems in civil engineering. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 1404636.

The MathWorks Inc. (2022). MATLAB (version:9.13.0 (R2022b)). The MathWorks Inc. https://www.mathworks.com

Tiwari, A., Sharma, K., & Trivedi, M. K. (2022). NSGA-III-based time–cost–environmental ımpact trade-off optimization model for construction projects. *In Artificial Intelligence and Sustainable Computing: Proceedings of ICSISCET 2020*, s. 11-25. Springer Singapore.

Tran, D. H. (2020). Optimizing time–cost in generalized construction projects using multiple-objective social group optimization and multi-criteria decision-making methods. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(9), 2287–2313.

Tran, D. H., Cheng, M. Y., & Cao, M. T. (2015). Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time-cost-quality tradeoff problem. *Knowledge-Based Systems*, 74, 176–186.

Uzlu, E. (2024). Modeling and Forecasting of Water Demand in the City of Istanbul Using Artificial Neural Networks Optimized with Rao Algorithms. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-14.

Wanberg, J., Harper, C., Hallowell, M. R., & Rajendran, S. (2013). Relationship between construction safety and quality performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(10).

Wang, T., Abdallah, M., Clevenger, C., & Monghasemi, S. (2021). Time–cost–quality trade-off analysis for planning construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(1), 82–100.

Wang, Y.N., Wu, L.H., & Yuan, X.F. (2010). Multi-objective self-adaptive differential evolution with elitist archive and crowding entropy-based diversity measure. *Soft Computing*, 14(3), 193–209.

Wang, Y., Hua, Z., & Wang, L. (2018). Parameter estimation of water quality models using an improved multi-objective particle swarm optimization. *Water*, 10(1), 32.

Xiong, Y., & Kuang, Y. (2008). Applying an ant colony optimization algorithm-based multiobjective approach for time–cost trade-off. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(2), 153–156.

Yang, I.-T. (2007). Using elitist particle dwarm optimization to facilitate bicriterion time-cost trade-off analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(7), 498–505.

Yi, K.-J., & Langford, D. (2006). Scheduling-Based Risk Estimation and Safety Planning for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(6), 626–635.

Yılmaz, M., & Dede, T. (2023). Multi-objective time–cost trade-off optimization for the construction scheduling with Rao algorithms. *Structures*, 48, 798-808.

Zhang, H., & Li, H. (2010). Multi-objective particle swarm optimization for construction time-cost tradeoff problems. *Construction Management and Economics*, 28(1), 75–88.

Zhang, H., & Xing, F. (2010). Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time–cost–quality tradeoff in construction. *Automation in Construction*, 19(8), 1067–1075.

Zhang, L., Du, J., & Zhang, S. (2014). Solution to the time-cost-quality trade-off problem in construction projects based on immune genetic particle swarm optimization. *Journal of Management in Engineering*, 30(2), 163–172.

Zheng, D. X. M., Ng, S. T., & Kumaraswamy, M. M. (2004). Applying a genetic algorithm-based multiobjective approach for time-cost optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(2), 168–176.

Zheng, D. X. M., Ng, S. T., & Kumaraswamy, M. M. (2005). Applying pareto ranking and niche formation to genetic algorithm-based multiobjective time–cost optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(1), 81–91.

Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. *TIK Report*, 103.

Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach. TIK Report, 43.

Zitzler, E., & Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257–271.

Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M., & Da Fonseca, V. G. (2003). Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(2), 117–132.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet YILMAZ, ilk ve orta öğrenimini Çorum ilinde bitirdikten sonra lise eğitimini 2008 yılında Ordu Fatih YDA Lisesi'nde tamamladı. Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde 2012 yılında tamamladı. Yüksek lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programında 2016 yılında tamamladı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine başladı. 2012-2018 arası özel sektörde çeşitli firmalarda İnşaat Mühendisi olarak çalıştı. 2018 yılından itibaren Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Meslek Yüksekokulu'nda Öğr. Gör. olarak çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmekte olup, doktora tez çalışması kapsamında SCI-E indeksli ve diğer dergilerde makaleleri, bilimsel toplantılarda sunulmuş bildirileri ve kitap bölümleri bulunmaktadır.

SCI/SCI-E kapsamında yayınlanan makaleler

Yılmaz, M., ve Dede, T. (2023). Multi-objective time–cost trade-off optimization for the construction scheduling with Rao algorithms. *Structures*, 48, 798-808.

Yılmaz, M., ve Dede, T. (2024). Multi-objective time-cost-safety risk trade-off optimization for the construction scheduling problem. *Engineering, Construction and Architectural Management.*

Yılmaz, M., ve Dede, T. (2025). Optimizing multi-objective time-cost-quality problems in construction projects: the efficacy of strength pareto-based Rao algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*.

Diğer dergiler kapsamında yayınlanan makaleler

Yılmaz, M., Dede, T., ve Grzywiński, M. (2023). Investigating multi-objective time, cost, and risk problems using the Grey Wolf Optimization algorithm. *Construction of Optimized Energy Potential Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 12(1), 79-86.

Kitap bölümleri

Yılmaz, M., Dede, T., ve Venkata Rao, R. (2023). Optimization of construction scheduling with Rao algorithm. *In Advanced engineering optimization through intelligent techniques: Select proceedings of AEOTIT 2022*, s. 99-105. Singapore: Springer Nature Singapore.

Yılmaz, M., ve Dede, T. (2024). Application of grey wolf algorithm with archive and grid mechanisms for solving construction time–cost–quality problems. *In International Conference on Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques*, s. 1-9. Singapore: Springer Nature Singapore.

Bildiriler

Yılmaz, M., ve Dede, T. (2023). İnşaat iş programlarının çok amaçlı optimizasyonunda gri kurt algortirması kullanımı. *7. Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu / 7th Engineers of Future International Student Symposium (EFIS), Zonguldak, Türkiye, 22 Haziran 2023, ss.234-241*