



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÇOK AMAÇLI DEMONTAJ HATTI
DENGELEME PROBLEMİ İÇİN DAĞINIK
ARAMA ALGORİTMASI TABANLI YENİ BİR
YAKLAŞIM

Hediye ORHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hediye ORHAN tarafından hazırlanan “Çok Amaçlı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi için Dağıntık Arama Algoritması Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım” adlı tez çalışması 26/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mustafa Servet KIRAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Hüseyin HAKLI

.....

Üye

Doç. Dr. Murat KARAKOYUN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 1649B022400651 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Hediye ORHAN

Tarih: 26/12/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK AMAÇLI DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN DAĞINIK ARAMA ALGORİTMASI TABANLI YENİ BİR YAKLAŞIM

Hediye ORHAN

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin HAKLI

2025, 60 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Hüseyin HAKLI
Prof. Dr. Mustafa Servet KIRAN
Doç. Dr. Murat KARAKOYUN

Birden çok malzemenin bir araya gelmesiyle ürün oluşmakta; bu malzemeler iş akış hattı boyunca iş gücü veya donanım kullanılarak istasyonlar arasında aktarılmaktadır. Ürünü meydana getiren işlemlerin belirli bir düzen içerisinde istasyonlarda sıralanmasıyla montaj hattı, bu sürecin tersi olan planlı söküm süreçleriyle ise demontaj hattı ortaya çıkmaktadır. Demontaj, sürdürülebilir üretim yaklaşımında geri dönüşüm, yeniden kullanım, tamir ve bertaraf süreçlerinin verimli yönetilmesi açısından kritik bir aşamadır. Bu nedenle demontaj operasyonlarının dengeli ve sistematik biçimde modellenmesi, hem kaynak kullanımını iyileştirmekte hem de endüstriyel geri kazanım süreçlerinin standartlaştırılmasına katkı sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bir NP-Hard problem olarak ele alınan Demontaj Hattı Dengeleme (DHD) Problemi, Dağınık Arama (Scatter Search – SS) algoritması ile optimize edilmiştir. Tasarlanan model yapısı üç temel kısıt ve dört uygunluk fonksiyonu üzerine inşa edilmiş olup algoritmanın başarımını değerlendirmek amacıyla hem referans literatür veri setleri (SALBP ve UALBP) hem de endüstriyel veri setleri kullanılmıştır. Çözüm kalitesini etkileyen yapılandırma parametrelerinin performansa etkisini ortaya koymak için yedi farklı çaprazlama operatörü dahil edilmiş; ayrıca görev sırası geçerliliğini korumaya yönelik deterministik ve stokastik öncelik onarma yöntemleri karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır. SS algoritmasının önemli bileşenlerinden biri olan Referans Küme Boyutu (RFC - Reference Set Size) parametresi ise 20, 18, 16, 14, 12 ve 10 değerlerinde test edilerek, en verimli kombinasyonların tespiti amaçlanmıştır. Değerlendirme sürecinde çözümlerin kalitesi yalnızca uygunluk değerleri üzerinden değil, aynı zamanda hesaplama yükü, yakınsama davranışı ve çözüm üretim maliyeti gibi FEs (Function Evaluations) ve çalışma süresi göstergeleri dikkate alınarak analiz edilmiştir; ancak ayrıntılı metrikler bulgular bölümünde detaylandırılmıştır.

Deneyisel analizler sonucunda en yüksek çözüm başarısı, RFC 18, stokastik tip 1 öncelik onarma fonksiyonu ve tüm çaprazlama tekniklerinin birlikte kullanıldığı Birleşik Çaprazlama yaklaşımı kombinasyonunda elde edilmiştir. Referans test veri setleri üzerinde yapılan karşılaştırmalarda, literatürdeki sonuçlara göre 40 verinin 17'sinde SS algoritması daha iyi çözümler üretmiş, 5 adet veride ise eşdeğer sonuçlar elde edilmiştir. Endüstriyel veri setlerinde ise 6 adet verinin 3 tanesinde en iyi performansa ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin demontaj hattı verimliliğini artırmada etkili olduğunu ve hem akademik veri kümelerinde hem de gerçek üretim ortamlarında ölçeklenebilir, etkin ve rekabetçi bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Dağınık Arama Algoritması, Demontaj Hattı Dengeleme Problemi, Meta-sezgisel, NP-Hard Problem, Optimizasyon

ABSTRACT

MS THESIS

A NEW APPROACH BASED ON SCATTER SEARCH ALGORITHM FOR MULTI-OBJECTIVE DISASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

Hediye ORHAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE OF PHILOSOPHY
IN COMPUTER ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin HAKLI

2025, 60 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin HAKLI

Prof. Dr. Mustafa Servet KIRAN

Assoc. Prof. Dr. Murat KARAKOYUN

The formation of a product requires bringing together multiple materials, which are transferred between stations along the workflow using labor or equipment. When the operations that constitute the product are sequenced at stations in an ordered manner, an assembly line emerges, whereas the reverse of this process—planned disassembly—forms the disassembly line. Disassembly is a critical stage within the sustainable production framework, as it enables efficient management of recycling, reuse, repair, and disposal processes. Therefore, modeling disassembly operations in a balanced and systematic manner improves resource utilization and contributes to the standardization of industrial recovery procedures.

In this thesis, the Disassembly Line Balancing Problem (DLBP), which is classified as NP-hard, is optimized using the Scatter Search (SS) algorithm. The proposed solution structure is built upon three main constraints and four fitness functions, and its performance has been evaluated using both benchmark datasets from the literature (SALBP and UALBP) and real industrial datasets. To examine the impact of configuration parameters on solution quality, seven different crossover operators were incorporated, and both deterministic and stochastic precedence repairing strategies were comparatively applied to preserve the feasibility of task sequencing. Additionally, Reference Set Size (RFC)—one of the key components of SS—was tested at values of 20, 18, 16, 14, 12, and 10 to identify the most efficient configurations. During evaluation, solution quality was assessed not only in terms of fitness values, but also through computational effort, convergence behavior, and solution generation cost using Function Evaluations (FEs) and run-time indicators; however, the detailed metrics are presented in the Results section.

Experimental findings indicate that the highest solution performance was achieved with the configuration integrating RFC 18, stochastic type-1 precedence repairing, and the Combined Crossover approach utilizing all crossover techniques simultaneously. In benchmark tests, the SS algorithm produced better solutions in 17 out of 40 instances compared to the literature and achieved equivalent results in 5 instances. For industrial datasets, best performance was obtained in 3 out of 6 cases. The results demonstrate that the proposed method effectively enhances disassembly line efficiency and offers a scalable, competitive, and robust solution for both academic benchmark datasets and real production environments.

Keywords: Disassembly Line Balancing, Metaheuristic, NP-Hard Problem, Optimization, Scatter Search Algorithm.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bilimsel yaklaşımı ve yönlendirici desteği ile her zaman yanımda olan danışmanım Doç. Dr. Hüseyin HAKLI'ya;

Tez savunma jürimde yer alan ve değerli yorumlarıyla çalışmama katkı sağlayan Doç. Dr. Murat KARAKOYUN ve Prof. Dr. Mustafa Servet KIRAN hocalarıma;

Çalışma sürecimde bilgi ve deneyimleri ile bana destek olan Dr. Sinem GÜNEY'e;

Bu süreç boyunca desteğini ve motivasyonunu esirgemeyen sevgili dostum Elif Zülal PINAR'a teşekkür ederim.

1649B022400651 nolu proje ile tez çalışmamı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman sabırları, sevgileri ve dualarıyla yanımda olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugüne kadar attığım her adımda yanımda olan sevgili aileme, teşekkürü bir borç bilirim.

Hediye ORHAN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. Veri Seti	20
3.2. Dağılık Arama (SS) Algoritması	22
3.3. Çaprazlama Teknikleri.....	24
4. DAĞINIK ARAMA ALGORİTMASININ DEMONTAJ HATTI DENGEME PROBLEMİ İÇİN UYGULANMASI	28
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	36
5.1. Farklı Çaprazlama Tekniklerinin Performans Analizi	37
5.2. Farklı RFC Değerlerinin Performans Analizi	43
5.3. Öncelik Onarma Fonksiyonları Performans Analizi.....	47
5.4. Referans Test Veri Seti Sonuçlarının Literatür ile Karşılaştırılması	51
5.5. Endüstriyel Veri Seti Sonuçlarının Literatür ile Karşılaştırılması	52
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
6.1. Sonuçlar	54
6.2. Öneriler	56
KAYNAKLAR	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Öncelik ilişkilerinin veri yapısı	21
Şekil 3.2. Parça id, süre, tehlike ve talep durumlarının dosya yapısı	22
Şekil 3.3. SS algoritması akış şeması	23
Şekil 3.4. PMX çaprazlama tekniği örneği	24
Şekil 3.5. Çaprazlama yapılan değerler arasındaki bağlantı şeması	25
Şekil 3.6. OBX çaprazlama tekniği örneği	25
Şekil 3.7. OX1 çaprazlama tekniği örneği	26
Şekil 3.8. IX çaprazlama tekniği örneği	26
Şekil 3.9. CX çaprazlama tekniği örneği	27
Şekil 3.10. Bağlantılı noktaların çaprazlama için seçilmesi	27
Şekil 3.11. PBX çaprazlama tekniği örneği	27
Şekil 4.1. Örnek popülasyon oluşturulması	28
Şekil 4.2. Öncelik şartını sağlamayan bireyler	29
Şekil 4.3. Çözüm kümesinin uygunluk fonksiyonuna göre sıralanması	30
Şekil 4.4. Popülasyondaki bireylerin sökülme sıralaması örnek gösterimi	31
Şekil 4.5. Referans kümesindeki bireylerin sökülme sıralaması örnek gösterimi	31
Şekil 4.6. Toplam fark hesaplaması örneği	32
Şekil 4.7. Deterministik öncelik onarma fonksiyonu çalışma örneği	33
Şekil 4.8. ST1 öncelik onarma fonksiyonu çalışma örneği	34
Şekil 4.9. ST2 öncelik onarma fonksiyonu çalışma örneği	35
Şekil 5.1. BARTHOL veri seti için uygunluk fonksiyonları değerlerinin FEs boyunca değişimi	36
Şekil 5.2. Çaprazlama tekniklerinin görsel karşılaştırması	42
Şekil 5.3. RFC değerlerinin görsel karşılaştırması	47
Şekil 5.4. Öncelik onarma tekniklerinin görsel karşılaştırması	50

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan veri setleri	18
Çizelge 3.1. SALBP ve UALBP veri setleri.....	20
Çizelge 4.1. Uygunluk fonksiyonları hesaplanma denklemleri.....	29
Çizelge 5.1. Çaprazlama tekniklerinden elde edilen sonuçlar	37
Çizelge 5.2. Çaprazlama tekniklerinin karşılaştırmalı sonuçları	41
Çizelge 5.3. RFC değerlerinin sonuçları	43
Çizelge 5.4. RFC değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları.....	45
Çizelge 5.5. Öncelik onarma fonksiyonlarının sonuçları	47
Çizelge 5.6. Öncelik onarma fonksiyonlarının karşılaştırmalı sonuçları	49
Çizelge 5.7. Literatürdeki çalışmalar ile SS algoritmasının karşılaştırılması.....	51
Çizelge 5.8. Literatürdeki çalışmalar ile SS algoritmasının karşılaştırılması.....	53



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

KISALTMALAR

ABC	Artificial Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimization
CT	Çevrim Süresi (Cycle Time)
CX	Cyclic Crossover
DHD	Demontaj Hattı Dengeleme
DTC	Deterministik
EX	Ensemble Crossover
GA	Genetik Algoritma
IX	Inversion Crossover
NP	Nondeterministik Polinom Zaman (Nondeterministic Polynomial Time)
OBX	Order Based Crossover
OX	Order Crossover
PBX	Position Based Crossover
PMX	Partially Mapped Crossover
RFC	Referans Küme Boyutu (Reference Set Count)
SS	Scatter Search
ST1	Stokastik Tip 1
ST2	Stokastik Tip 2
TB	Tavlama Benzetimi

1. GİRİŞ

Bir ürünün oluşumu, çeşitli bileşenlerin bir araya getirilmesiyle sağlanmaktadır. Bileşenler, üretim hattı boyunca insan gücü veya mekanik ekipmanlar yardımıyla taşınarak ilgili işlemlere yönlendirilmektedir. Parçalara uygulanan işlemler gruplandırılarak istasyonlar oluşturulmaktadır ve bu istasyonlar sıralı bir düzen içerisinde konumlandırıldığında montaj hattı sistemi ortaya çıkmaktadır. Montaj hattına giren parça, malzeme ve ürünler, gereken tüm işlemler yapıldıktan sonra hattın nihai ürün olarak çıkmaktadır. Bu süreç, üretim süreçlerinde verimliliğin artırılması ve standartlaştırma hedefleri doğrultusunda kritik bir öneme sahiptir. Montaj hattına zıt bir süreç olan demontaj işlemi ise, bir ürünün kendisini oluşturan parçalardan planlı bir şekilde ayrılmasıdır ve tersine montaj olarak da tanımlanabilmektedir. Demontaj süreçleri, geri dönüşüm, tamir, yeniden kullanım veya uygun şekilde bertaraf edilmek üzere ürünlerin ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, tez çalışmasında Demontaj süreçlerinin optimize edilmesi için Demontaj Hattı Dengeleme (DHD) problemi ele alınmıştır.

DHD problemi, literatürde yüksek hesaplama karmaşıklığına sahip NP-hard bir kombinatoriyal optimizasyon problemi olarak ele alınmaktadır (Gao, He, Huang, Duan, ve Suganthan, 2020). Bunun temel nedeni, problemde yer alan öncelik ilişkileri, kısıtlar ve uygunluk fonksiyonları altında çözüm uzayının üstel biçimde büyümesidir. Bu tür problemler, problem boyutunun artmasıyla birlikte klasik kesin çözüm yöntemleriyle polinom zamanda çözülememekte; bu nedenle sezgisel ve meta-sezgisel yaklaşımlar yaygın olarak tercih edilmektedir. NP-hard problemler, çözüm doğrulaması polinom zamanda yapılabilirse dahi, optimal çözümün polinom zamanda bulunabilirliği bilinmeyen problem sınıfında yer almakta olup, kombinatoriyal optimizasyon literatüründe en zor problemler arasında kabul edilmektedir.

DHD probleminde temel amaçlar şunlardır: iş istasyonu sayısının ve maliyetin en aza indirgenmesi; kaynak kullanımının verimli hale getirilmesi; kâr oranının artırılması ve denge kaybının iş istasyonları arasında eşit olarak dağıtılmasıdır. Bu amaçlar, üretim süreçlerinde verimliliğin artırılması için kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, çevrim süresinin ve işlerin tamamlanma süreleri arasındaki farkın minimize edilmesi ile üretim süreçlerindeki gecikmelerin önlenerek daha tutarlı bir üretim planı sağlanması hedeflenmiştir (Kalayci, Polat, ve Gupta, 2016).

Tez çalışmasında, yukarıda belirtilen temel amaçlara ek olarak, özellikle demontaj sürecinde tehlikeli madde ve talep durumlarına göre işlere öncelik verilmesi gibi özel durumlar da dikkate alınmıştır. Bu süreçlerin etkin bir şekilde yönetilebilmesi için geliştirilen algoritma, belirli kısıtlara uyum sağlamaktadır. Söz konusu kısıtlar arasında; iş parçaları arasında öncelik

ilişkilerine uyulması, her işin yalnızca bir iş istasyonuna atanması ve çevrim süresinin aşılmaması yer almaktadır. Bu kısıtlar, üretim süreçlerinde düzen ve verimlilik sağlamak için kritik öneme sahiptir. Çalışmada optimizasyon işlemi ile hedeflenen temel amaç, iş istasyonu sayısını minimize ederken iş akışını kesintisiz hale getirmek ve bu süreçlerde iş istasyonları arasındaki yük dengesizliğini azaltarak daha dengeli bir iş dağılımı sağlamaktır. Böylece üretimde verimlilik hedeflenmiştir.

Literatürde birkaç çeşit DHD problemi bulunmaktadır (Jiao, Deng, Li, Xing, ve Xu, 2022). Bunlardan en yaygın olanları tek taraflı, çift taraflı ve u-tipi DHD problemleridir. Çift taraflı demontaj hattı, hattın hem sağ hem sol tarafının kullanılarak demontaj işleminin gerçekleştirileceği bir yapıyı ifade etmektedir. Bu tip bir hat, işlerin paralel olarak ilerlemesine olanak tanıyarak verimliliği artırmayı hedeflemektedir. U-tipi demontaj hattında çok fonksiyonlu işçiler görev almaktadır. Çok fonksiyonlu işçi birden çok makine ile işlem yapabilmektedir ve bir çevrim zamanı içerisinde istasyondaki tüm makinaları dolaşmaktadır. Bu yapı, iş gücünün esnek kullanımını sağlayarak süreçleri daha dinamik hale getirmektedir. Tek taraflı demontaj hattında ise iş istasyonları hat boyunca tek bir tarafta doğrusal olarak konumlandırılmakta ve işler öncelik ilişkilerine bağlı olarak sıralı biçimde gerçekleştirilmektedir.

Tez çalışmasında, tek taraflı DHD problemi ele alınmıştır ve literatürde yaygın olarak kullanılan algoritmalarından farklı olarak meta-sezgisel bir yöntem olan SS algoritması kullanılmıştır. SS algoritması ile çözüm uzayı etkili bir şekilde taranarak problemin karmaşıklığına uygun çözümler üretilmiştir. Algoritma, çözüm uzayını taramak ve etkili aday çözümler oluşturmak için yedi farklı çaprazlama tekniğini bir araya getirmiştir. Uygunluk fonksiyonu, optimizasyon ile hedeflenen temel amaçlar doğrultusunda F1, F2, F3 ve F4 olmak üzere dört adet değer hesaplamaktadır. Bu değerler sıralanarak en iyi çözümler belirlenmektedir. Tez çalışmasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, çözüm uzayını genişletmek amacıyla probleme uygun yedi farklı çaprazlama tekniği kullanılmıştır. Bu kapsamda, farklı çaprazlama teknikleri arasında benzersiz kombinasyonlar oluşturulmuştur ve bu kombinasyonların performansı detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Çaprazlama tekniklerinin çeşitlendirilmesi, çözüm uzayının daha geniş bir bölgesinin taranmasını ve daha iyi sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, hem problemin çözüm kapasitesini artırmaktadır hem de daha önce keşfedilmemiş çözüm alanlarının araştırılmasına olanak tanımaktadır.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, ele alınan problem ve bu problemin literatürdeki yeri açıklanmıştır. İkinci bölüm olan Kaynak Araştırması'nda, aynı problem için literatürde kullanılan farklı algoritmalar ve bunların sonuçları incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem bölümünde, çalışmada kullanılan algoritmalar ve veri setleri hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde, önerilen algoritmanın problem üzerinde uygulanması ayrıntılı olarak ele alınmış, kullanılan farklı kombinasyonlara değinilmiştir. Beşinci bölümde, elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmalı analizler yer almaktadır. Son bölümde ise genel sonuçlar değerlendirilmiş ve geleceğe yönelik öneriler sunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

DHD problemi, çözüm uzayının büyüklüğü ve karmaşık yapısı nedeniyle NP-hard problem sınıfında yer almaktadır (Hu, Xu, ve Jia, 2021). NP-hard problemlerde, problem boyutunun artmasıyla birlikte olası çözüm sayısı üstel olarak artmakta ve bu durum klasik kesin çözüm yöntemlerinin makul süreler içerisinde etkin sonuçlar üretmesini zorlaştırmaktadır (McGovern ve Gupta, 2007). Bu tür problemlerde, hesaplama süresi açısından verimli çözümler elde edebilmek amacıyla alternatif çözüm yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bağlamda, metasezgisel algoritmalar NP-hard problemlerin çözümünde sıklıkla tercih edilmektedir. Metasezgisel algoritmalar (Çelik, Yıldız, ve Karadeniz, 2019), yüksek seviyeli çalışma ortamında, verimli arama işlemleri kullanarak çözüm uzayındaki yaklaşık optimum çözüme daha hızlı şekilde ulaşmaktadır. En önemli avantajı, yerel optimum noktalara takılmadan global sonuca ulaşabilme yeteneğidir. Demontaj hattı problemi permütasyon tabanlı bir temsile sahiptir. Permütasyon tabanlı temsil, işlemlerin veya görevlerin belirli bir sıralama ile gerçekleştirilmesi anlamına gelmektedir.

Chiang çalışmasında (Chiang, 1998) bir meta-sezgisel teknik olan tabu arama (Tabu Search – TS) algoritmasının montaj hattı dengeleme problemlerine uygulanmasını açıklamaktadır. Çalışmadaki uygunluk fonksiyonu, toplam boş zamanın minimize edilmesidir. Çalışmadaki kısıtlar ise görev öncelikleri, çevrim süresi kısıtlamaları ve iş istasyonlarının kapasitesidir. Çalışmada, tabu arama algoritmasının montaj hattı dengeleme problemlerinde, yerel optimumdan kaçınarak daha iyi çözümler bulma kapasitesi vurgulanmıştır.

Alp'in çalışmasında (Alp, 2004) literatürde ilk defa karınca kolonisi (Ant Colony Optimization - ACO) algoritması kullanılarak u-tipi montaj hattı üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada, ACO algoritmasını doğrudan uygulayan, modifiye eden ve metasezgiseller ile birleştiren çeşitli yöntemler önerilmiştir. Literatürde bulunan üç ana sezgisel yöntem; sıralı pozisyonel ağırlık tekniği (RPWT - Ranked Positional Weight Technique) tabanlı sezgisel, dal ve sınır tabanlı sezgisel ve simüle edilmiş tavlama tabanlı (Simulated Annealing - SA) sezgiseldir. Çalışmanın bulguları, mevcut ACO algoritması yöntemlerinin u-tipi montaj hattı için yeterli performansı sağlamadığını ve bazı algoritmaların hesaplama süreleri açısından etkisiz kaldığını ifade etmişlerdir. Bu bağlamda, algoritmanın u-tipi montaj hattı için daha uygun ve verimli bir şekilde geliştirilmesi gerektiği düşünülmüştür.

Arıkan'ın çalışmasında (Arıkan, 2009) çift taraflı DHD için sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Çalışmada hedef, belirli bir çevrim süresi için montaj hattı uzunluğunun en aza indirilmesidir. Bu hedef, istasyonların boşta kalma sürelerini minimize etmeye eşdeğerdir. Çalışmada, her biri tip-I ve tip-II problemler için iki matematiksel model geliştirilmiştir.

Bunlar; ikili istasyon değişkenleri kullanan model (MM/Bin) ve diğeri tam sayı istasyon değişkenleri kullanan modeldir (MM/Int). Büyük boyutlu problemleri çözmek için kaydırmalı ufuk sezgisi (RHH - Rolling Horizon Heuristic) ve genişletilmiş çoklu kural sezgisi (EMRH - Extended Multi-Rule Heuristic) olmak üzere iki sezgisel yaklaşım önerilmiştir. RHH, modifiye edilmiş bir MM/Int modeliyle alt problemleri çözerek 20 test probleminin 19'unda optimal çözümler bulunduğu ifade edilmiştir. EMRH ise 20 test probleminin tamamında optimal çözümler bulunduğu ifade edilmiştir. RHH ve EMRH, literatürde önerilen diğeri sezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında, en az aynı kalitede veya daha iyi çözümler bulunduğu ifade edilmiştir.

Ding ve ark.'nin çalışmasında (Ding, Feng, Tan, ve Gao, 2010) DHD problemi için çok amaçlı bir ACO algoritması kullanılmıştır. Çalışmada 3 adet uygunluk fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar; iş istasyonu sayısını minimize etmek, denge ölçüsünü minimize etmek ve bir çözümün talep derecelendirmesini minimize etmektir. Popülasyon boyutu 20 olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan ACO algoritması Pareto optimal çözümlere dayalı olarak geliştirilmiştir. Pareto optimal çözümler, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, farklı amaçlar arasında en iyi uzlaşmayı temsil etmektedir. Pareto optimal çözümlerin temel amacı, çok amaçlı problemlerde bir çözümün diğeri göre tüm amaçlar açısından daha iyi olup olmadığını belirlemektir. Çalışma, çok amaçlı ACO algoritmasının tek amaçlı optimizasyon algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini ve çok amaçlı DHD problemi için Pareto optimal çözümleri etkili bir şekilde bulabildiğini ifade etmişlerdir.

Oğan'ın çalışmasında (Oğan, 2013) u-tipi montaj hatları üzerinde odaklanılmıştır. Çalışmada, istasyonlardaki toplam ekipman maliyetinin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Problemin çözümü için bir dal sınır algoritması geliştirilmiştir. Çalışmada, 21 iş ve 10 iş istasyonu ile 30 iş ve 8 iş istasyonu içeren problemler makul sürelerde çözülebildiği belirtilmiştir.

Kalaycı ve ark. çalışmasında (Kalaycı ve Gupta, 2013a) birden fazla ölçütü optimize eden bir DHD problemine odaklanılmıştır. Çalışmada yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony – ABC) algoritması kullanılmıştır. Kullanılan verilerde tehlikeli madde durumu, talep durumu ve parçanın çıkarılma süresi dikkate alınmıştır. 10 parçadan oluşan bir ürün ve 25 parçadan oluşan bir cep telefonunun demontajı gerçekleştirilmiştir. Yeni aday çözümler oluşturmak için “ekleme” ve takas” operatörleri kullanılmıştır. Çalışmada önerilen algoritma C++ ve Matlab ile kodlanmıştır. Çalışmada 4 adet uygunluk fonksiyonu optimize edilmiştir. Bunlar; istasyon sayısının minimize edilmesi, her istasyonda artan çevrim süresinin minimize edilmesi, talep durumu ve tehlikeli madde durumuna göre ceza puanının hesaplanmasıdır. Önerilen algoritma; ACO algoritması, genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm

Optimization-PSO), nehir formasyon dinamikleri, benzetilmiş tavlama ve tabu arama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Her bir algoritma 30 kez çalıştırılmıştır. Karşılaştırma yapılan algoritmalar içerisinde optimal sonuca en hızlı ulaşan algoritmanın benzetilmiş tavlama olduğu belirtilmiştir.

Kalaycı ve Gupta'nın çalışmasında (Kalaycı ve Gupta, 2013b) DHD problemi için simüle edilmiş tavlama yöntemine dayalı bir çözüm önerilmiştir. Çalışmada birden fazla hedef optimize edilmiştir ve bu sonuçlar sıra bağımlı olarak değerlendirilmiştir. Veriler öncelik ilişkileri, talep durumları ve tehlikeli madde durumları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Farklı aday çözümlerin elde edilmesi için "ekleme" ve "takas" operatörleri kullanılmıştır. Önerilen algoritma için en iyi başlangıç sıcaklığı değeri 2000 olarak belirtilmiştir. Çalışmada 10 parçalı bir ürün ve 25 parçalı bir cep telefonu verileri üzerinde işlemler gerçekleştirilmiştir. 10 parçalı ürünün demontaj işleminde çevrim süresi 40 olarak belirtilmiştir ve 215t sürede optimal sonuca ulaşılmıştır. 25 parçalı cep telefonunda ise çevrim süresi 18 olarak belirtilmiştir ve 500t sürede optimal sonuca ulaşılmıştır.

Bentaha ve ark. çalışmasında (Bentaha, Battaia, ve Dolgui, 2013) ömrü biten ürünlerin demontajı ve demontaj hattının maliyetinin optimize edilmesi hedeflenmiştir. Problem için önerilen yöntem L şekilli algoritma ve Latin hiperküp örnekleme yönteminin birleşimidir. Çalışmada pergel parçalarının demontaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Demontaj hattına gelen parçalar arasındaki öncelik ilişkisi dikkate alınmıştır. Önerilen yöntem ile optimal çözümün alt ve üst sınırları belirlenmiştir ve bu sınırların sapmaları da belirtilmiştir. Üst sınır çözümü altında, iş istasyonu sayısı 2 olarak belirlenmiştir. Her seçilen görev için ortalama süreler dikkate alındığında, demontaj hattının toplam boş zamanı 0,10'dur. Bu çözüm 10,5 saniyede elde edilmiştir.

Mete ve ark. çalışmasında (Mete, Cil, Ağpak, Özceylan, ve Dolgui, 2016) DHD problemi için ışın arama algoritmasına dayalı bir çözüm geliştirilmiştir. Çalışmada performans ölçütü olarak istasyon sayısının minimizasyonu kullanılmıştır. Veriler arasındaki öncelik ilişkisine dikkat edilmiştir. Çalışmada Cil ve ark. çalışmasında kullanılan 3 farklı boyuttaki veri setleri kullanılmıştır. Algoritmanın performansı, rastgele arama ve diğer sezgisel yöntemlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar ışın arama algoritmasının bu problemler için etkili bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Ayrıca, çalışmada ışın arama algoritmasının çeşitli parametre ayarları ve uygulama yöntemleri detaylandırılmıştır. Gelecek çalışmalar için, önerilen yöntemin diğer demontaj hattı konfigürasyonlarına uygulanması ve algoritmanın iyileştirilmesi yönünde önerilerde bulunulmuştur.

Kalaycı ve ark. çalışmasında (Kalaycı vd., 2016) demontaj öncelik kısıtlamalarına uymanın yanı sıra sıra bağımlı zaman artışlarını dikkate alarak çeşitli ölçütlerin etkinliğini

optimize etmek hedeflenmiştir. Problemi çözmek için GA ile değişken komşuluk arama yöntemini birleştiren hibrit bir algoritma önerilmektedir. Çaprazlama operatörü olarak parça yeniden sıralama ve öncelikli koruyucu çaprazlama kullanılmıştır. Mutasyon operatörü olarak ekleme ve takas işlemleri kullanılmıştır. Çalışmada tercih edilen çaprazlama ve mutasyon oranları sırası ile 0.8 ve 0.2'dir. Önerilen algoritma, ABC, ACO, hibrit GA, parçacık sürü optimizasyonu, nehir oluşum dinamikleri, simüle edilmiş tavlama ve tabu arama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma 4 farklı uygunluk fonksiyonu ile optimize edilmiştir. Çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar, önerilen yöntemin literatürde rapor edilen diğer çözüm yaklaşımları arasında hem montaj hem de demontaj işlemi için eşit derecede iyi veya üstün çözümler ürettiğini ifade etmişlerdir.

Bedir ve ark. çalışmasında (Bedir, Alağaç, ve Eren, 2017) çok yönlü karar verme yöntemleri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP - Analytic Hierarchy Process) ve Zenginleştirme Değerlendirme İçin Tercih Sıralama Organizasyonu Yöntemi (PROMETHEE - Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) kullanılmıştır. Çalışmada, 14 parçadan oluşan bir klimanın demontaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Parçalar arasındaki öncelik ilişkisi, talep durumu, maliyet durumu ve parçaların sökölme sırası dikkate alınarak analiz edilmiştir. AHP yöntemi ile kriterlerin önem dereceleri belirlenmiş ve bu kriterler ağırlıklandırılmıştır. Daha sonra PROMETHEE yöntemi, AHP'den elde edilen kriter ağırlıklarını kullanarak parçaların demontaj sırasını belirlemiştir. Çalışmada, işlemlerin aynı tezgâh üzerinde yapılabileceği göz önünde bulundurularak 7 tezgâh kullanılmıştır. Çevrim süresi 70 saniye olarak belirlenmiş ve iş istasyonlarının veya tezgâhların kullanılmadığı atıl süre ise 93 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma, klimanın demontaj sürecinin optimize edilmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinin etkinliğini ifade etmektedir. AHP ve PROMETHEE yöntemlerinin birlikte kullanılması, parçaların demontaj sırasının daha verimli bir şekilde belirlenmesini sağlamış ve bu sayede demontaj süreci daha sistematik hale getirilmiştir.

Kaya'nın çalışmasında (Kaya, 2019) esnek bir DHD'ne yönelik bir yazılım geliştirilmiştir. Problemin çözümü için en büyük aday kuralı, kilbridge ve wester metodu, sıralanmış konum ağırlıkları metodu ve GA kullanılmıştır. GA ile tek noktalı çaprazlama, çok noktalı çaprazlama ve pozisyona dayalı çaprazlama teknikleri kullanılmıştır. Seçim mekanizması olarak rulet çemberi, sıralı seçim ve sabit durum seçimi yöntemleri kullanılmıştır. GA'dan 4 popülasyon boyutu, 6 iterasyon, 0,8 çaprazlama ve mutasyon oranları ile %92,27 hat verimliliği elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda GA'nın çaprazlama ve mutasyon oranlarının değiştirilmesinin hat verimliliğine oldukça etkisi olduğu ve diğer sezgisel algoritmalara göre daha başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Ren ve ark. çalışmasında (Ren, Meng, Zhang, Lu, ve Tian, 2019) çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak DHD problemine çözüm aranmıştır. Çalışmada gri ilişkisel analiz ve Choquet bulanık integrali kullanılarak yöntemler geliştirilmiştir. Çalışmada, niteliksel özellikleri nicel verilere dönüştürmek için bulanık teorideki bulanık sayı benimsenmiştir. Çalışmada parçaların öncelik ilişkisi, demontaj işleminin ekonomik faydası, çevrim süresinden artan süre, parçaların hasar durumu, parçaların talep durumu ve tehlikeli olma durumu göz önünde bulundurularak işlemler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 25 parçalı cep telefonu veri seti üzerinde çalışılmıştır. Bu ürün için 18 çevrim süresi ve 9 iş istasyonu tahsis edildiğinde boş zamanın 7 saniye olduğu belirtilmiştir. 4 adet iş istasyonu çevrim süresinin tamamını kullanarak işlerini tamamlamıştır. Bu durum %100 hat verimliliğine sahip olduklarını ifade etmiştir. Başka bir iş istasyonundaki boş zaman ise 3 saniyedir bu iş istasyonunun hat verimliliği ise %83 olarak belirtilmiştir. Çalışmaların büyük ölçüde başarılı olduğu belirtilmiştir. Yazarlar ileriye dönük çalışmalarda iyileştirmeler yapmayı planlamaktadır.

Li ve arkadaşlarının çalışmasında (Z. Li, Kucukkoc, ve Zhang, 2019) sıraya bağlı u-tipi DHD problemi için yinelemeli yerel arama yöntemi ve matematiksel model geliştirilmiştir. Mevcut problemin çok amaçlı çözümü için literatürdeki ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Çalışmada veri seti olarak 10 parçalı bir ürün, 25 parçalı cep telefonu verisi ve 8 parçalı bilgisayar verisi kullanılmıştır. Veriler demontaj süreleri, tehlikeli madde durumları, talep durumları ve öncelik ilişkileri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, u-tipi sökme hattının, geleneksel düz hatlara göre daha iyi bir hat dengesi sağladığı gözlemlenmiştir. Çalışmada 4 farklı uygunluk fonksiyonu hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuç, yerel arama yönteminin çok amaçlı u-tipi DHD problemi için etkili ve verimli bir çözüm yöntemidir ve mevcut literatürdeki en iyi sonuçları elde etmektedir.

Wang ve ark. çalışmasında (Kaipu Wang, Li, ve Gao, 2019) GA ve benzetimli tava yöntemlerinin birleşimi ile farklı bir yöntem geliştirilmiştir. Mutasyon ve çaprazlama teknikleri kullanılmıştır. Kullanılan çaprazlama tekniği, iki noktalı eşleme tekniğidir. Mutasyon ise tek noktalı yerleştirme ve çift noktalı değişimdir. Yeni bireylerin oluşmasında genetik algoritma tercih edilmiştir. Yeni bireylerin çaprazlama ve mutasyondan sonra yerel olarak iyileştirilmesi benzetimli tava yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Hiper-hacim metriği (Hypervolume Indicator) kullanılarak en iyi çözümler seçilmiştir. Çalışmada kullanılan veri setlerinde demontaj süresi, öncelik ilişkileri ve tehlikeli madde durumları belirtilmiştir. Çalışmada amaç, en az iş istasyonu kullanarak en yüksek kârı elde etmektir. Çalışmada hem tek amaçlı hem çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon hedefleri; iş istasyonu sayısını azaltma, demontaj derinliğini artırma ve demontaj kârını artırmaktır.

Li ve arkadaşlarının çalışmasında (Z. Li, Çil, Mete, ve Kucukkoc, 2020) DHD problemi için hızlı bir dal, sınır ve hatırlama algoritması geliştirilmiştir. Önerilen kesin çözüm yöntemi, tüm aranan alt problemleri depolayarak tekrar eden alt problemleri ortadan kaldırmak için belleğe dayalı üstünlük kuralını kullanmaktadır ve yüksek kaliteli tam çözümleri hızlı bir şekilde elde etmek için döngüsel en iyi öncelikli arama stratejisini kullanmaktadır. Çalışmada uygunluk fonksiyonu istasyon sayısı ile hesaplanmıştır. Hedef, istasyon sayısını minimuma indirmektir. Önerilen yöntem, 260 örnek üzerinde test edilmiş ve CPLEX çözücü ile beş iyi bilinen meta-sezgiselle karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı sonuçlar, önerilen yöntemin test edilen tüm örnekler için ortalama 0,1 saniyeden daha kısa sürede optimal çözümler elde edebildiğini ifade etmiştir.

Karaş'ın çalışmasında (Karaş, 2020) montaj hattı dengelemek için ABC algoritması kullanılmıştır. Çalışmada, Roszieg, Heskia, Tonge ve Wee-Mag problem verileri kullanılmıştır. Her veri probleminin çözümü için 20 tekrar yapılmıştır. Besin kaynağı sayısı 50 ve en büyük iterasyon gelişmeme sayısı ise 2000 olarak belirlenmiştir. Limit değeri 50 olarak belirlenmiştir. Çalışmada geliştirilen matematiksel model, küçük boyutlu problem aileleri olan Roszieg ve Heskia'ya ait tüm veri problemlerini optimal çözme başarıyla göstermiştir. En başarılı çözümlere ulaşma süresi açısından 46 problemde ABC algoritmasının, 2 problemde ise matematiksel modelin üstünlük sağladığı belirtilmiştir. Tonge ailesine ait 36 veri probleminden yalnızca 2 tanesini verilen süre limiti içinde optimal çözdüğü belirtilmiştir. Wee-Mag verisi için ise matematiksel modelin verilen süre limiti içinde hiçbir problemi optimal çözemediği belirtilmiştir. Verilerin tamamına bakıldığında 120 test probleminin 70 tanesinde ABC algoritmasının daha başarılı çözümler elde ettiği, 50 tanesinde ise her iki yöntemin aynı çözümlere ulaştığı belirtilmiştir. Bu çalışma, ABC algoritmasının montaj hattı dengeleme problemlerinde etkinliğini gösterirken, matematiksel modelin belirli veri setlerinde nasıl performans gösterdiğine dair kıyaslamalar sunmaktadır.

Çil ve ark. çalışmasında (Çil, Mete, ve Serin, 2020) robotik DHD problemi için geliştirilmiş bir ACO algoritması ve doğrusal matematiksel model ile çözümler üretilmiştir. Çalışmada önerilen algoritma ile karşılaştırılmak üzere rastgele arama, GA ve geleneksel ACO algoritması kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti yazarlar tarafından oluşturulmuştur. Sırasıyla 20, 50 ve 80 olmak üzere farklı boyutlarda 3 adet veri seti ile çalışılmıştır. Her veri problemi için 96 adet yeni problem üretilmiştir. Çalışmada popülasyon boyutu 200, iterasyon sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir. Rastgele arama algoritmasında her bir problem 2000 iterasyon ile 30 kez çalıştırılmıştır. Çalışmadaki hedef, istasyon sayısını minimize etmektir. Önerilen algoritmanın diğerlerine göre üstün performans gösterdiği belirtilmiştir.

Laili ve ark. çalışmasında (Laili, Li, Fang, Pham, ve Zhang, 2020) çalışmada, DHD probleminin giriş verileri, parametreler, karar değişkenleri, kısıtlamalar ve hedeflerin özetlendiği güncel modellerin sistematik bir genel bakışı sunulmuştur. Araştırmalara göre güncel çalışmalarda gerçekleştirilen DHD problemlerinin temel hedefleri şunlardır: Her bir istasyonun verimliliğini maksimize etmek, tüm demontaj hattının verimliliğini maksimize etmek, yön değişimini minimize etmek, tehlikeli görevlerin sayısını minimize etmek, demontaj maliyetini minimize etmek, demontajdan elde edilen kârı maksimize etmek ve çevresel kirliliği minimize etmektir. Çalışmalardaki kısıtlar ise şunlardır: Çevrim süresi kısıtlaması, öncelik kısıtlaması ve değişken kısıtlamasıdır. Çalışmada, DHD problemini modellemek için kullanılan çeşitli matematiksel modellerin ve yöntemlerin sistematik bir incelemesi yapılmıştır. Bu inceleme, farklı modellerin nasıl yapılandırıldığını, hangi değişkenlerin kullanıldığını, kısıtlamaların ve hedeflerin nasıl belirlendiğini kapsamaktadır. Giriş verileri ve parametreler, DHD probleminin çözümü için gerekli olan bilgi ve veri türlerini içermektedir. Bu veriler, demontaj görevlerinin süreleri, öncelik ilişkileri, maliyetler, araç tahsis gereksinimleri gibi unsurları kapsamaktadır. Karar değişkenleri, modelin çözümünde belirli seçimler yapmayı gerektiren unsurlardır. Bu değişkenler arasında görev seçim değişkenleri, görev sıralama değişkenleri, görev tahsis değişkenleri, düzeltici strateji değişkenleri, araç tahsis değişkenleri ve çevrim süresi değişkeni yer almaktadır. Çalışmalardaki yaygın kısıtlamalar ve hedefler, ilgili literatürde hangi unsurların sıklıkla dikkate alındığını ve hangi modellerin öne çıktığını ifade etmişlerdir. Bu bilgiler, gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için referans sağlamaktadır.

Kalaycılar'ın çalışmasında (Eda Göksoy Kalaycılar, 2020) tehlikeli madde içeren stokastik DHD problemi üzerine odaklanılmıştır. Çalışmadaki hedef, tüm tehlikeli madde senaryoları üzerinden elde edilen toplam kârı maksimize etmektir. Oluşturulan modelin performansı literatürden elde edilen ağlar ve rassal veriler ile test edilmiştir. Çalışmada tek tehlikeli madde ve birden fazla tehlikeli madde durumları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tüm stokastik programlama modelleri, farklı türde tehlikeli görevleri içeren iki aşamalı stokastik karmaşık tam sayılı programlama olarak formüle edilmiştir ve CPLEX çözücü tarafından çözülmüştür. Kapsamlı bir deney sonrası, model boyutunun görev sayısının artışıyla dramatik şekilde büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle, büyük ölçekli problem örnekleri için optimal çözümler makul hesaplama süreleri içinde elde edilememiştir. Özellikle büyük ağlar için bir, iki ve üç tehlikeli görev içeren çözülemeyen örnekler gözlemlenmiştir. Bu yüzden, sınırlandırma prosedürleri dikkate alınarak alt sınır ve üst sınır hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Luo ve ark. çalışmasında (Luo vd., 2020) ABC algoritması önerilmiştir. Çalışmada öncelik ilişkisi dikkate alınmıştır. Çalışmadaki uygunluk fonksiyonları şunlardır: Her iş

istasyonundaki boşta kalma süresini minimize etmek, her görevin yalnızca bir iş istasyonuna atanmasını sağlamak, iş istasyonlarının sayısının izin verilen maksimum sayıyı aşmamasını sağlamak, her iş istasyonunun toplam işletme süresinin ayrıştırma hattının döngü süresini aşmamasını sağlamak, görev dağılımının ürün görev öncelik ilişkilerini karşılamasını garanti etmek, öncelik ilişkisi kısıtlamalarının korunmasını sağlamak ve bir bileşenin yalnızca bir kez ayrıştırılmasını sağlamaktır. Çalışmada, küçük parçalı bir ürün ve çekiçli matkap ile algoritmalar test edilmiştir. Önerilen algoritma ile karşılaştırılmak üzere GA kullanılmıştır. GA, öncelik koruyucu çaprazlama operatörü ile birlikte kullanılmıştır. Her iki algoritma da 500 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. ABC, 30 iterasyonun altında bir süre kullanarak neredeyse optimal sonuca ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, GA'nın sonuçları stabil değildir. Bazen hızlı bir şekilde neredeyse optimal çözüme ulaşmaktadır, bazen ise sınırlı sürede bu çözüme ulaşamamaktadır. Çalışmanın sonucunda, ABC'nin çalışılan vakalar temelinde GA'dan üstün olduğunu görölmüştür.

Akpınar'ın çalışmasında (Akpınar, 2021) kombi demontajı için simölasyon optimizasyonu tabanlı metasezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Metasezgisel algoritmalar, genetik algoritma ve tavlama benzetimi (TB) kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada kombi parçalarının demontajı ile ilgili çalışılmıştır. Veri; kombi parçalarının isimleri, talep durumları, fiyatları, tehlike madde olma durumları, demontaj yönü ve parçalar arasındaki öncelik ilişkilerinden oluşmaktadır. Çalışmada yeni kromozomları belirlemek için rulet tekerleğı seçme yöntemi kullanılmıştır. Çaprazlama yöntemi olarak tek nokta çaprazlama kullanılmıştır. Oluşturulan kromozomlarda öncelik ilişkileri kontrol edilmiştir. Mutasyon yöntemi olarak tek noktalı mutasyon kullanılmıştır. Hesaplanan uygunluk fonksiyonları sıralı olarak çözümlenmiştir. Çalışmada GA 3 farklı popölasyon boyutu ile test edilmiştir. Bunlar sırasıyla 10, 20 ve 30'dur. Bu popölasyonlar sırası ile 250, 500 ve 1000 iterasyonda çalıştırılmıştır. Hat verimliliğı yönünden iki algoritmada aynı sonuçları vermiştir. GA algoritmasının tehlikeli parça, talep, demontaj yönü ve gelir parametreleri açısından bu problemde üstün olduğı belirtilmiştir.

Mutlu'nun çalışmasında (Mutlu, 2021) karışık modellenli çift taraflı DHD probleminin çözümü için çok amaçlı memetik algoritma önerilmiştir. Çalışmada istasyon sayısının ve istasyonların boşta kalma süresinin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen yöntemlerin, literatürde sıkça kullanılan GA ve baskın olmayan sıralama genetik algoritması II (NSGA- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) algoritmalarına kıyasla çok daha iyi sonuçlar verdiğı ve literatür karşılaştırması sonucunda diğeri çalışmaları ulaşamadığı yaklaşık optimum sonuçlara ulaştığı belirtilmiştir.

Yin ve ark. çalışmasında (Yin vd., 2021) 47 parçalı bir dizüstü bilgisayar verisi kullanılmıştır. Veride tehlikeli madde, talep ve öncelik ilişkileri verileri mevcuttur. Çalışmada yazarlar tarafından geliştirilmiş Pareto-Discrete Kuş Konma Algoritması (PDHA - Pareto-based Discrete Bird Perching Algorithm) kullanılmıştır. 4 adet uygunluk fonksiyonu değerlendirilmiştir. Bunlar:

- İş istasyonları sayısının minimize edilmesi.
- Toplam söküm süresinin minimize edilmesi.
- Boş bekleme sürelerinin minimize edilmesi.
- Gerekli söküm araçları sayısının minimize edilmesi.

10 parçalı veri seti için uygunluk fonksiyonları ise;

- İş istasyonu sayısının minimize edilmesi.
- Toplam montaj süresinin minimize edilmesi
- Boş bekleme sürelerinin minimize edilmesi.
- Tehlikeli madde indeksi.
- Talep durumu indeksi.

Guo ve ark. çalışmasında (X. Guo vd., 2021) ayrıştırma kârını maksimize etmeyi, enerji tüketimini ve karbon emisyonunu minimize etmeyi hedefleyen stokastik çok ürünli çok amaçlı DHD problemi önerilmektedir. Çalışmada, simüle edilmiş tavlama ve stokastik bir simülasyon yaklaşımı ile çok amaçlı ayırık gri kurt optimizatörü önerilmiştir. Gri kurt algoritması (Grey Wolf Optimization Algorithm - GWOA) popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel algoritmadır. Bireylerin performansını değerlendirmek için uygunluk fonksiyonu kullanmaktadır. Popülasyondaki her bireyin uygunluk değeri hesaplanmaktadır ve en iyi üç gri kurt sırasıyla alfa (α), beta (β) ve delta (δ) olarak etiketlenmektedir, geri kalan gri kurtlar ise omega (ω) olarak adlandırılmaktadır. Gri kurt algoritması bu çalışmada çok amaçlı, stokastik ve ayırık optimizasyon problemlerini ele almak için uyarlanmıştır. Algoritmanın parametreleri değerleri şu şekildedir: Başlangıç popülasyonu 120, mutasyon oranı 0,3 ve iterasyon sayısı 3000. Her iş istasyonunun sabit maliyeti 70, enerji tüketimi 100, gaz tüketimi 25 ve elektrik kullanımı 10 olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, her iş istasyonunun döngü süresi 80 olarak belirlenmiştir. Çalışmada veri olarak, 15 parçadan oluşan tükenmez kalem, 62 parçadan oluşan matkap, 15 parçadan oluşan çamaşır makinesi, 29 parçadan oluşan radyo seti ve 6 parçadan oluşan lamba kullanılmıştır. Bu ürünler sırası ile 13, 46, 13, 30 ve 4 demontaj görevine ihtiyaç duymaktadır. Performans değerlendirilmesi için 4 farklı uygunluk fonksiyonu değeri hesaplanmıştır. Bunlar: Toplam kâr, enerji tüketimi, karbon emisyonları ve iş istasyonları sayısıdır. Toplam kârın maksimize edilmesi, enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının minimize edilmesi

hedeflenmektedir. Çalışmada, önerilen algoritmanın performansı, çok amaçlı ayırık gri kurt optimizasyonu, dominant sıralama genetik algoritması, çok popülasyonlu çok amaçlı evrimsel algoritma ve çok amaçlı evrimsel algoritma yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaların, önerilen yaklaşımın etkinliğini ve uygulanabilirliğini doğruladığı belirtilmiştir.

Wang ve ark. çalışmasında (K. Wang, Li, Gao, Li, ve Sutherland, 2021) öncelik kısıtları göz önünde bulundurularak ayırık çok amaçlı ABC algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma LCD televizyon ve buzdolabı ürünleri üzerinde test edilmiştir. Parçalar arasındaki öncelik ilişkileri ve parçaların tehlike durumları dikkate alınmıştır. Önerilen algoritma için en iyi parametre değerleri şu şekildedir: Koloni büyüklüğü 200, maksimum döngü sayısı 500 ve limit 20. Önerilen algoritma 30 kez çalıştırılmıştır. Çalışmada algoritma performansını değerlendirmek için hiper hacim değeri kullanılmıştır. Bu değer, hedef değer ile referans noktası arasındaki hacimdir. Daha büyük hiper hacim değerleri daha iyiye işaret etmektedir. Önerilen algoritmanın maksimum hiper hacim değerini elde ettiği çalışma süresi 72,5 saniye olup, algoritma 292 iterasyon yaparak yakınsama sağladığı belirtilmiştir.

Liu ve ark. çalışmasında (Liu, Hai, Li, ve Yin, 2022) atık akıllı telefonların demontaj işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, büyük miktarlardaki atık akıllı telefonların demontaj verimliliğini artırmak amacıyla bir demontaj süreci oluşturma yöntemi önerilmektedir. Atık akıllı telefonlar, parça kodlama sistemine göre sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırmanın ardından, ilgili sınıflandırmanın tüm demontaj özelliklerini içeren bileşen modeli oluşturulmaktadır ve demontaj süreçleri, demontaj kurallarına göre belirlenmektedir. Belirli bir akıllı telefonun demontaj süreci, bileşen modelinin demontaj süreci değiştirilerek oluşturulmaktadır. Telefonların demontaj işlemi modellerine göre gerçekleştirilmiştir. Kullanılan telefon modelleri şunlardır: Huawei P7, Honor 6, Xiaomi 3, Xiaomi 5 ve iPhone 6. Çalışmada, atık akıllı telefonlarının hasar derecelerinin aynı olduğu varsayılmıştır. Çalışmada kullanılacak bir demontaj ekipmanı bulunmadığı için demontaj işlemi manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin rehberliğinde ayrıştırma işlemi üç kişi (Grup A) tarafından yapılırken, diğer üç kişi (Grup B) temel deneyime sahip olarak ayrıştırma işlemini gerçekleştirmiştir. Daha sonra, Grup B'nin operatörleri, önerilen yöntem rehberliğinde akıllı telefonları yeniden ayrıştırmıştır (Grup C). Grup A ve Grup C'nin ortalama demontaj süreleri, Grup B ile karşılaştırıldığında sırasıyla %10,1 ve %12,4 oranında azaldığı görülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin demontaj süresine etkisinin olumlu yönde olduğu ifade edilmiştir.

Kizilay'ın çalışmasında (Kizilay, 2022) öncelik ilişkileri dikkate alınarak sıra bağımlı kurulum sürelerine sahip demontaj hattı dengelenmiştir. Ele alınan problem için karışık tam

sayılı doğrusal programlama ve kısıt programlama modelleri geliştirilmiştir. Çalışmada, problemi çözmek için önerilen bir tavlama benzetimi meta-sezgisel yöntemi ve bu yöntemin sonuçları, modellerin sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Uygunluk fonksiyonu toplam iş istasyonu sayısı ile hesaplanmaktadır. Çalışmada kullanılan veri setleri, VE öncelik ilişkileri içeren ve hem VE hem de YA DA öncelik ilişkilerini içeren çeşitli boyutlarda problemleri kapsamaktadır. Veri setleri, literatürden elde edilmiştir ve küçük ile büyük boyutlu problemleri içermektedir. Çalışmada, tavlama benzetimi algoritması çok kısa CPU (Central Processing Unit) süresi ile iyi çözümler sunmuştur. Genel olarak, önerilen yöntemlerin hem çevresel hem de endüstriyel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağladığını vurgulanmıştır.

Battaia ve Dolgui'nin çalışmasında (Battaia ve Dolgui, 2022), 2012 ile 2022 yılları arasında hakemli dergilerde yayımlanmış 500'den fazla makale incelenmiştir. Bu çalışmada incelenen Li ve ark. çalışmasında (Z. Li vd., 2019) belirli bir istasyon sayısı için çevrim süresi optimize edilmeye çalışılmaktadır. Referans test veri setindeki Arcus, Warnecke, Wee-Mag ve Scholl verileri kullanılmıştır. Geliştirilen yöntemler; geliştirilmiş iteratif dal, sınır ve hatırlama (IBBRe - Iterative Branch, Bound and Remember Algorithm) algoritması ve bir sezgisel yöntem olarak geliştirilmiş iteratif ışın arama (IBSe - Iterative Beam Search Heuristic) yaklaşımıdır. Çalışmada geliştirilen bu yöntemler ile literatürdeki diğer çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. LCBT, çevrim süresi için bir alt sınır olarak kullanılmıştır. Çalışmada optimize edilen çevrim süresidir (CT-Cycle Time). Amaç, belirli bir istasyon sayısı için en düşük çevrim süresini bulmaktır. LCBT hesaplanma formülü Denklem 2.1'de görülmektedir.

$$LCBT = \max\left(\frac{T_{total}}{n_s}, t_{max}\right) \quad (2.1)$$

- T_{total} , tüm görevlerin işlem sürelerinin toplamıdır.
 - n_s , istasyon sayısını ifade eder.
 - T_{max} , tüm görevlerin maksimum işlem süresidir.
- LCBT, çevrim süresi için ulaşılacak en düşük teorik alt sınırı belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak, öncelik ilişkileri ve atama kısıtları nedeniyle gerçek çevrim süresi (CT) her zaman LCBT'ye eşit olmayabilmektedir.

Çalışmada tehlikeli madde ve talep durumları dikkate alınmamıştır. Öncelik ilişkileri göz önünde bulundurularak çevrim süresine odaklanılmıştır.

Zeng ve ark. çalışmasında (Y. Zeng, Zhang, Yin, ve Zheng, 2022), mikrodalga fırın verisi ve referans test veri seti üzerinde geliştirilen Genetik Benzetiilmiş Tavlama Algoritması (IGSA) test edilmiştir. Çalışmadaki uygunluk fonksiyonları şu şekildedir:

- Çevrim süresini (TCT) en aza indirmek.
- Söküm kârını (P) maksimize etmek.
- Enerji tüketimini (E) en aza indirmek.
- Düzgünlük endeksini (S) maksimize etmek.

Referans test veri seti hiper volüm (HV) metriği ile değerlendirilmiştir ve 21 adet yaklaşık optimum sonuç elde edilmiştir.

Li ve ark. çalışmasında (C. Li vd., 2022) flaş ışıği verisi kullanılmıştır. Gri Kurt algoritması ile çalışılmıştır. Algoritmanın değerlendirilmesi için maksimum fayda metriği tercih edilmiştir. Maksimum faydanın hesaplanma formülü Denklem 2.2’de görülmektedir.

$$\text{Maksimum fayda} = P - C_R - C_H \quad (2.2)$$

Bu denklemde P, sökülen bileşenlerden elde edilen toplam geliri, CR söküm görevlerini gerçekleştiren robotun maliyetini, CH söküm işlemini gerçekleştiren insanın maliyetini ifade etmektedir. CH ve CR verileri çalışmada tablo şeklinde sunulmuştur. Çalışmada elde edilen maksimum fayda 133’tür. Bu veriye ek olarak tükenmez kalem1 için 101, çamaşır makinesi için 97, radyo için 160, tükenmez kalem2 için 149 ve matkap için 333 maksimum fayda değeri elde edilmiştir. Bu veriler için detaylı bilgi verilmemiştir.

Wang ve ark. çalışmasında (K. Wang vd., 2023) referans test veri seti kullanılarak 5 farklı algoritma (NSGA-III, SPEA2+SDE, PICEA-g, GrEA ve HypE) ile geliştirilen geliştirilmiş çok amaçlı genetik algoritma (IMOGA) modeli karşılaştırılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen karşılaştırma hiper hacim (HV – Hyper Volume), Inverted Generational Distance (IGD) ve aralık (spacing) metrikleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. HV ve IGD metriklerinde tüm veriler için en başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Spacing metriğinde ise 21 adet veriden 18’inde en başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu verilere ek olarak çalışmada 29 parçalı CRT TV veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti ise şu metrikler ile değerlendirilmiştir:

- **HV (Hypervolume)** – IMOGA’nın performansı diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır.
- **GD (Generational Distance)** – IMOGA’nın yakınsama performansı incelenmiştir.
- **Spread** – Çözüm kümesinin dağılımı değerlendirilmiştir.
- **İstasyon Sayısı** – Tüm algoritmalar için minimum 5 istasyon elde edilmiştir.
- **Pürüzsüzlük İndeksi (Smoothness Index, f2)** – NSGA-III ve HypE için minimum değer 0, diğer algoritmalar için 1 olarak hesaplanmıştır.

- **Demontaj Kârlılığı** – IMOGA, **25,92** maksimum kar ile en iyi sonucu elde etmiştir.
- **Enerji Tüketimi** – IMOGA'nın minimum enerji tüketimi **413,0** olarak hesaplanmıştır.

Liang ve ark. çalışmasında (Liang, Fu, ve Gao, 2024) söküm kârı, enerji tüketimi ve gürültü kirliliği aynı anda dikkate alınarak, çok amaçlı, çok ürünlü bir söküm hattı dengeleme problemi önerilmektedir. Ele alınan problemin doğasına uygun olarak, çok amaçlı bir tam sayı programlama modeli oluşturulmuştur. Modelin hedefleri; maksimum söküm kârına ulaşmak, enerji tüketimini minimuma indirmek, gürültü kirliliği gereksinimlerine ve kaynak kısıtlamalarına uymaktır. Çalışma, iki aynı radyo setinin (Lambert, 2007) eşzamanlı olarak, belirli gürültü kirliliği kısıtlamaları altında sökülmesi, bu algoritmanın endüstriyel uygulamalarda nasıl kullanılabileceğine dair somut bir örnek sunmaktadır. Çalışmada popülasyon boyutu sırası ile 10, 40, 70 ve 100 olarak çalıştırılmıştır. Çevrim süresi ise 50 olarak belirlenmiştir. Çalışmadaki problemi çözmek için çok amaçlı grup öğretim optimizasyonu algoritması geliştirilmiş ve üstünlüğü sayısal deneylerle doğrulanmıştır. Çok amaçlı grup öğretim optimizasyonu algoritmasında kodlama ve kod çözme kuralları, sıralama ve kalabalık mesafesi yaklaşımları, önceliği koruyan çaprazlama ve mutasyon işlemleri ve uyarlanabilir yerel arama yöntemi yer almaktadır.

Güler ve ark. çalışmasında (Güler, Kalayci, Ilgin, Özceylan, ve Güngör, 2024) kısmi DHD problemi konusundaki güncel gelişmeler incelenmiştir. 2008 ile 2024 yılları arasında yayımlanan 53 çalışma analiz edilerek, bu alandaki mevcut eğilimler ve araştırma boşlukları belirlenmiştir. Bulgular, kısmi DHD problemi araştırmalarında son üç yılda belirgin bir artış olduğunu ve bu alanın sürdürülebilir üretimdeki artan önemini yansıttığını ortaya koymaktadır. Literatürde, GA, simüle edilmiş tavlama algoritmaları ve değişken komşuluk arama algoritmaları gibi sezgisel yöntemlerin yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların çoğu, belirli ürün türleri ve hat düzenleri üzerinde yoğunlaşmaktadır, bu da araştırma alanında bazı boşluklar bırakmaktadır. Literatürde sıklıkla tercih edilen bazı ürünler; bilgisayar parçaları, cep telefonu, matkap, çamaşır makinesi, buzdolabı ve klimadır. Özellikle, belirsiz söküm ortamları ve insan-robot işbirliği gibi konular, gelecekteki araştırmalar için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu çalışmanın, kısmi DHD problemi literatürünü kapsamlı bir şekilde inceleyerek, mevcut eğilimleri ve araştırma boşluklarını belirlemeyi amaçladığı ifade edilmiştir.

Kalaycılar ve ark. çalışmasında (Kalaycılar, Azizoğlu, ve Batun, 2024) tehlikeli görev arızaları ile sabit sayıda iş istasyonunun bulunduğu DHD problemine model tabanlı çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Her tehlikeli görevin belirli bir olasılıkla başarısız olabileceği ve bir arıza meydana geldiğinde söküm hattının duracağı, ardından sonraki iş istasyonlarına atanan tüm görevlerin kesintiye uğrayacağı varsayılmıştır. Çalışmadaki amaç, beklenen net geliri

maksimize etmektir. Literatürdeki yakın zamanda raporlanan stokastik karma-tamsayılı programın doğrusal programlama gevşetmesini kullanan bir sezgisel prosedür geliştirilmiştir. Veri olarak, Kalaycılar ve ark. çalışmasında (E. G. Kalaycılar, Azizoğlu, ve Yeralan, 2016) bulunan 20, 34, 47, 60 ve 73 parçalı bir ürünler kullanılmıştır. Bu ürünler 2, 4, 6 ve 8 farklı iş istasyonlarına bölünmüştür. Önerilen sezgisel prosedürün performansını değerlendirmek için sınırlandırma mekanizmalarını incelenmiştir ve iki üst sınır belirlenmiştir. Görev sayısı ve iş istasyonu sayısı, hesaplama performansını en çok etkileyen parametreler olarak belirlenmiştir. 73 görev ve 3 tehlikeli görev içeren örnekler üzerinde yapılan kapsamlı deneyler, sezgisel algoritmanın ve üst sınırların mükemmel performansı ifade edilmiştir.

Yeni ve ark. çalışması (Yeni, Cevikcan, Yazici, ve Yilmaz, 2024) çok ürünli, çok dönemli ve çok kişili söküm hattı kavramlarını yeni bir entegre yaklaşımla birleştirerek bu boşluğu doldurmaktadır. Öncelikle, çok kişili istasyonlar kavramını içeren genel bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Ardından, problemin karmaşıklığını ele almak için GA tabanlı çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Çaprazlama operatörü olarak tek nokta ve çift nokta çaprazlama yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, yalnızca genel maliyeti minimize etmeyi hedefleyen tek bir uygunluk fonksiyonuna odaklanılmıştır. Mutasyon operatörü olarak genellikle GA'da kullanılan bir yöntem kullanılmıştır. 0 ve 1 arasında rastgele bir değer oluşturulmaktadır. Oluşturulan değer belirlenen mutasyon eşiğinden büyük ise aynı birey ile devam edilmiştir, küçük veya eşit ise mutasyon uygulanmıştır. Algoritmaların başlangıç çözümü üretme prosedürlerinde rastgele, ekonomik demontaj miktarı ve tam zamanında (JIT) olmak üzere üç farklı parti büyüklüğü politikası kullanılmaktadır. Ayrıca, önerilen yaklaşımlarda çözümleri iyileştirmek için simüle edilmiş tavlama tabanlı yerel arama algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmalar uygulandıktan sonra, bazı yönetsel iç görüler sağlanmıştır. Hesaplama sonuçlarına göre, en küçük uygunluk fonksiyonu değerleri JIT başlangıç çözümü üretme prosedürü uygulandığında elde edilmiştir. Ayrıca, GA çaprazlama operatörlerinin uygunluk fonksiyonu açısından sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, tek nokta çaprazlama operatörünün, JIT tabanlı parti büyüklüğü politikası için biraz daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

He ve ark. çalışmasında (He, Chu, Dolgui, ve Anjos, 2024) 2010 yılından bu yana yayımlanmış 150'den fazla orijinal araştırma ve anket makalesi analiz edilerek DHD problemine kapsamlı bir bakış sunulmaktadır. Bu yayınları daha iyi analiz edebilmek adına, problem ayarları, koşullar ve çözüm yöntemleri perspektiflerini entegre eden yeni bir üçlü gösterim önerilmiştir. Bu anketin katkıları arasında: (i) yeni yayınlanan DHD ile ilgili entegre sorunların sınıflandırılıp incelenmesi; (ii) önceki incelemelerde ele alınmayan çok amaçlılık ve

belirsizliğe odaklanılması; (iii) belirsizlik altındaki çok amaçlı DHD problemlerinin ele alınması için derinlemesine çözüm yaklaşımlarının analiz edilmesi yer almaktadır.

Literatürde kullanılan veri setlerinin incelenmesi Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çizelge 2.1. Literatürde kullanılan veri setleri

VERİ	PARÇA SAYISI	DEMONTAJ SÜRESİ	ÖNCELİK İLİŞKİLERİ	TEHLİKE	TALEP
Cep telefonu	25	✓	✓	✓	✓
Ürün	10	✓	✓	✓	✓
Ürün	8	✓	✓	✓	✓
Buzdolabı	25	✓	✓	✓	✓
Yazıcı	55	✓	✓	✓	
Mikrodalga	41	✓		✓	✓
Matkap	22	✓		✓	✓
Laptop	47	✓	✓	✓	✓
TV	25	✓	✓	✓	✓
Klima	64	✓	✓	✓	✓
Mikrodalga	69	✓	✓	✓	✓
CRT TV	32	✓	✓	✓	
Radyo	30	✓	✓		
Buzdolabı	31	✓	✓	✓	✓
EOL Motoru	37	✓	✓		
TV	22	✓	✓	✓	✓
TV	27	✓	✓	✓	✓
Buzdolabı	66	✓	✓		
Otomobil	74	✓	✓	✓	✓

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, çok çeşitli optimizasyon algoritmalarının montaj hattı dengeleme problemleri üzerindeki uygulamalarına odaklanıldığını görülmüştür. Öne çıkan çalışmalar arasında tabu arama, ACO, ABC ve gri kurt algoritmaları yer almaktadır. Her bir çalışmada, farklı hedef fonksiyonları ve kısıtlar ile çalışarak optimal çözümleri bulmaya odaklanılmıştır. Örneğin, bazı çalışmalarda iş istasyonu sayısını en aza indirme, dengeyi sağlama veya enerji tüketimini minimize etme gibi çok amaçlı hedeflere ulaşmaya çalışılmıştır. Çalışmaların birçoğunda kullanılan algoritmalar, mevcut literatürdeki diğer meta-sezgisel yöntemlerle karşılaştırılmıştır ve bazıları zaman açısından en verimli çözümleri üretirken, bazıları optimal çözümler için daha fazla kaynak ve zaman gerektirmiştir.

Çalışmaların genel bulgusu, özellikle demontaj ve montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılan meta-sezgisel algoritmaların, yerel optimumlardan kaçınarak daha etkili sonuçlar elde etme kapasitesine sahip olduğudur.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, DHD probleminin çözümünde kullanılan veri setleri ile uygulanan SS algoritmasına ilişkin detaylı bilgilere yer verilmektedir.

3.1. Veri Seti

Çalışmada, DHD problemleri üzerine uygulanan çözüm yöntemlerinin test edilmesi ve karşılaştırılması için yaygın olarak kullanılan Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) ve Unpaced Assembly Line Balancing Problem (UALBP) veri setleri kullanılmıştır. Veri setleri, 1990'lı yıllardan itibaren Talbot ve arkadaşları ile Hoffmann tarafından önerilen test setlerini de içermektedir. Veri setlerine Armin Scholl tarafından sağlanan benchmark arşivinden ulaşılmıştır (Balancing, 1993). Elde edilen bu verilerde, parçaların montaj süresi ve öncelik ilişkileri bilgileri yer almaktadır. Ayrıca, Kalayci ve ark. çalışmasından (Kalayci vd., 2016) demontajı gerçekleştirilecek parçaların tehlikeli madde olma durumu ve talep edilme durumları da bu veri setlerine eklenmiştir. Kalayci ve ark. her bir veri seti için kullandıkları çevrim sürelerini çalışmalarında belirtmiştir, elde edilen bu değerler .mat uzantılı bir dosyaya kayıt edilmiştir. Çevrim süresi, her bir parçanın bir iş istasyonunda tamamlanması ve bir sonraki istasyona geçmesi için geçen süreyi ifade etmektedir. Kullanılan veri setlerine ilişkin ayrıntılar Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. SALBP ve UALBP veri setleri

VERİ SETİ	ÇEVİRİM SÜRESİ	VERİ SETİ	ÇEVİRİM SÜRESİ
BUXEY (P1)	30	ARC83 (P21)	5853
GUNTHER (P2)	41	ARC83 (P22)	6842
HAHN (P3)	2806	ARC83 (P23)	7571
HESKIAOFF (P4)	216	ARC83 (P24)	8412
KILBRIDGE (P5)	62	ARC83 (P25)	8898
LUTZ1 (P6)	2357	ARC83 (P26)	10816
MITCHELL (P7)	15	ARC111 (P27)	5755
ROSZIEG (P8)	16	ARC111 (P28)	8847
TONGE (P9)	168	ARC111 (P29)	10027
TONGE (P10)	170	ARC111 (P30)	10743
TONGE (P11)	173	ARC111 (P31)	11378
TONGE (P12)	179	ARC111 (P32)	17067
TONGE (P13)	182	BARTHOL2 (P33)	85
WEE-MAG (P14)	46	BARTHOL2 (P34)	89
WEE-MAG (P15)	47	BARTHOL2 (P35)	91

WEE-MAG (P16)	49	BARTHOL2 (P36)	95
WEE-MAG (P17)	50	LUTZ2 (P37)	15
WEE-MAG (P18)	52	LUTZ3 (P38)	150
ARC83 (P19)	3985	MUKHERJEE (P39)	201
ARC83 P(20)	5048	MUKHERJEE (P40)	301

Bu tez çalışmasında, referans test verilerine ek olarak literatürdeki farklı araştırmalardan elde edilen endüstriyel veri setleri SS algoritması ile değerlendirilmiştir. Kullanılan veri setleri Çizelge 2.1’de sunulmuştur. Bu veri setleri; Guo ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan 37 parçalı EOLMotor ve 25 parçalı cep telefonu verileri (L. Guo vd., 2024); Zeng ve arkadaşlarının çalışmasında bulunan 10 parçalı ürün ve 25 parçalı cep telefonu verileri (Yanqing Zeng vd., 2023); Yin ve arkadaşlarının çalışmasında yer alan 47 parçalı bilgisayar verisi (Yin vd., 2021); ayrıca Edis’in çalışmasında problemin amaç ve kısıtlarına uygun olarak kullanılan 47 parçalı bilgisayar ve 55 parçalı yazıcı verileridir (Edis, 2021).

Veri setleri için elde edilen tüm bilgiler planlanan bir formatta düzenlenmiştir. Öncelik ilişkilerinin değerlendirilmesi için veri_seti_adi-p.txt adlı dosyalar oluşturulmuştur. Öncelik ilişkilerinin tutulacağı dosyaların yapısı Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

Önce Gelmesi Gereken Parça	Sonra Gelmesi Gereken Parça
2	5
3	6
4	6
5	8
6	9
7	11
8	77
10	13
10	25

Şekil 3.1. Öncelik ilişkilerinin veri yapısı

Parçaların id değerleri, montaj süreleri, tehlikeli madde olma durumları ve talep durumları ise veri_seti_adi-i.txt adlı dosyalarda tutulmaktadır. Bu dosyaların yapısı Şekil 3.2’de gösterilmektedir.

Parça ID	Demontaj Süresi	Tehlikeli Madde Durumu	Talep Durumu
10	1250	1	80
11	700	0	13
12	464	0	48
13	500	1	59
14	1133	1	94
15	577	1	52
16	483	0	36
17	880	0	65

Şekil 3.2. Parça id, süre, tehlike ve talep durumlarının dosya yapısı

Elde edilen veriler istenilen formatta dosyalara kayıt edildikten sonra algoritma içerisinde kullanıma hazır hale gelmiştir.

3.2. Dağılık Arama (SS) Algoritması

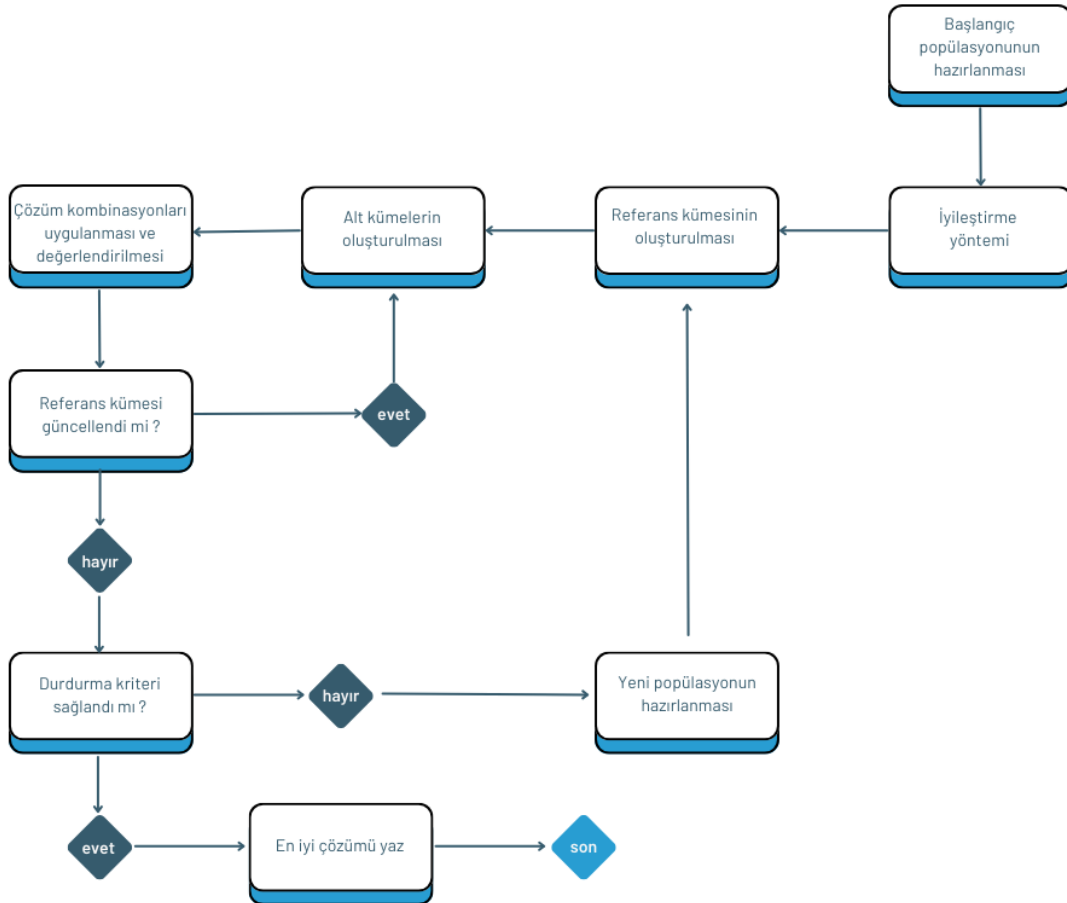
SS ilk olarak 1977’de Glover’ın "Yedek Kısıtlamalar Kullanarak Tamsayılı Programlama İçin Meta-sezgisel Yaklaşımlar" başlıklı çalışması ile (Glover, 1977) ortaya atılmıştır. SS, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiş bir meta-sezgisel yöntemdir. Geleneksel yöntemlerin aksine SS, çözüm uzayını rastgele aramak yerine, çeşitlilik ve iyileştirme stratejilerini kullanarak daha odaklı bir arama gerçekleştirmektedir. SS algoritmasının diğer evrimsel algoritmalarından farkı ve üstünlüğü, çözüm seçiminde ve yeni çözümler üretme yöntemindedir. SS algoritması, RefSet olarak adlandırılan en iyi çözümlerden oluşan bir küme oluşturmaktadır. Bu set, yalnızca uygunluk değeri en yüksek çözümleri değil, aynı zamanda çeşitliliği artırabilecek çözümleri de içermektedir. SS algoritması, referans kümesindeki çözümleri sistematik olarak seçerek kombinasyon işlemleriyle yeni çözümler üretmektedir. Yeni çözümler, çözüm havuzuna eklenmektedir ve referans kümesi güncellenmektedir. Eğer referans kümesinde değişiklik olmazsa, yeni bir popülasyon oluşturularak bu popülasyondan seçilen bireyler referans kümesine eklenmektedir. SS algoritması, küresel arama için etkili olup, popülasyonun tamamını işlemeye odaklanmak yerine en başarılı bireyleri ve en farklı bireyleri referans kümesine ekleyerek çeşitliliği sağlamaya çalışmaktadır (Huang, Wunsch, Levine, ve Jo, 2008). Bu yaklaşım, çözümlerin çeşitliliğini koruyarak daha geniş bir çözüm alanında arama yapmayı mümkün kılmaktadır. SS algoritmasının bu özellikleri, genetik algoritmalar ve diğer rakip algoritmalarla kıyasla daha

çeşitli ve potansiyel olarak daha yüksek kaliteli çözümler üretmesini sağlamaktadır. Hazırlanan referans kümesinden alt kümeler oluşturulmaktadır. Alt küme elemanları farklı sayıda belirlenebilmektedir ve bu çalışmada iki elemanlı alt kümeler seçilmiştir. Oluşturulan alt küme sayısının hesaplanma formülü Denklem 3.1’de gösterilmektedir. RFC terimi, oluşturulan referans kümelerinin sayısını ifade etmektedir.

$$\frac{(RFC * (RFC + 1))}{2}$$

3.1

Oluşturulan alt kümelerde yer alan bireylerden çözüm kombinasyon yöntemleri ile çocuk bireyler elde edilmektedir. Elde edilen çocuk bireyler ve referans kümesinde yer alan bireyler arasından RFC adet en iyi çözüm seçilerek yeni referans kümesi hazırlanmaktadır. Eğer seçilen yeni referans kümesi ve eski referans kümesinden farklı ise, tekrar alt küme oluşturulma aşamasına geçilmektedir. Yeni oluşturulan referans kümesi ile eski referans kümesi eşit ise durdurma şartına bağlı olarak referans kümesinin RFC/2 adedi arama uzayında rastgele belirlenen yeni çözümler ile değiştirilmektedir. SS algoritmasının akış şeması Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. SS algoritması akış şeması

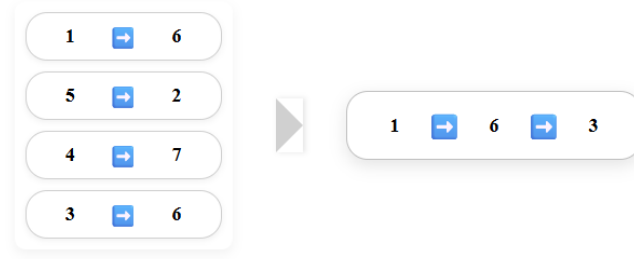
3.3. Çaprazlama Teknikleri

SS algoritmasında yeni aday çözümlerin üretilmesinde en önemli adımlardan biri çaprazlama teknikleridir. Bu çalışmada, çözüm çeşitliliğini artırmak ve daha geniş bir arama alanını keşfetmek amacıyla farklı çaprazlama tekniklerinden yararlanılmıştır. Toplamda 7 farklı çaprazlama tekniği kodlanmıştır: Kısmen Eşleşen Çaprazlama (PMX), Sıra Tabanlı Çaprazlama (OBX), Tek Noktalı Sıralı Çaprazlama (OX1), Çift Noktalı Sıralı Çaprazlama (OX2), Tersine Çaprazlama (Inversion - IX), Dönüşüm Çaprazlama (Cyclic - CX), Pozisyon Tabanlı Çaprazlama (PBX). Her bir teknikten iki çocuk birey üretilmiş ve böylece her nesilde toplam 14 çocuk birey oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, algoritmanın performansı, çaprazlama tekniklerinin her birinin tek başına uygulanması ile tüm tekniklerin bir arada kullanıldığı senaryolar altında değerlendirilmiştir. Çaprazlama işlemlerinin açıklanmasında, P1 ve P2 sembolleri ebeveyn (parent) bireyleri, C1 ve C2 sembolleri ise çaprazlama sonucunda elde edilen çocuk (child) bireyleri temsil etmektedir. Tüm çaprazlama tekniklerinde aynı gösterim kullanılmıştır. Çaprazlama işlemlerinde kullanılan ebeveyn bireyler, SS algoritmasının yapısı gereği, çözüm kalitesi ve çeşitliliği dikkate alınarak oluşturulan referans kümesinden seçilmektedir.

- **Kısmen Eşleşen Çaprazlama:** Rastgele seçilen iki indis arasındaki elemanlar çapraz olarak yer değiştirmektedir. Sonrasında çaprazlama yapılan değerler arasındaki bağlantı Şekil 3.5'te görüldüğü gibi incelenmektedir ve çocuk bireylerde boş kalan yerlere, eşleme ilişkileri dikkate alınarak yerleştirilmektedir. Şekil 3.4'te PMX çaprazlama tekniğinin bir örneği gösterilmektedir.

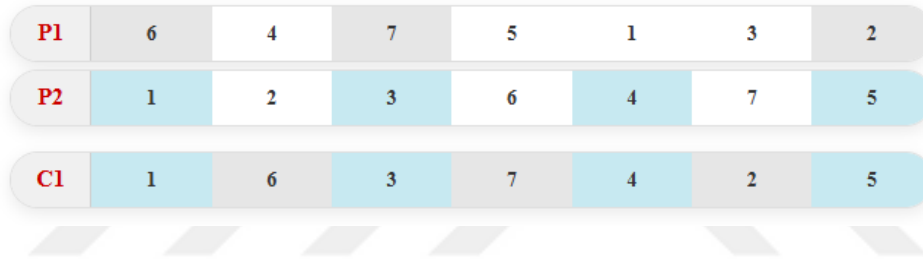
P1	1	2	3	4	5	6	7
P2	5	4	6	7	2	1	3
C1	3	5	6	7	2	1	4
C2	2	7	3	4	5	6	1

Şekil 3.4. PMX çaprazlama tekniği örneği



Şekil 3.5. Çaprazlama yapılan değerler arasındaki bağlantı şeması

- **Sıra Tabanlı Çaprazlama:** Rastgele referans noktaları seçilmektedir. Şekil 3.6’da P1’den rastgele referans seçilmektedir. P2’deki elemanlar P1’den seçilenler harici çocuk bireye aktarılmaktadır. Çocuk bireyde P1’deki referans noktalarının yeri boş kaldığı için P1’deki sıra ile boş kısımlara referans noktaları eklenmektedir. Şekil 3.6’da OBX çaprazlama tekniğinin bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.6. OBX çaprazlama tekniği örneği

- **Sıralı Çaprazlama:** Şekil 3.7’ye bakıldığında çaprazlama yapılacak kısımlar gri ve mavi olarak renklendirilmiştir. P2’de seçilen kısım P1’ e eklenmektedir ve buradan C1 elde edilmektedir. 1 değerinin P1’de bulunması sebebiyle 1 değeri yerine P1’de bulunmayan 2 değeri eklenmektedir. Aynı şekilde P1’ den seçilen kısım P2’ ye eklenmektedir. OX çaprazlama tekniği sonucunda iki adet çocuk oluşturulmaktadır. OX1, çaprazlama sırasında tek bir nokta seçilerek P1’den P2’ye kadar olan bölümde kullanılmaktadır. OX2’de ise iki nokta seçilerek ilgili bölüm üzerinde aynı işlemler gerçekleştirilmektedir.

P1	1	3	4	5	6	7	2
P2	5	4	3	2	7	1	6
C1	1	3	4	5	2	7	6
C2	5	4	3	2	1	6	7

Şekil 3.7. OX1 çaprazlama tekniği örneği

- **Tersine Çaprazlama:** Rastgele seçilen iki indis arasında değerler tersten sıralanmaktadır. Örneğin 1, 2, 3 değerleri çaprazlama için seçilmiş ise oluşacak çocuk birey içerisinde 3, 2, 1 olarak sıralanmaktadırlar. Birey 1 için seçilen değerler ters çevrilerek ikinci çocuk birey içerisine yazılmaktadır. Sonrasında çocuk bireyde boş kalan kısımlar birey 2'deki değerler ile doldurulmaktadır. Aynı işlemler birinci çocuk birey için de yapılmaktadır. Şekil 3.8'de tersine çaprazlama tekniğinin bir örneği görülmektedir.

P1	4	1	2	7	5	6	3
P2	1	2	3	4	5	6	7
C1	1	2	5	4	3	7	6
C2	1	3	5	7	2	4	6

Şekil 3.8. IX çaprazlama tekniği örneği

- **Dönüşüm Çaprazlama:** Şekil 3.9'daki örneğe bakıldığında iki birey arasındaki bağlantı göz önüne alınarak referans noktaları seçilmektedir. P1'deki ilk değerden başlanarak Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bağlantılı bir çember oluşturulmaktadır. Sonrasında seçilen bu değerler iki birey arasında yer değiştirilerek çocuk bireylere aktarılmaktadır.

P1	1	2	3	4	5	6	7
P2	5	4	6	7	2	3	1
C1	5	4	3	7	2	6	1
C2	1	2	6	4	5	3	7

Şekil 3.9. CX çaprazlama tekniği örneği



Şekil 3.10. Bağlantılı noktaların çaprazlama için seçilmesi

- **Pozisyon Tabanlı Çaprazlama:** Dönüşüm çaprazlamada olduğu gibi referans noktalar seçilmektedir. İki bireyden iki çocuk oluşmaktadır. Şekil 3.11’deki örneğe bakıldığında P1 ve P2’ de aynı indislerdeki elemanlar referans olarak seçilmektedir. P1’ de referans olarak seçilen elemanlar çocuk bireye eklenerek boş kalan kısımlar P2’ deki elemanlar ile sırasıyla doldurulmaktadır. Aynı şekilde P2’ deki referans elemanların arası da P1’ deki elemanlar ile sırasıyla doldurulmaktadır.

P1	2	8	12	1	3	5	6	11	9	4	7	10
P2	4	9	5	7	10	1	3	2	6	8	11	12
C1	2	8	4	5	3	10	6	11	9	1	7	12
C2	4	9	8	12	10	1	3	2	6	5	11	7

Şekil 3.11. PBX çaprazlama tekniği örneği

Quan OuYang ve arkadaşlarının çalışmasında (Quan ve Xu, 2015) PMX, OBX ve Adaptation of the Edge Recombination Crossover (aERX) çaprazlama tekniklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma sonucunda, PMX çaprazlama tekniğinin en rekabetçi ve en iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4. DAĞINIK ARAMA ALGORİTMASININ DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN UYGULANMASI

Bu tez çalışmasında, SS algoritması DHD problemine uygulanmıştır. Amaç; istasyon sayısını, bekleme sürelerini, tehlikeli madde ve talep kaynaklı ceza puanlarını eş zamanlı olarak minimize eden, aynı zamanda öncelik ve çevrim süresi kısıtlarına uyan çözümler üretmektir. SS algoritmasında Şekil 3.3.'te görüldüğü üzere başlangıçta belirlenen popülasyon boyutu kadar rastgele bir popülasyon oluşturulmaktadır. Örneğin, 8 parçadan oluşan bir veri seti için belirlenen popülasyon boyutu kadar rastgele bireyler üretilmektedir. Oluşturulan örnek popülasyon Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

1:	2	3	5	7	6	8	1	4
2:	1	8	4	5	6	2	7	3
3:	5	1	2	6	3	8	7	4
4:	3	7	1	2	4	6	8	5
...								
99:	4	6	8	3	7	1	5	2
100:	8	5	3	1	2	7	4	6

NP: 100, Parça Sayısı: 8

Şekil 4.1. Örnek popülasyon oluşturulması

Tez çalışmasında, uyulması gereken bazı kısıtlar mevcuttur. Bu kısıtlar; veri setinde yer alan işlem önceliği, her görevin yalnızca bir istasyona atanabilmesi ve çevrim süresinin aşılmaması durumlarıdır. Oluşturulan aday çözümlerden öncelik ilişkisini sağlamayanlar, öncelik onarma fonksiyonuna gönderilerek düzeltilmektedir (detaylar için bkz. 4.1). Öncelik onarma işlemi, deterministik yöntem ve iki farklı stokastik yaklaşım (Tip 1 ve Tip 2) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, talep ve tehlikeli madde durumlarında belirli bir ceza puanı eklenmektedir. Örneğin, veri setinde 5. parçanın 7. parçadan önce gelmesi gerekiyorsa, bu koşulu sağlamayan bireyler öncelik onarma fonksiyonuna gönderilmektedir. Şekil 4.2'de öncelik şartını sağlamayan bireyler vurgulanmıştır. Bu işlem sonucunda kısıtları ihlal eden çözümler elenmiş, yalnızca geçerli bireyler popülasyonda tutulmuştur. Ardından, yinelenen bireylerin önlenmesi amacıyla popülasyon içerisindeki tekrar eden bireyler kaldırılmıştır.

1:	2	3	5	7	6	8	1	4
2:	1	8	4	5	6	2	7	3
3:	5	1	2	6	3	8	7	4
4:	3	7	1	2	4	6	8	5
...								
99:	4	6	8	3	7	1	5	2
100:	8	5	3	1	2	7	4	6

NP: 100, Parça Sayısı: 8

Şekil 4.2. Öncelik şartını sağlamayan bireyler

Tez çalışmasında uygunluk fonksiyonları, çalışmanın amacı doğrultusunda tanımlanmaktadır. Uygunluk fonksiyonu ile elde edilen F1, F2, F3 ve F4 değerleri, en iyi çözümlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Çözümlerin değerlendirilmesi için hesaplanan uygunluk fonksiyonlarının denklemleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Uygunluk fonksiyonları hesaplanma denklemleri

DLBP Matematiksel Model

$$\min F1 = m$$

$$\min F2 = \sum_{k \in K} (c - T_k)^2$$

$$\min F3 = \sum_{i \in N} Z_i * h_i$$

$$\min F4 = \sum_{i \in N} Z_i * d_i$$

- **F1 uygunluk fonksiyonu:** Toplam iş istasyonu sayısı
- **F2 uygunluk fonksiyonu:** Boş beklemlerin süresi (bir istasyondaki işin bitiş süresi ile çevrim süresi farkı)
- **F3 uygunluk fonksiyonu:** Tehlikeli maddeler için ceza puanı
- **F4 uygunluk fonksiyonu:** Talep miktarına bağlı ceza puanı

Çizelge 4.1’de verilen uygunluk fonksiyonlarının hesaplanması sonucunda elde edilen çözümler, ilk aşamada rastgele oluşturulmaktadır. Rastgele çözüm kümesi, her bir bireye ait

F1, F2, F3 ve F4 değerlerini içermekte olup bu değerler herhangi bir sıralama kriterine göre düzenlenmemektedir. Bu durumda popülasyondaki bireyler, uygunluk düzeyleri açısından birbirinden bağımsız şekilde dağılmaktadır. Rastgele oluşturulan çözüm kümesi üzerinde *sortrows* fonksiyonu kullanılarak sıralama işlemi gerçekleştirilmektedir. *Sortrows* fonksiyonu, belirtilen sütunlar doğrultusunda satırları küçükten büyüğe doğru sıralayan bir MATLAB fonksiyonudur. Bu çalışmada tüm bireylerin birinci sütun (F1) değerleri aynı olduğu için sıralama işlemi ikinci sütun (F2) değerlerine göre yapılmaktadır. Sıralama sonucunda elde edilen çözüm kümesi Şekil 4.3'te sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere, F2 sütunundaki değerler küçükten büyüğe doğru olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Diğer sütunlardaki (F3 ve F4) değerler de, her bireyin özgün uygunluk ilişkisini koruyacak biçimde bu sıraya göre yeniden konumlandırılmıştır.

Rastgele Çözüm Kümesi				Sıralanmış Çözüm Kümesi			
F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
8	18999795	932	169900	8	15348385	968	170817
8	15348385	968	170817	8	16000939	969	174880
8	18884703	896	170797	8	16528527	969	170290
8	18888439	926	170658	8	18884703	896	170797
8	16000939	969	174880	8	18888439	926	170658
8	16528527	969	170290	8	18999795	932	169900

Şekil 4.3. Çözüm kümesinin uygunluk fonksiyonuna göre sıralanması

Bu işlem sonucunda, popülasyon bireyleri uygunluk değerlerine göre sıralanmış ve en uygun bireylerin seçilmesi ya da sonraki nesillere aktarılması için temel yapı oluşturulmuştur. Sıralama sonrası elde edilen bu çözüm kümesinin en üst kısmında yer alan bireyler, referans kümesinin “en iyi çözümler” bölümünü oluşturmak üzere seçilmektedir. Bu aşamada, sıralı çözüm kümesinin en üstünden referans kümesinin yarısını dolduracak sayıda birey referans kümesine eklenmektedir.

Referans kümesinin yalnızca en iyi çözümlerden oluşturulması, arama uzayında yerel minimuma takılma riskini artırabilmektedir. Bu nedenle, referans kümesinin ikinci yarısı, çözüm kalitesi gözetilmeksizin, popülasyondaki bireyler arasından çözüm uzayındaki uzaklıklar dikkate alınarak en farklı bireyler arasından seçilmektedir. Bu adımın temel amacı, algoritmanın çözüm uzayını daha geniş bir biçimde keşfetmesini ve genetik çeşitliliği korumasını sağlamaktır. Referans kümesinin çeşitliliğini korumak için, öncelikle

popülasyondaki bireylerin her biri sıralanarak **sökülme sıralamaları** elde edilmiştir. Böylece her bireyin, çözümdeki elemanlarının sıralamadaki konumları belirlenmiştir. Örneğin, [1, 3, 5, 6, 7, 8, 4, 2] temsiline sahip bir bireyin sökülme sıralamasında;

- 1 değeri 1'inci sırada,
- 2 değeri 8'inci sırada,
- 3 değeri 2'nci sırada sökülmetedir.

Bu şekilde elde edilen sıralama değerleri, popülasyondaki bireyler arasındaki **fark hesaplamasında** kullanılmaktadır. Sökülme sıralaması örneği Şekil 4.4'te detaylı olarak sunulmuştur.

Popülasyon Sökülme Sırası								
BİREY	1	3	5	6	7	8	4	2
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	1	8	2	7	3	4	5	6
BİREY	1	2	4	5	8	7	6	3
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	1	2	8	3	4	7	6	5
BİREY	2	3	5	7	8	6	4	1
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	8	1	2	7	3	6	4	5
BİREY	3	5	4	6	7	1	8	2
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	6	8	1	3	2	4	5	7
BİREY	4	8	7	6	5	3	2	1
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	8	7	6	1	5	4	3	2
BİREY	2	5	6	4	1	3	8	7
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	5	1	6	4	2	3	8	7

Şekil 4.4. Popülasyondaki bireylerin sökülme sıralaması örnek gösterimi

Referans kümesinde yer alan bireyler için de aynı şekilde sökülme sıralaması işlemi uygulanmıştır. Referans kümesindeki elemanlara ilişkin bir örnek Şekil 4.5'te sunulmuştur. Örneğin, Referans Birey 1'de parça 2 (P2) ikinci sırada sökülürken, Referans Birey 2'de P2 sekizinci sırada sökülmetedir.

Referans Kümesi								
REFERANS BİREY 1	1	2	4	5	8	7	6	3
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	1	2	8	3	4	7	6	5
REFERANS BİREY 2	3	5	4	6	7	1	8	2
PARÇA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
SÖKÜLME SIRASI	6	8	1	3	2	4	5	7

Şekil 4.5. Referans kümesindeki bireylerin sökülme sıralaması örnek gösterimi

Daha sonra, popülasyondaki bireylerin sökölme sıralamaları ile referans kümesindeki bireylerin sökölme sıralamaları arasındaki farklar hesaplanmıştır. Her referans birey için bu farkların toplamı alınarak bir toplam farklılık değeri elde edilmiştir. Hesaplama örneği bir birey üzerinden gerçekleştirilerek Şekil 4.6'da sunulmuştur.

Mutlak Pozisyon Farklarının Toplamı Hesaplama Örneği								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
BİREY 1'İN SÖKÖLME SIRASI	1	8	2	7	3	4	5	6
REFERANS BİREY 1'İN SÖKÖLME SIRASI	1	2	8	3	4	7	6	5
SÖKÖLME SIRASI FARK 1	$ 1-1 =0$	$ 8-2 =6$	$ 2-8 =6$	$ 7-3 =4$	$ 3-4 =1$	$ 4-7 =3$	$ 5-6 =1$	$ 6-5 =1$
SÖKÖLME SIRASI FARK 1 TOPLAMI : 22								
REFERANS BİREY 2'İN SÖKÖLME SIRASI	6	8	1	3	2	4	5	7
SÖKÖLME SIRASI FARK 2	$ 1-6 =5$	$ 8-8 =0$	$ 2-1 =1$	$ 7-3 =4$	$ 3-2 =1$	$ 4-4 =0$	$ 5-5 =0$	$ 6-7 =1$
SÖKÖLME SIRASI FARK 2 TOPLAMI : 12								
TOPLAM FARK : 34								

Şekil 4.6. Toplam fark hesaplaması örneği

Elde edilen toplam fark değerlerine göre bireyler büyükten küçüğe doğru sıralanmış ve en yüksek farklılık değerine sahip bireyler, referans kümesine çeşitliliği artırmak amacıyla dâhil edilmiştir. Bu sayede, referans kümesinde mevcut bireylerden en fazla farklılık gösteren çözümler belirlenmiş ve algoritmanın arama uzayında daha geniş bir keşif yapabilmesi sağlanmıştır.

Oluşturulan referans kümelerinden, çaprazlama teknikleri kullanılarak alt kümeler oluşturulmaktadır. Bu aşamada kullanılan çaprazlama yöntemleri, Bölüm 3.3'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Oluşturulan alt kümelerden belirli sayıda rastgele seçimler yapılmakta; seçilen yeni referans kümeleri, önceki referans kümelerinden farklı olduğu sürece bu süreç yinelenmektedir. Böylece, çözüm uzayında daha çeşitli ve potansiyel olarak daha iyi çözümler içeren yeni alt kümeler elde edilmektedir.

Çalışmada durdurma koşulu olarak maksimum FEs değeri kullanılmaktadır. FEs değeri, algoritmanın çalışması süresince değerlendirilen toplam çözüm sayısını ifade etmektedir. Her bir çözüm, algoritmanın belirli bir problem için uygunluk veya maliyet fonksiyonunu değerlendirmesiyle ne kadar iyi bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Maksimum FEs değeri ise, algoritmanın çözüm uzayını ne ölçüde kapsamlı biçimde keşfedeceğini ve arama sürecinin derinliğini belirlemektedir.

Oluşturulan aday çözümlerde öncelik ilişkisini sağlamak amacıyla kullanılan öncelik onarma fonksiyonları, algoritmanın geçerli çözümler üretmesini garanti etmektedir. Öncelik onarma fonksiyonu tarafından üretilen çözümlerin, öncelik koşulunu sağlayıp sağlamadığı

kontrol edilmektedir. Bu fonksiyonlar, uygulama mantığı ve çözüm çeşitliliğine etkileri bakımından deterministik ve stokastik olmak üzere iki farklı şekilde ele alınmıştır. Deterministik yöntemler, her işlem veya hesaplama adımında kesin ve öngörülebilir bir sonuç üretmektedir. Aynı girdiler için her zaman aynı çıktı elde edilmektedir. Stokastik yöntemler, işlemler sırasında rastgelelik veya olasılıksal seçimler içermektedir. Aynı girdilerde farklı çalıştırmalarda farklı sonuçlar elde edilebilmektedir.

- **Deterministik (DTC) Öncelik Onarma Fonksiyonu:** Deterministik onarma fonksiyonunda, önce gelmesi gereken parça (parça 1) ve sonra gelmesi gereken parça (parça 2) yanlış sıradaysa, parça 2'nin mevcut indeksi belirlenmektedir ve parça 1 diziden çıkarılmaktadır, parça 1 bu indeksi referans alarak parça 2'nin hemen soluna yerleştirilmektedir. Şekil 4.7'deki örnekte görüldüğü üzere önce gelmesi gereken parça 5'tir. Buna göre 4'ün indeksi belirlenerek 5 diziden çıkarılmaktadır. Sonrasında 5, 4'ün indeksinin hemen soluna eklenerek öncelik şartı sağlanmaktadır.

Öncelik Şartı Sağlanmayan	1	3	4	2	5
Öncelik Şartı Sağlanan	1	3	5	4	2

Şekil 4.7. Deterministik öncelik onarma fonksiyonu çalışma örneği

- **Stokastik Tip 1 (ST1) Öncelik Onarma Fonksiyonu:** ST1 öncelik onarma fonksiyonu, önce gelmesi gereken parça (parça 1) ve sonra gelmesi gereken parça (parça 2) arasındaki öncelik ilişkisini olasılıksal bir yöntemle düzeltmektedir. Fonksiyon, parça 1 ve parça 2 arasındaki bölümü belirlemektedir ve bu bölümde rastgele ardışık elemanlar arasında yer değiştirme (swap) işlemleri gerçekleştirmektedir. Bu işlem, öncelik şartının sağlanmasını olasılıksal olarak artırmakta ve deterministik yöntemle kıyasla çözüm çeşitliliğini yükseltmektedir; ancak deterministik yöntem gibi kesinliği garanti etmemektedir. Bu nedenle, fonksiyonun sonucu şart sağlanana kadar tekrar öncelik kontrolünden geçmektedir ve bu süreç algoritmanın çalışma süresini etkilemektedir. Bu yaklaşım, algoritmanın arama alanını daha geniş keşfetmesine ve yerel minimumlara takılma riskinin azalmasına olanak tanımaktadır. Böylece algoritma, çözüm uzayında keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) dengesini daha verimli şekilde sağlar. Şekil 4.8'deki örnekte 5 numaralı parça, 1 numaralı parçadan önce gelmelidir. Görüldüğü üzere ilk üç çalıştırmada olasılıksal sonuçlar öncelik şartını

sağlamamaktadır. Burada yeşil ile vurgulanan kısımlar rastgele yer değiştirme yapılan elemanları göstermektedir. Şart sağlanana kadar öncelik kontrolünden geçen aday çözüm tekrar stokastik öncelik onarma fonksiyonuna gönderilmektedir. Dördüncü çalıştırma sonucunda öncelik şartı sağlanmıştır.

Öncelik Şartı Sağlanmayan	1	3	4	2	5
1. Çalıştırma Şartı Sağlanmıyor	3	1	4	2	5
2. Çalıştırma Şartı Sağlanmıyor	3	1	4	5	2
3. Çalıştırma Şartı Sağlanmıyor	3	1	5	4	2
Öncelik Şartı Sağlanan	3	5	1	4	2

Şekil 4.8. ST1 öncelik onarma fonksiyonu çalışma örneği

- Stokastik Tip 2 (ST2) Öncelik Onarma Fonksiyonu:** ST2 öncelik onarma fonksiyonu, önce gelmesi gereken parça (parça 1) ile sonra gelmesi gereken parça (parça 2) arasındaki öncelik ilişkisini olasılıksal bir yöntemle düzeltmektedir. Bu fonksiyon, ST1'den farklı olarak parça 1 ve parça 2 arasındaki bölümde (segment) yer değiştirme işlemleri yapmak yerine, parça1'in konumunu sabit tutarak ondan sonraki elemanların yerleşimini rastgeleleştirir. Böylece parça 2, parça 1'den sonraki rastgele bir pozisyona taşınmaktadır. Bu yaklaşım, deterministik yöntemlere kıyasla daha fazla çözüm çeşitliliği sağlamakta ve algoritmanın arama alanını genişletmektedir. Eğer parça 1 dizinin en sonunda bulunuyorsa, parça 2 doğrudan dizinin sonuna taşınmakta ve bu durumda öncelik ilişkisi otomatik olarak sağlanmaktadır. Şekil 4.9'da örnek bir uygulama gösterilmektedir. Bu örnekte, 4 numaralı parçanın 2 numaralı parçadan önce gelmesi gerekmektedir. Öncelikle 2 numaralı parça diziden çıkarılmakta, ardından 4 numaralı parçanın indisi belirlenmektedir. Belirlenen indisten sonraki konumlara rastgele bir şekilde 2 numaralı parça yeniden yerleştirilmektedir.

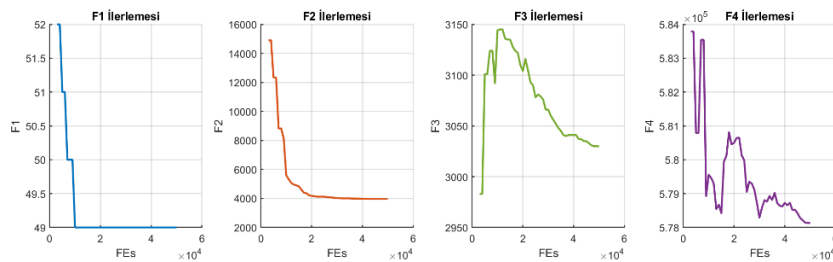
Öncelik Şartı Sağlanmayan	2	4	1	3	5
Parça 2 için Geçerli İndisler	2	4	1	3	5
Öncelik Şartı Sağlanan	4	1	3	2	5

Şekil 4.9. ST2 öncelik onarma fonksiyonu çalışma örneği

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında önerilen ikili SS algoritması, Bölüm 4'te tanımlanan Demontaj Hattı Dengeleme problemine ait 47 farklı veri seti üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Önerilen algoritmalar MATLAB ortamında kodlanmıştır. Algoritmalar; Intel® Core i9-14900KF 3.20 GHz işlemci, 128 GB DDR5 6000 MHz RAM, ADATA 2 TB + 1 TB toplam 3 TB NVMe Gen4 SSD depolama alanı, ASUS RTX 5070-O12G 12 GB GDDR7 ekran kartına sahip bilgisayarda çalıştırılmıştır. Referans çalışmalarda algoritmaların çalışma süresi açıkça belirtilmediğinden, bu çalışmada karşılaştırılabilir ve adil sonuçlar elde edebilmek amacıyla SS algoritması için çalışma süresi (runtime) 30 olarak belirlenmiştir. RFC parametresi için 10, 12, 14, 16, 18 ve 20 değerleri ayrı ayrı test edilmiştir. Geng ve ark. tarafından yapılan çalışmada (Geng, Cui, ve Gu, 2016), optimizasyon algoritmalarında popülasyon boyutunun probleme özgü olarak belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu doğrultuda, optimize edilecek problemin yapısı ve kullanılan donanımın çalışma süresine etkisi dikkate alınarak popülasyon boyutu 100 olarak seçilmiştir.

BARTHOL veri seti üzerinde yürütülen deneysel analizler, belirlenen maksimum FEs değerinin algoritmanın iyileştirme sürecini destekleyecek şekilde doğru seçildiğini göstermektedir. Şekil 5.1'de sunulan sonuçlar, en iyi çözümlerin FEs boyunca nasıl değiştiğini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Grafikler incelendiğinde, algoritmanın önceliklendirme yapısına uygun biçimde ilk olarak F1 fonksiyonunda belirgin bir düşüş gerçekleştiği ve çözümün bu uygunluk fonksiyonunda durağanlaşmaya yaklaştığı görülmektedir. Çok amaçlı minimizasyon yaklaşımında F1'in öncelikli olması nedeniyle, F1'de yeterli iyileşme sağlandıktan sonra sırasıyla F2, F3 ve F4 fonksiyonlarında optimizasyon devam etmektedir. Grafiklerde gözlemlenen bu sıralı iyileşme eğilimi, belirlenen 50.000 FEs sınırının tüm fonksiyonlarda anlamlı bir gelişim sağlayacak kadar geniş bir aralık sunduğunu doğrulamaktadır. FEs değeri üst sınıra ulaşmasına rağmen bazı fonksiyonlarda iyileşmenin devam ediyor olması, maksimum değerlendirme sayısının çözüm kalitesine doğrudan katkı sağladığını net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 5.1. BARTHOL veri seti için uygunluk fonksiyonları değerlerinin FEs boyunca değişimi

5.1. Farklı Çaprazlama Tekniklerinin Performans Analizi

Bu tez çalışmasında, önerilen SS algoritmasının performansını değerlendirmek amacıyla yedi farklı çaprazlama tekniği kullanılmıştır. Her bir çaprazlama tekniği, RFC 20 değeri ve deterministik öncelik onarma fonksiyonu kullanılarak ayrı ayrı test edilmiş; elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu tekniklerin tamamının birlikte kullanıldığı Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı (Ensemble Crossover - EX) oluşturularak algoritmanın çözüm kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı, farklı çaprazlama operatörlerinin sahip olduğu çeşitliliği bir araya getirerek arama uzayının daha etkin bir biçimde taranmasını ve yerel minimumlara takılma olasılığının azaltılmasını amaçlamaktadır. Bununla birlikte, bu yaklaşım ek bir hesaplama maliyeti getirmemekte olup, kullanılan FEs sayısı tüm çaprazlama tekniklerinde olduğu gibi aynı seviyede tutulmuştur. Çizelge 5.1’de, çaprazlama tekniklerinin her birinin ayrı ayrı uygulanmasıyla elde edilen sonuçların yanı sıra, bu tekniklerin birlikte kullanıldığı Birleşik Çaprazlama Yaklaşımına ait çıktılar da sunulmaktadır.

Çizelge 5.1a. Çaprazlama tekniklerinden elde edilen sonuçlar

VERİ	PMX				PBX				OX1			
Veri Seti Adı	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P1	12	118	43	17473	12	118	48	17237	12	120	50	17314
P2	14	1519	173	35101	14	1529	169	34861	14	1547	177	34876
P3	6	1873360	355	76809	6	1873360	355	76836	6	1873360	355	77157
P4	5	628	46	17010	5	628	51	18196	5	628	60	17290
P5	10	466	179	47265	10	466	225	47547	10	466	238	48476
P6	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383
P7	8	31	38	11603	8	31	38	11603	8	31	38	11603
P8	8	5	68	20597	8	5	68	20617	8	5	68	20617
P9	23	5748	653	115447	23	5780	650	117098	23	6170	644	117398
P10	23	7246	643	114445	23	7452	639	114394	23	7682	703	116212
P11	22	6142	620	115059	23	9923	630	114976	23	10503	677	114443
P12	22	8682	628	116177	21	4377	649	115525	22	10338	682	115261
P13	22	11982	668	116568	21	7364	652	114614	22	12808	681	115530
P14	37	2409	492	147227	37	2457	515	154383	37	2527	548	146903
P15	34	617	485	150058	34	741	559	149073	34	661	555	144708
P16	33	520	407	142013	33	604	535	146614	33	588	495	147646
P17	32	349	404	145396	32	373	499	148785	32	365	518	150826
P18	31	449	520	148536	32	899	544	152033	32	895	581	149504
P19	21	3288818	907	172410	21	3245058	1049	174843	21	3330352	947	171791
P20	16	1820123	944	176712	16	1826713	997	179845	16	1834249	933	178129
P21	14	2784731	956	172570	14	2785317	1040	178199	14	2793521	989	174673
P22	12	4276963	939	175216	12	4277989	951	174183	12	4284421	920	173664
P23	11	5395786	1048	175698	11	5421078	968	177579	11	5423136	918	177978
P24	10	7106539	976	174953	10	7150551	954	173597	10	7117405	914	171835

P25	9	2143149	911	172273	9	2143289	897	169668	9	2145311	891	174252
P26	8	14969435	906	172533	8	15548055	962	175459	8	15727335	909	174072
P27	29	11112230	1923	326411	28	6096641	1843	318585	29	13280846	1883	331147
P28	18	4899519	1936	330679	18	5033617	1741	325770	18	4909871	1805	320388
P29	16	6450169	1896	324848	16	6604297	1904	324349	16	6834509	1974	326955
P30	15	7776298	1801	324922	15	7952056	1949	329384	15	8208070	1972	328121
P31	14	5685413	1781	327651	14	6024023	1948	324438	14	5935717	1808	321271
P32	9	1163770	1863	320010	9	1173074	1917	327276	9	1166582	1936	328779
P33	54	3072	2860	558324	55	4329	2867	582568	55	4979	2895	573027
P34	52	3742	2768	567271	52	3926	2822	575737	52	4876	2846	574875
P35	51	3689	2815	579474	51	4737	2947	587014	52	5866	2988	570638
P36	49	4003	3074	568636	49	4311	3044	576286	49	5269	2892	563513
P37	35	92	976	196364	35	104	965	196852	35	132	962	196964
P38	12	2080	1013	185012	12	2120	1011	188851	12	2118	1023	186720
P39	23	12125	1535	235162	23	12169	1498	235142	23	12205	1570	232896
P40	15	10153	1489	237572	15	10199	1624	235520	15	10183	1588	238409

Çizelge 5.1b. Çaprazlama tekniklerinden elde edilen sonuçlar

VERİ	OX2				OBX				IX			
Veri Seti Adı	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P1	12	118	43	17473	12	120	52	17501	12	118	43	17473
P2	14	1543	173	34514	14	1521	175	35162	14	1519	173	35101
P3	6	1873360	355	76776	6	1873360	355	76821	6	1873360	355	76776
P4	5	628	46	16664	5	628	42	18898	5	628	48	17111
P5	10	466	216	44829	10	466	224	44340	10	466	157	48018
P6	7	812975	117	24093	7	812703	117	24386	7	812703	117	24383
P7	8	31	38	11603	8	31	38	11603	8	31	38	11603
P8	8	5	68	20597	8	5	68	20597	8	5	68	20597
P9	23	5866	575	119330	23	5860	639	118256	23	5772	665	113851
P10	23	7316	645	114913	23	7518	604	115330	23	7256	575	115319
P11	22	4584	650	118320	23	9963	630	117405	23	9847	606	116756
P12	22	8846	652	116728	22	9238	570	118050	21	3701	604	113653
P13	22	11462	605	116617	21	5562	588	117289	22	11698	673	114922
P14	36	1625	487	153752	36	1847	535	148044	37	2449	472	145207
P15	34	629	473	153252	35	1256	482	146680	34	623	509	154713
P16	33	502	519	148073	33	522	554	148755	33	502	505	156051
P17	32	341	426	152061	32	359	492	145637	32	363	394	150262
P18	32	877	459	150501	32	891	520	145044	32	885	426	150110
P19	21	3223864	1016	177848	21	3252120	1016	177694	21	3236618	929	174261
P20	16	1802745	915	175964	16	1784385	1002	178694	16	1761945	929	173640
P21	14	2785303	1021	176712	14	2788213	1037	178059	14	2786271	959	172765
P22	12	4277923	898	175274	12	4284455	966	174937	12	4269027	970	176419
P23	11	5396758	932	175980	11	5398354	956	180281	11	5358190	924	175709
P24	10	7104651	988	176180	10	7143449	918	176942	10	7098329	914	172892
P25	9	2142875	926	177826	9	2142913	1012	175103	9	2142257	922	172377
P26	8	15127369	942	172311	8	15349143	1048	173862	8	14930379	909	172102

P27	29	11077576	1964	334450	28	5959555	1803	327894	29	10878652	1997	331808
P28	19	16758660	1893	326064	19	17178420	1813	329464	18	5778117	1938	320443
P29	16	6370583	1710	324240	16	6617017	1791	322744	16	6376419	1854	323658
P30	15	7745078	1817	324735	15	7832606	1799	328141	15	7737364	1922	323777
P31	14	5695013	1907	322310	14	5807459	1842	328205	14	5683987	1758	325617
P32	9	1163106	1655	318584	9	1167430	1768	325718	9	1163082	1787	336257
P33	54	2850	2718	566684	55	4999	3095	568060	55	4205	2958	579602
P34	52	3366	2875	577996	53	5351	2878	558660	52	3486	2867	576234
P35	51	3839	2902	574228	51	4235	2835	563118	51	3613	2939	567097
P36	48	2716	2894	575273	48	3078	3153	566609	49	4151	3053	562516
P37	35	98	934	197695	34	71	953	196244	35	98	919	197623
P38	12	2066	1010	183455	12	2116	1016	186592	12	2070	945	186803
P39	23	12073	1566	241466	23	12089	1538	237681	23	12099	1518	232515
P40	15	10163	1526	237046	15	10163	1477	241886	15	10143	1406	237963

Çizelge 5.1c. Çaprazlama tekniklerinden elde edilen sonuçlar

VERİ	CX				EX			
Veri Seti Adı	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P1	12	118	44	17658	12	118	43	17473
P2	14	1535	177	35434	14	1519	173	35101
P3	6	1873360	357	77183	6	1873360	355	76776
P4	5	628	51	17028	5	628	43	19801
P5	10	466	246	46823	10	464	193	48611
P6	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383
P7	8	31	38	11633	8	31	38	11603
P8	8	5	73	20635	8	5	68	20597
P9	23	6238	651	116602	23	5656	583	116740
P10	23	7808	685	113413	22	2748	630	115760
P11	22	5590	689	117889	23	9819	664	113551
P12	21	4577	689	115814	21	3971	644	115871
P13	21	5786	711	115188	21	5144	670	112630
P14	40	5695	549	152057	36	1645	461	144204
P15	36	2931	573	151144	34	597	549	157596
P16	33	952	636	150249	32	181	486	142819
P17	33	1085	581	141452	32	343	412	150374
P18	32	1059	545	152434	31	471	492	146306
P19	21	4156946	963	178600	21	3206082	1022	173412
P20	16	2376879	939	177743	16	1767663	982	178249
P21	14	2941625	951	173003	14	2783661	999	174952
P22	12	4394081	905	176372	12	4269993	938	176455
P23	11	6263730	886	172201	11	5366244	913	175819
P24	10	7684695	993	176241	10	7099217	878	171450
P25	9	2175247	883	174055	9	2142373	945	171335
P26	8	19609711	1042	173672	8	14940349	994	175387
P27	29	19583960	1897	317441	28	5523045	1855	327908
P28	19	22667352	1752	324311	19	16600016	1816	331676

P29	16	9061005	1785	326749	16	6371675	1700	326949
P30	15	9817530	2033	332249	15	7748344	1730	328275
P31	14	7127441	1842	313714	14	5675257	1793	329171
P32	9	1263362	2109	325406	9	1162420	1618	320307
P33	55	4911	3084	575334	55	4029	3108	568278
P34	52	4396	2886	568763	52	3374	2972	566721
P35	51	4331	3082	571499	51	3543	2940	570485
P36	49	5357	3149	560898	48	2596	2786	579708
P37	35	98	988	197952	35	96	914	197529
P38	12	2046	1018	185930	12	2068	989	183890
P39	23	14437	1561	235988	23	12021	1419	234662
P40	15	10799	1511	237332	15	10145	1421	238202

Elde edilen sonuçların karşılaştırmalı değerlendirmesi Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Bu tabloda, çaprazlama teknikleri arasında bir sıralama yapılarak performans analizi gerçekleştirilmiştir. Sıralama sürecinde öncelik sırası uygunluk fonksiyonlarına göre belirlenmiş olup önce F1 değerleri dikkate alınmıştır. F1 değerlerinin eşit olması durumunda değerlendirme F2 değerleri üzerinden yapılmış, bunun da eşit olduğu durumlarda sırasıyla F3 ve F4 değerleri esas alınmıştır. Her bir çaprazlama tekniği için elde edilen sıralama puanları toplanmış ve toplam puanın veri sayısına oranlanmasıyla bir performans ölçütü elde edilmiştir. Bu ölçüte göre en düşük orana sahip yöntem, ilgili veri kümesi için en başarılı teknik olarak belirlenmiştir.

Gözlemlenen sonuçlara göre Dönüşüm Çaprazlama yönteminin en düşük performansı göstermesinin temel nedeni, kullanılan çember temelli dönüşüm mekanizmasının ebeveynler arasındaki değer ilişkilerini çok katı bir yapıda korumasıdır. Bu yöntem, bağlantı çemberi içinde kalan değerleri zorunlu olarak karşılıklı yer değiştirdiği için çözüm uzayında yeterli çeşitliliği üretememekte ve yeni, daha iyi çözüm keşfini sınırlamaktadır.

OX1, PBX ve OBX teknikleri, performans açısından birbirine yakın ve orta-alt seviyede yer almakta olup, ebeveynlerden aldıkları bilgiyi sınırlı ve kısmi biçimde aktarmaları nedeniyle çeşitlilik üretiminde kısıtlamalar yaşamaktadırlar. OX1 tekniği, tek bir kesim noktasından sonra kalan kısmı korurken, PBX ve OBX teknikleri pozisyon ve sıra bazında farklı koruma mekanizmaları uygulamakla birlikte, her üç teknik de tam anlamıyla yapısal dezavantajlarını aşamamaktadır. Buna karşılık, OX2 tekniği, rastgele belirlenen iki kesim noktası arasında kalan bölümü ebeveynlerden daha esnek şekilde aktarabilmesi sayesinde, bu üç tekniğe kıyasla daha başarılı sonuçlar vermektedir.

PMX ve Tersine Çaprazlama teknikleri, bölüm bazında daha güçlü yapı koruma mekanizmaları ve ters çevirme işlemleri sayesinde OX1, PBX, OBX ve OX2’ye kıyasla daha

üstün performans göstermiştir. Özellikle Tersine Çaprazlama, aktarılan bölgeyi ters çevirerek çözüm çeşitliliğini artırmakta ve bu sayede PMX'in de üzerinde sonuçlar elde etmektedir.

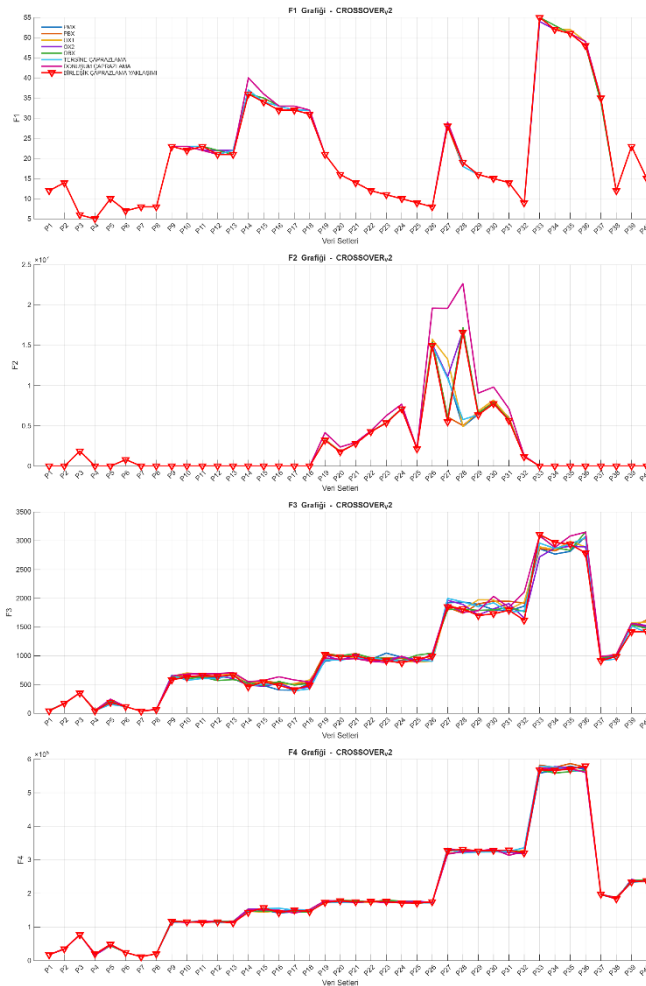
Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı, tüm çaprazlama tekniklerini bir arada kullanarak farklı yaklaşımlardan elde edilen aday çözümlerle arama uzayındaki çeşitliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Bu birleşik kullanım sayesinde, çeşitli tekniklerin avantajları bir araya getirilerek daha etkili bir çözüm üretimi sağlanmaktadır. Çalışmada yer alan 40 adet veriden 20'sinde, sıralama sonuçlarında Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı en üst sırada yer almış ve böylece en başarılı yöntem olarak ön plana çıkmıştır.

5.2. Çaprazlama tekniklerinin karşılaştırmalı sonuçları

VERİ	PMX	PBX	OX1	OX2	OBX	IX	CX	EX
P1	1	3	4	1	5	1	2	1
P2	1	3	6	5	2	1	4	1
P3	2	4	5	1	3	1	6	1
P4	4	7	8	3	1	5	6	2
P5	3	6	7	4	5	2	8	1
P6	1	1	1	2	1	1	1	1
P7	1	1	1	1	1	1	1	1
P8	1	2	2	1	1	1	3	1
P9	2	4	7	6	5	3	8	1
P10	2	5	7	4	6	3	8	1
P11	3	6	8	1	7	5	2	4
P12	5	3	8	6	7	1	4	2
P13	7	4	8	5	2	6	3	1
P14	4	6	7	1	3	5	8	2
P15	2	6	5	4	7	3	8	1
P16	4	7	6	3	5	2	8	1
P17	3	7	6	1	4	5	8	2
P18	1	7	6	3	5	4	8	2
P19	6	4	7	2	5	3	8	1
P20	5	6	7	4	3	1	8	2
P21	2	4	7	3	6	5	8	1
P22	3	5	6	4	7	1	8	2
P23	3	6	7	4	5	1	8	2
P24	4	7	5	3	6	1	8	2
P25	5	6	7	3	4	1	8	2
P26	3	6	7	4	5	1	8	2
P27	6	3	7	5	2	4	8	1
P28	1	3	2	6	7	4	8	5
P29	4	5	7	1	6	3	8	2
P30	4	6	7	2	5	1	8	3
P31	3	7	6	4	5	2	8	1
P32	4	7	5	3	6	2	8	1

P33	2	5	7	1	8	3	6	4
P34	4	5	7	1	8	3	6	2
P35	3	7	8	4	5	2	6	1
P36	4	6	7	2	3	5	8	1
P37	2	7	8	5	1	4	6	3
P38	5	8	7	2	6	4	1	3
P39	5	6	7	2	3	4	8	1
P40	3	7	6	5	4	1	8	2
TOPLAM	128	208	246	122	180	106	257	70
ORTALAMA ORAN	3,2	5,2	6,2	3,1	4,5	2,7	6,4	1,8
SIRALAMA	4	6	7	3	5	2	8	1

Performans analizlerinin görsel karşılaştırması amacıyla referans veri setine ait sonuçlar Şekil 5.2’de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı’nın F1 değerlerinde özellikle P10 ve P16 verilerinde belirgin bir üstünlük sergilediği görülmektedir. P30 ve P32 verilerinde F1 değerlerinde anlamlı bir fark gözlenmemekle birlikte, bu durumlarda sırasıyla F2, F3 ve F4 uygunluk fonksiyonları dikkate alındığında Birleşik Çaprazlama yönteminin diğer teknikler karşısında öne çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.2. Çaprazlama tekniklerinin görsel karşılaştırması

5.2. Farklı RFC Değerlerinin Performans Analizi

Bu bölümde, SS algoritmasının farklı RFC değerleriyle elde ettiği sonuçlar sunulmaktadır. Analizin amacı, RFC parametresinin çözüm kalitesi ve algoritmanın yakınsama davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere, tüm çaprazlama tekniklerinin birlikte kullanılması genel olarak daha yüksek performans ve daha iyi uygunluk fonksiyonu değerleri sağlamıştır. Bu nedenle, analizlerde deterministik öncelik onarma fonksiyonu ile Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı kullanılarak farklı RFC değerleri üzerinde karşılaştırmalı testler gerçekleştirilmiştir. Her RFC değeri için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3’te sunulmuştur.

Çizelge 5.3a. RFC değerlerinin sonuçları

VERİ	RFC 20				RFC 18				RFC 16			
Veri Seti Adı	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P1	12	118	43	17473	12	118	43	17473	12	118	43	17473
P2	14	1519	173	35101	14	1519	173	35101	14	1519	173	35101
P3	6	1873360	355	76776	6	1873360	355	76776	6	1873360	355	76776
P4	5	628	43	19801	5	628	47	18724	5	628	46	16664
P5	10	464	193	48611	10	464	162	48263	10	464	181	48886
P6	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383
P7	8	31	38	11603	8	31	38	11603	8	31	38	11603
P8	8	5	68	20597	8	5	68	20597	8	5	68	20597
P9	23	5656	583	116740	23	5606	686	114981	23	5670	601	116360
P10	22	2748	630	115760	23	7256	679	113584	23	7244	629	114970
P11	23	9819	664	113551	23	9737	673	113335	23	9805	632	114916
P12	21	3971	644	115871	21	4547	671	113915	21	3603	582	115204
P13	21	5144	670	112630	21	5344	642	114777	21	5240	685	114072
P14	36	1645	461	144204	36	1649	467	144791	36	1619	423	144936
P15	34	597	549	157596	34	629	509	152984	34	597	450	156147
P16	32	181	486	142819	33	484	502	155192	33	506	437	150524
P17	32	343	412	150374	32	343	395	147239	32	349	403	148468
P18	31	471	492	146306	31	463	476	154184	32	879	439	149620
P19	21	3206082	1022	173412	21	3226210	947	175802	21	3224552	1022	176430
P20	16	1767663	982	178249	16	1764859	958	174169	16	1766903	983	174742
P21	14	2783661	999	174952	14	2783133	1021	178755	14	2783829	1004	177118
P22	12	4269993	938	176455	12	4271085	917	173245	12	4276891	919	173601
P23	11	5366244	913	175819	11	5360760	951	174987	11	5389788	899	169078
P24	10	7099217	878	171450	10	7098305	926	171290	10	7098457	914	172961
P25	9	2142373	945	171335	9	2142163	940	173019	9	2142183	908	169627
P26	8	14940349	994	175387	8	14963579	908	167574	8	14962795	907	169668
P27	28	5523045	1855	327908	29	10682174	1878	323796	28	5874339	1823	319695
P28	19	16600016	1816	331676	19	16695982	1839	333160	19	16614336	1906	322247
P29	16	6371675	1700	326949	16	6360529	1884	322825	16	6378961	1892	323530

P30	15	7748344	1730	328275	15	7740150	1887	333985	15	7730656	1918	328554
P31	14	5675257	1793	329171	14	5741495	1734	326476	14	5719281	1831	324495
P32	9	1162420	1618	320307	9	1149030	1835	333334	9	1143102	1883	334262
P33	55	4029	3108	568278	55	4105	2773	569651	54	2784	2839	553919
P34	52	3374	2972	566721	52	3284	2900	562653	52	3322	2944	569812
P35	51	3543	2940	570485	50	2722	2837	559611	50	2384	2709	547094
P36	48	2596	2786	579708	48	2596	2739	575447	48	2756	3000	565102
P37	35	96	914	197529	34	61	942	195998	35	94	897	196635
P38	12	2068	989	183890	12	2052	960	183751	12	2070	944	183766
P39	23	12021	1419	234662	23	12027	1473	235321	23	12045	1438	233694
P40	15	10145	1421	238202	15	10145	1297	233769	15	10145	1339	237650

Çizelge 5.3b. RFC değerlerinin sonuçları

VERİ	RFC 14				RFC 12				RFC 10			
Veri Seti Adı	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P1	12	118	43	17473	12	118	43	17473	12	118	43	17473
P2	14	1519	173	35101	14	1519	173	35101	14	1519	173	35101
P3	6	1873360	355	76776	6	1873360	355	76776	6	1873360	355	76776
P4	5	628	46	16664	5	628	44	19462	5	628	47	16486
P5	10	466	173	46770	10	464	170	48320	10	464	212	47026
P6	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383
P7	8	31	38	11603	8	31	38	11603	8	31	38	11603
P8	8	5	68	20597	8	5	68	20597	8	5	68	20597
P9	23	5722	587	114958	23	5710	636	113742	23	5774	630	117237
P10	23	7220	561	113618	23	7226	623	112185	23	7234	628	115564
P11	23	9849	648	112820	23	9821	605	114958	23	9823	662	115502
P12	22	8598	574	115788	22	8818	615	115185	22	8652	658	116334
P13	21	5378	650	115425	21	5816	676	116814	22	11484	606	115670
P14	36	1639	460	146948	37	2383	413	140096	37	2419	479	152110
P15	34	591	499	152096	34	713	535	151496	34	637	462	156356
P16	32	175	433	149473	33	492	475	146193	33	490	427	144809
P17	32	353	336	145852	32	333	423	148617	32	351	495	149809
P18	32	875	444	143168	31	465	408	145557	32	883	383	150529
P19	21	3235940	900	170885	21	3224382	933	176835	21	3230414	931	172328
P20	16	1762795	966	172694	16	1773969	1040	176956	16	1765163	949	170856
P21	14	2784449	992	175740	14	2785163	971	173130	14	2784773	998	173485
P22	12	4270697	946	173227	12	4276937	894	171790	12	4276393	906	174938
P23	11	5382972	947	171589	11	5369986	940	171605	11	5363278	971	174685
P24	10	7101073	923	173457	10	7099379	889	171313	10	7085801	1003	174632
P25	9	2142469	952	172671	9	2142839	940	168777	9	2142477	932	173038
P26	8	14941715	895	173526	8	14950055	856	169329	8	14945941	898	169969
P27	29	10639290	1907	330311	29	10735460	1919	328729	28	5778829	1779	333202
P28	18	4652333	1847	326662	19	16561400	1727	319406	19	16673124	1674	317907
P29	16	6343849	1793	321347	16	6375723	1793	318707	16	6356139	1884	325186
P30	15	7747786	1811	322919	15	7732922	1884	323656	15	7746068	1845	316269
P31	14	5692443	1758	326804	14	5686403	1711	319864	14	5683475	1705	325654

P32	9	1162798	1699	323502	9	1163234	1664	316339	9	1162158	1699	317482
P33	55	4029	2868	579389	55	4139	2776	554673	55	4025	2809	566568
P34	52	3204	2575	553407	52	3296	2636	553041	52	3208	2779	564657
P35	51	3581	2730	556248	51	3587	2804	562825	51	3665	2846	565990
P36	48	2786	2814	564348	48	2576	2898	557745	49	4005	2806	558435
P37	35	98	941	194580	35	94	910	196590	35	100	913	196299
P38	12	2068	963	183204	12	2036	944	185479	12	2048	1013	185949
P39	23	12003	1356	235827	23	12015	1410	234973	23	12097	1344	236963
P40	15	10143	1309	240921	15	10147	1371	235019	15	10145	1298	239350

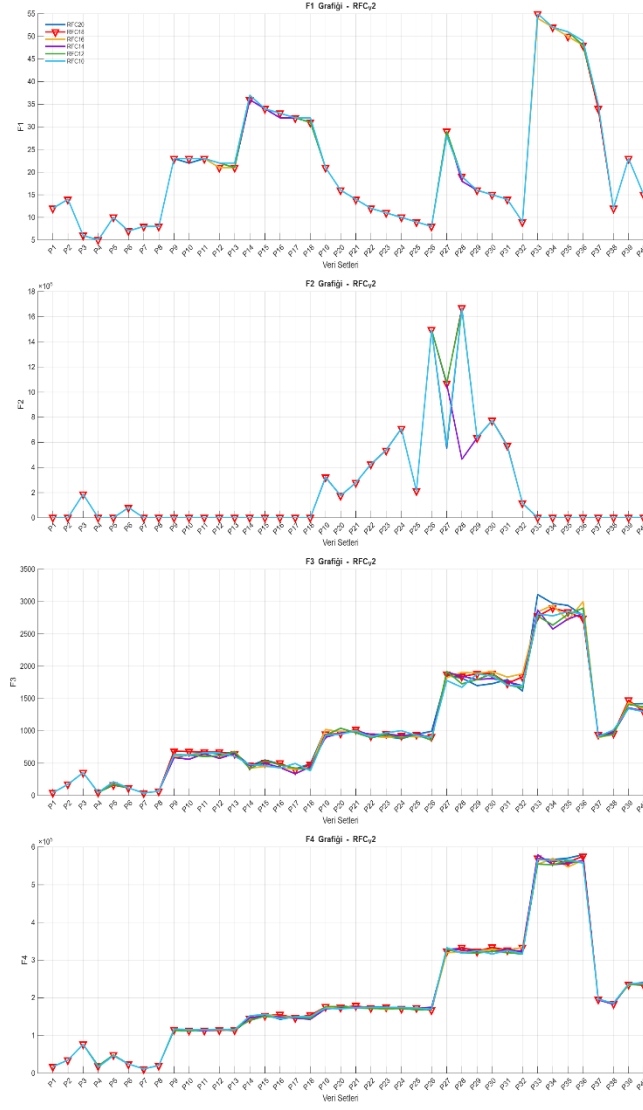
RFC değerlerinden elde edilen sonuçlar, daha önce Bölüm 5.1’de çaprazlama tekniklerinin karşılaştırılmasında kullanılan yöntem ile değerlendirilmiş ve sonuçlar Çizelge 5.4’te sunulmuştur. Analizler, RFC sayısı azaldıkça başarı oranının düştüğünü göstermektedir. En düşük performans, RFC 10 değerinde gözlemlenirken, en yüksek performanslar RFC 20 ve RFC 18 değerlerinde elde edilmiştir. Bu durum, RFC sayısının artmasının referans kümelerin çeşitliliğini artırarak çözüm kalitesine olumlu etkiye bulunduğunu ortaya koymaktadır. Detaylı analizlerde, RFC 20 ve RFC 18 arasında yalnızca birkaç veri setinden kaynaklanan küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. RFC 20, 40 veriden 13’ünde en üst sırada yer alırken, RFC 18 ise 14 veride en üst sırada yer almış ve böylece en başarılı yöntem olarak ön plana çıkmıştır.

Çizelge 5.4. RFC değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları

VERİ	RFC 20	RFC 18	RFC 16	RFC 14	RFC 12	RFC 10
P1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	1	1	1
P3	1	1	1	1	1	1
P4	1	5	3	3	2	4
P5	4	1	3	6	2	5
P6	1	1	1	1	1	1
P7	1	1	1	1	1	1
P8	1	1	1	1	1	1
P9	2	1	3	5	4	6
P10	1	6	5	2	3	4
P11	3	1	2	6	4	5
P12	2	3	1	4	6	5
P13	1	3	2	4	5	6
P14	4	3	1	2	5	6
P15	3	4	2	1	6	5
P16	2	3	6	1	5	4
P17	3	2	4	6	1	5
P18	3	1	5	4	2	6
P19	1	4	3	6	2	5
P20	5	2	4	1	6	3
P21	2	1	3	4	6	5
P22	1	3	5	2	6	4

P23	3	1	6	5	4	2
P24	4	2	3	6	5	1
P25	3	1	2	4	6	5
P26	1	6	5	2	4	3
P27	1	5	3	4	6	2
P28	3	6	4	1	2	5
P29	4	3	6	1	5	2
P30	6	3	1	4	2	5
P31	1	6	5	4	3	2
P32	4	2	1	5	6	3
P33	4	5	1	3	6	2
P34	6	3	5	1	4	2
P35	3	2	1	4	5	6
P36	3	2	4	5	1	6
P37	4	1	2	5	3	6
P38	5	3	6	4	1	2
P39	3	4	5	1	2	6
P40	5	2	4	1	6	3
TOPLAM	107	106	122	123	142	147
ORTALAMA ORAN	2,68	2,65	3,05	3,08	3,55	3,68
SIRALAMA	2	1	3	4	5	6

Performans analizlerinin görsel karşılaştırması amacıyla referans veri setine ait sonuçlar Şekil 5.3'te sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, RFC 18 değerinin özellikle P37 verisinde F1 uygunluk fonksiyonu değerinde belirgin bir üstünlük gösterdiği görülmektedir. F2 değerlerinde ise tüm RFC seviyeleri arasında oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. F1 ve F2'de belirgin farkların olmadığı durumlarda, F3 ve F4 uygunluk fonksiyonları incelenmiş; özellikle F4 değerlerinde P12 ve P26 verilerinde RFC 18'in diğer RFC değerlerine kıyasla daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. RFC değerlerinin görsel karşılaştırması

5.3. Öncelik Onarma Fonksiyonları Performans Analizi

Bu bölümde, SS algoritmasının deterministik, ST1 ve ST2 öncelik onarma fonksiyonları, RFC 18 parametre değeri ve Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı temel alınarak yürütülen deneyler kapsamında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Amaç, farklı öncelik onarma yaklaşımlarının çözüm kalitesi ve algoritmanın performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Çizelge 5.5'te her bir öncelik onarma fonksiyonu için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Çizelge 5.5. Öncelik onarma fonksiyonlarının sonuçları

VERİ	DTC				ST1				ST2			
Veri Seti Adı	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P1	12	118	43	17473	12	118	43	17473	12	118	43	17473

P2	14	1519	173	35101	14	1519	173	35101	14	1527	173	35122
P3	6	1873360	355	76776	6	1873360	355	76776	6	1873360	355	76784
P4	5	628	47	18724	5	628	43	17642	5	628	49	19416
P5	10	464	162	48263	10	464	174	46488	10	466	190	42646
P6	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383
P7	8	31	38	11603	8	31	38	11603	8	31	38	11603
P8	8	5	68	20597	8	5	68	20597	8	5	68	20597
P9	23	5606	686	114981	23	5598	596	117716	23	5706	576	117349
P10	23	7256	679	113584	22	2516	582	115918	22	2954	583	115851
P11	23	9737	673	113335	22	4086	580	117230	23	9821	530	116832
P12	21	4547	671	113915	21	3247	601	116158	21	3447	614	117607
P13	21	5344	642	114777	21	4868	628	117533	21	5068	608	115129
P14	36	1649	467	144791	36	1625	460	148024	35	897	487	152415
P15	34	629	509	152984	34	531	459	149842	34	549	468	152723
P16	33	484	502	155192	33	480	481	149776	33	470	457	147692
P17	32	343	395	147239	32	335	421	146603	32	365	435	144376
P18	31	463	476	154184	31	457	405	151000	32	877	475	155980
P19	21	3226210	947	175802	21	3207720	951	169780	21	3236998	999	171911
P20	16	1764859	958	174169	16	1762515	979	171292	16	1768051	960	171463
P21	14	2783133	1021	178755	14	2783549	942	169592	14	2813307	968	169384
P22	12	4271085	917	173245	12	4239577	964	168378	12	4273807	984	171121
P23	11	5360760	951	174987	11	5363610	941	170226	11	5405424	981	171132
P24	10	7098305	926	171290	10	7082509	953	168163	10	7128539	982	171440
P25	9	2142163	940	173019	9	2142313	997	176045	9	2144877	954	172099
P26	8	14963579	908	167574	8	15054419	920	168194	8	15580921	963	170788
P27	29	10682174	1878	323796	28	5295713	1970	328114	28	5435183	1893	323850
P28	19	16695982	1839	333160	18	4413835	1944	330032	18	4516661	1811	319647
P29	16	6360529	1884	322825	16	6346899	1757	320648	16	6377161	1839	326650
P30	15	7740150	1887	333985	15	7738890	1733	323302	15	7773434	1889	323542
P31	14	5741495	1734	326476	14	5680693	1807	323129	14	5911407	1962	323328
P32	9	1149030	1835	333334	9	1141956	1703	322097	9	1143968	1839	321386
P33	55	4105	2773	569651	54	2826	2790	583427	54	3012	2820	555084
P34	52	3284	2900	562653	52	3232	2831	565001	52	3426	2889	563019
P35	50	2722	2837	559611	50	2222	2738	560163	51	3759	2947	563447
P36	48	2596	2739	575447	48	2474	2963	564698	48	2704	2953	563369
P37	34	61	942	195998	34	57	910	196791	35	94	933	195135
P38	12	2052	960	183751	12	2034	955	184276	12	2038	969	183912
P39	23	12027	1473	235321	23	11967	1478	236292	23	11975	1640	231290
P40	15	10145	1297	233769	15	10133	1428	238938	15	10149	1531	238077

Öncelik onarma tekniklerinden elde edilen sonuçlar, daha önce Bölüm 5.1’de çaprazlama tekniklerinin karşılaştırılmasında kullanılan yöntem ile değerlendirilmiş ve sonuçlar Çizelge 5.6’da sunulmuştur. Deterministik onarma fonksiyonu, aynı girdide her çalıştırmada aynı çıktıyı verdiği için çözüm çeşitliliği sağlamamaktadır. ST1 öncelik onarma fonksiyonu, öncelik ilişkisini olasılıksal olarak sürekli ve dinamik biçimde düzeltme imkânı

tanıyarak, farklı pozisyonlarda değişimler yapabilmekte ve böylece çözüm uzayında daha geniş bir keşif olanağı sunmaktadır. Buna karşın ST2, bir parçanın konumunu sabit tutarken diğer parçayı rastgele yerleştirmekte, dolayısıyla çözüm çeşitliliği sağlamasına rağmen ST1 kadar kapsamlı ve sürekli bir öncelik düzenlemesi yapamamaktadır. Yapılan analizler sonucunda 40 adet veriden 33 tanesinde ST1 öncelik onarma yöntemi en başarılı yöntem olarak ön plana çıkmıştır.

Çizelge 5.6. Öncelik onarma fonksiyonlarının karşılaştırmalı sonuçları

VERİ	DTC	ST1	ST2
P1	1	1	1
P2	1	1	2
P3	1	1	2
P4	2	1	3
P5	1	2	3
P6	1	1	1
P7	1	1	1
P8	1	1	1
P9	2	1	3
P10	3	1	2
P11	2	1	3
P12	3	1	2
P13	3	1	2
P14	3	2	1
P15	3	1	2
P16	3	2	1
P17	2	1	3
P18	2	1	3
P19	2	1	3
P20	2	1	3
P21	1	2	3
P22	2	1	3
P23	1	2	3
P24	2	1	3
P25	1	2	3
P26	1	2	3
P27	3	1	2
P28	3	1	2
P29	2	1	3
P30	2	1	3
P31	2	1	3
P32	3	1	2
P33	3	1	2
P34	2	1	3
P35	2	1	3
P36	2	1	3
P37	2	1	3
P38	3	1	2

P39	3	1	2
P40	1	1	1
TOPLAM	80	47	94
ORTALAMA ORAN	2	1,2	2,4
SIRALAMA	2	1	3

Performans analizlerinin görsel karşılaştırması amacıyla referans veri setine ait sonuçlar Şekil 5.4'te sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, P11, P18 ve P35 veri setlerinde ST1 yönteminin F1 uygunluk fonksiyonu açısından belirgin şekilde öne çıktığı görülmektedir. P29 ve P32 veri setlerinde F1 değerlerinde anlamlı bir ayrım bulunmadığından, değerlendirme sırasıyla F2 ve F3 uygunluk fonksiyonlarına genişletilmiştir. F2 değerlerinde de ayırt edici bir fark gözlenmemesi üzerine incelenen F3 değerlerinde ST1 yönteminin diğer tekniklere göre daha başarılı sonuçlar sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4. Öncelik onarma tekniklerinin görsel karşılaştırması

5.4. Referans Test Veri Seti Sonuçlarının Literatür ile Karşılaştırılması

Referans test veri setlerinin algoritma performansını karşılaştırma amacıyla kullanıldığı bu bölümde, Kalaycı ve ark. (Kalaycı vd., 2016) tarafından literatürde raporlanan sonuçlar ile bu çalışmada geliştirilen SS algoritmasının elde ettiği en iyi çözümler karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, 40 adet veriden 18'inde Kalaycı ve ark.'nın çalışmasının, 17'sinde ise SS algoritmasının daha iyi sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. Buna ek olarak, 5 veri setinde her iki yöntemin de eşdeğer performans sergilediği gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalı analiz sonuçları Çizelge 5.7'de sunulmuştur.

Çizelge 5.7. Literatürdeki çalışmalar ile SS algoritmasının karşılaştırılması

VERİ	KALAYCI ve ARK.				ÖNERİLEN YÖNTEM			
Veri Seti Adı	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P1	12	118	57	17282	12	118	43	17473
P2	14	1519	173	35101	14	1519	173	35101
P3	6	1873400	355	76776	6	1873360	355	76776
P4	5	628	43	17642	5	628	43	17642
P5	9	6	161	47019	10	464	174	46488
P6	7	812703	117	24383	7	812703	117	24383
P7	8	31	38	11603	8	31	38	11603
P8	8	5	68	20597	8	5	68	20597
P9	22	2152	563	114820	23	5598	596	117716
P10	22	3002	575	116010	22	2516	582	115918
P11	22	5196	550	118530	22	4086	580	117230
P12	21	3459	563	115140	21	3247	601	116158
P13	20	968	593	115700	21	4868	628	117533
P14	35	983	420	145730	36	1625	460	148024
P15	33	148	425	143200	34	531	459	149842
P16	32	189	364	147900	33	480	481	149776
P17	32	347	377	147020	32	335	421	146603
P18	31	455	373	146990	31	457	405	151000
P19	20	934160	968	170820	21	3207720	951	169780
P20	16	1764300	958	171530	16	1762515	979	171292
P21	14	2791800	953	170960	14	2783549	942	169592
P22	12	4261100	939	170150	12	4239577	964	168378
P23	11	5372300	961	172890	11	5363610	941	170226
P24	10	7093700	950	170970	10	7082509	953	168163
P25	9	2142300	945	169120	9	2142313	997	176045
P26	8	14940000	948	168280	8	15054419	920	168194
P27	27	2581800	1849	325660	28	5295713	1970	328114
P28	18	4380300	1791	322770	18	4413835	1944	330032
P29	16	6325100	1809	327580	16	6346899	1757	320648
P30	15	7757200	1727	321920	15	7738890	1733	323302

P31	14	5758100	1717	317810	14	5680693	1807	323129
P32	9	1142100	1685	321660	9	1141956	1703	322097
P33	52	906	2991	565620	54	2826	2790	583427
P34	50	1174	2788	561760	52	3232	2831	565001
P35	49	1179	2926	562350	50	2222	2738	560163
P36	47	1279	2741	556440	48	2474	2963	564698
P37	34	63	921	195630	34	57	910	196791
P38	12	2050	960	182260	12	2034	955	184276
P39	22	12057	1292	234220	23	11967	1478	236292
P40	15	10137	1209	229540	15	10133	1428	238938

5.5. Endüstriyel Veri Seti Sonuçlarının Literatür ile Karşılaştırılması

Endüstriyel veri setlerinin algoritma performansını karşılaştırma amacıyla incelendiği bu bölümde, literatürde birden fazla çalışma tarafından raporlanan sonuçlar ile bu çalışmada geliştirilen SS algoritmasının elde ettiği en iyi çözümler karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, incelenen 6 endüstriyel veri setinin 3'ünde SS algoritmasının literatürdeki yöntemlere kıyasla daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Karşılaştırmalı analiz sonuçları Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

Çizelge 5.8. Literatürdeki çalışmalar ile SS algoritmasının karşılaştırılması

VERİ		ÖNERİLEN YÖNTEM				LİTERATÜR				KULLANILAN ALGORİTMALAR		ÇALIŞMALAR	
Veri Seti Adı	Çevrim Süresi	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4				
EOL MOTOR	530	8	24679	0	0	8	28377	82	5810	AFSA (Artificial Fish Swarm Alg.)			(L. Guo vd., 2024)
		8				8	38123	83	7695	IGWOA (Improved Grey Wolf Optimization Alg.)			
		8				8	37817	82	9693	PSO			
		8				8	45508	84	5867	GWOA			
CEP TELEFONU	18					9	9	77	823	IGWOA			(L. Guo vd., 2024)
						9	9	76	825	AFSA - GWOA - ABC - IDFPA (Improved Discrete Flower Pollination Alg.)			
						9	9	81	853	PSO - SA			(L. Guo vd., 2024), (Yanqing Zeng, Zhang, Liang, ve Zhang, 2023)
						9	9	82	868	GA			
		9	9	76	825	9	9	80	857	PSO			(L. Guo vd., 2024), (Yanqing Zeng vd., 2023)
						9	10.2	87.2	924.4	ACO			
						9	9	97	862	RL (Reinforcement Learning)			(Yanqing Zeng vd., 2023)
10 PARÇA	40	5	207	10	13060	5	211	4	9730	IDFPA (Improved DFPA)			(Yanqing Zeng vd., 2023)
						5	341	5	9605	TS -ABC			
						6	1143	3	7575	NH (New Heuristic)			
						5	211	4	10090	ACO			
LAPTOP	104	9	800	323	2358	9	800	301	2570	CP (Constraint Programming Model)			(Edis, 2021)
LAPTOP	110	8	78	284	2116	9	878	567	23	PDHA (Pareto Discrete Hummingbird Alg.)			(Yin, Zhang, ve Jiang, 2021)
YAZICI	94	8	743	106	47860	8	743	97	43355	CP			(Edis, 2021)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, DHD probleminin çözümüne yönelik olarak, SS algoritması temel alınarak geliştirilen çoklu çaprazlama teknikleri, stokastik ve deterministik öncelik onarma fonksiyonları ile farklı ölçeklerdeki veri setlerini içeren kapsamlı bir deneysel yapıdan oluşan özgün bir çözüm çerçevesi geliştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, DHD problemine yönelik etkin bir çözüm yaklaşımı geliştirmek, algoritmanın parametre ve yapı taşlarının çözüm kalitesi üzerindeki etkilerini sistematik olarak analiz etmektir.

SS algoritması, Referans test verileri ve Endüstriyel veriler olmak üzere iki ayrı veri seti kategorisi üzerinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle algoritmanın temel bileşenlerinden biri olan çaprazlama mekanizmasının performansa etkisini incelemek amacıyla bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak, çaprazlama tekniklerinin en başarılı performans gösterdiği kombinasyonu tespit etmek için bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu analizde, yedi farklı çaprazlama tekniği tek tek SS algoritması ile birlikte deterministik öncelik onarma fonksiyonu ve RFC 20 değeri kullanılarak çalıştırılmıştır. Ardından, bu tekniklerin tümünün bir arada değerlendirildiği Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşım, her bir çaprazlama operatörünün sahip olduğu farklı arama stratejilerinden kaynaklanan çeşitliliği bir araya getirerek çözüm uzayının daha etkin ve geniş kapsamlı keşfedilmesini sağlamaktadır. Böylece, yerel minimumlara takılma olasılığı azalmakta ve algoritmanın genel performansı artmaktadır. Ayrıca, bu bütünleşik yapı ek bir hesaplama maliyeti getirmemekte; kullanılan FEs sayısı diğer çaprazlama teknikleri ile aynı seviyede tutulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, tüm çaprazlama tekniklerinin birlikte kullanıldığı bu yaklaşımın, genel olarak daha yüksek performans ve daha iyi uygunluk fonksiyonu değerleri ürettiğini açıkça göstermektedir.

Bu aşamadan sonra, algoritmanın RFC parametresinin çözüm kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla bir dizi deneysel çalışma yürütülmüştür. RFC değeri, SS algoritmasında referans kümesinin büyüklüğünü belirleyen kritik bir parametredir ve çözüm uzayının çeşitliliği ile yakınsama hızını doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, RFC değerleri 10, 12, 14, 16, 18 ve 20 olacak şekilde altı farklı yapılandırma test edilmiştir. Deneyler, SS algoritmasının deterministik öncelik onarma fonksiyonu ve Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı ile birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları, RFC değerinin artışıyla birlikte çözüm kalitesinde belirli bir iyileşme eğilimi gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Özellikle RFC 18 ve RFC 20 değerleri arasında oldukça küçük bir fark bulunmakla birlikte, en başarılı performansın RFC 18 değeri ile elde

edildiği belirlenmiştir. Bu bulgu, algoritmanın yaklaşık optimum performans için orta düzeyde bir referans kümesi büyüklüğüne ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

RFC parametresine ve çaprazlama tekniğine karar verildikten sonra, çalışma kapsamında üçüncü analiz aşaması olan öncelik onarma fonksiyonları değerlendirilmiştir. Bu fonksiyonlar, çözüm oluşturma sürecinde öncelik sırasının yeniden düzenlenmesi yoluyla algoritmanın arama etkinliğini artırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada bu amaçla üç farklı öncelik onarma fonksiyonu geliştirilmiş ve test edilmiştir: deterministik, ST1 ve ST2. Bu analizlerde, Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı ve RFC 18 değeri sabit tutularak üç fonksiyon ayrı ayrı SS algoritmasıyla uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, ST1 öncelik onarma fonksiyonunun, diğer yaklaşımlara kıyasla daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Özellikle çözüm kalitesi, yakınsama hızı ve istikrar açısından ST1'in üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, stokastik yaklaşımın çözüm uzayında çeşitlilik sağlayarak yerel optimumlara takılma riskini azalttığını ortaya koymaktadır.

Yapılan tüm analizler sonucunda, çalışmada en başarılı sonuçların elde edildiği parametre kombinasyonunun; ST1 öncelik onarma fonksiyonu, RFC değeri 18 ve Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerle gerçekleştirilen deneylerde, SS algoritmasının DHD problemine yönelik güçlü ve dengeli çözümler ürettiği görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar, hem Referans test veri setlerinde hem de Endüstriyel veri setlerinde doğrulanmıştır. Referans test verileri, Kalaycı ve ark. (Kalaycı vd., 2016) tarafından literatürde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış; yapılan karşılaştırma sonucunda 40 adet verinin 17 tanesinde SS algoritması ile daha optimize çözümler elde edilmiştir. Ayrıca, 5 adet veride her iki çalışma da aynı sonuçları üretmiş olup bu durum yöntemlerin belirli problem örneklerinde eşdeğer performans sergileyebildiğini göstermektedir. Benzer şekilde, Endüstriyel veri setleri üzerinde yapılan değerlendirmelerde, 6 adet verinin 3 tanesinde SS algoritması tarafından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu bulgular, önerilen SS tabanlı yaklaşımın hem akademik hem de gerçek üretim ortamlarında geçerli, etkili ve rekabetçi bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yaklaşım, DHD problemlerinin çözümünde SS algoritmasının parametre optimizasyonu ve bileşenlerinin uygun seçimiyle performansının önemli ölçüde artırılabilirliğini ortaya koymuştur. Özellikle ST1 öncelik onarma fonksiyonu ve Birleşik Çaprazlama Yaklaşımı'nın birlikte kullanımı, algoritmanın genel başarımını belirgin şekilde yükseltmiştir.

6.2 Öneriler

Tez çalışmasının bulguları temel alınarak, gelecekteki araştırmalarda dikkate alınması gereken öneriler sunulabilir. Öncelikle, geliştirilen SS algoritmasının performansının daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilmesi için farklı permütasyon yapısına sahip problem türlerine uygulanması yararlı olacaktır. Böylece algoritmanın farklı problem tiplerindeki başarımını daha net ortaya konabilir.

Algoritmanın performansını artırmak amacıyla, çaprazlama tekniklerine yeni yöntemler eklenerek arama uzayında çeşitlilik sağlanabilir. Öncelik onarma fonksiyonları için kontrollü stokastik yöntemler geliştirilerek stokastik çözümlerin hesaplama süresi ve kararlılığı iyileştirilebilir. Ayrıca, yerel arama operatörlerinin algoritmaya entegre edilmesi, özellikle karmaşık problemlerde çözüm kalitesini artırabilir.

Bunun yanı sıra, GPU tabanlı paralel hesaplama yöntemlerinin kullanılması, algoritmanın çalışma süresini kısaltarak daha büyük veri kümeleri üzerinde test yapılmasına olanak sağlayabilir. Son olarak, SS algoritmasının diğer popülasyon tabanlı yöntemlerle birleştirildiği hibrid yaklaşımlar geliştirilebilir. Bu tür yaklaşımlar, farklı optimizasyon tekniklerinin güçlü yönlerini bir araya getirerek genel çözüm performansını artırabilir.

KAYNAKLAR

- Akpınar, M. E. (2021). *Simülasyon optimizasyonu ile demontaj hattı dengeleme*. (Doktora Tezi), Manisa Celal Bayar Üniversitesi.
- Alp, A. (2004). *Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem*. Bilkent Üniversitesi (Turkey).
- Arıkan, U. (2009). *Two-sided assembly line balancing models and heuristics*. Middle East Technical University (Turkey).
- Balancing, B. D. S. b. S. A. L. (1993). Benchmark Data Sets by Scholl (1993) – Assembly Line Balancing. Retrieved 01.10.2024, 2024, from <https://assembly-line-balancing.de/salbp/benchmark-data-sets-1993/>
- Battaia, O., ve Dolgui, A. (2022). Hybridizations in line balancing problems: A comprehensive review on new trends and formulations. *International Journal of Production Economics*, 250(108673).
- Bedir, N., Alağaç, H. M., ve Eren, T. (2017). A Disassembly Line Balancing with Multicriteria Decision Making. *International Journal of Engineering Research and Development*, 9(1), 11-18.
- Bentaha, M. L., Battaia, O., ve Dolgui, A. (2013). L-shaped algorithm for stochastic disassembly line balancing problem. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 407-411.
- Chiang, W.-C. (1998). The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 77(0), 209-227.
- Çelik, Y., Yıldız, İ., ve Karadeniz, A. T. (2019). Son üç yılda geliştirilen metasezgisel algoritmalar hakkında kısa bir inceleme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 463-477.
- Çil, Z. A., Mete, S., ve Serin, F. (2020). Robotic disassembly line balancing problem: A mathematical model and ant colony optimization approach. *Applied Mathematical Modelling*, 86, 335-348.
- Ding, L.-P., Feng, Y.-X., Tan, J.-R., ve Gao, Y.-C. (2010). A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5), 761-771.
- Edis, E. B. (2021). Constraint programming approaches to disassembly line balancing problem with sequencing decisions. *Computers ve Operations Research*, 126, 105111
- Gao, K.-Z., He, Z., Huang, Y., Duan, P.-Y., ve Suganthan, P. N. (2020). A survey on meta-heuristics for solving disassembly line balancing, planning and scheduling problems in remanufacturing. *Swarm and Evolutionary Computation*, 57, 100719.
- Geng, J.-C., Cui, Z., ve Gu, X.-S. (2016). Scatter search based particle swarm optimization algorithm for earliness/tardiness flowshop scheduling with uncertainty. *International Journal of Automation and Computing*, 13(3), 285-295.

- Glover, F. (1977). Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints. *Decision Sciences*, 8(1), 156-166. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01074.x>
- Guo, L., Zhang, Z., Wu, T., Zeng, Y., Zhang, Y., ve Xie, X. (2024). A grey wolf optimization algorithm for solving partial destructive disassembly line balancing problem consider feasibility evaluation and noise pollution. *Advanced Engineering Informatics*, 60, 102418.
- Guo, X., Zhang, Z., Qi, L., Liu, S., Tang, Y., ve Zhao, Z. (2021). Stochastic hybrid discrete grey wolf optimizer for multi-objective disassembly sequencing and line balancing planning in disassembling multiple products. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(3), 1744-1756.
- Güler, E., Kalayci, C. B., Ilgin, M. A., Özceylan, E., ve Güngör, A. (2024). Advances in partial disassembly line balancing: A state-of-the-art review. *Computers ve Industrial Engineering*, 109898.
- He, J., Chu, F., Dolgui, A., ve Anjos, M. F. (2024). Multi-objective disassembly line balancing and related supply chain management problems under uncertainty: Review and future trends. *International Journal of Production Economics*, 109257.
- Hu, Y., Xu, Y., ve Jia, Y. (2021). *Review of the optimization algorithms for remanufacturing disassembly line*. Paper presented at the 2021 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC).
- Huang, D.-S., Wunsch, D. C., Levine, D. S., ve Jo, K.-H. (2008). *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence: Fourth International Conference on Intelligent Computing* (Vol. 5227). Shanghai, China: Springer Science ve Business Media.
- Jiao, Y., Deng, X., Li, M., Xing, X., ve Xu, B. (2022). Balancing of parallel U-shaped assembly lines with a heuristic algorithm based on bidirectional priority values. *Concurrent Engineering*, 30(1), 80-92. doi: 10.1177/1063293X211065506
- Kalayci, C. B., ve Gupta, S. M. (2013a). Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications*, 40(18), 7231-7241.
- Kalayci, C. B., ve Gupta, S. M. (2013b). Simulated annealing algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 93-98.
- Kalayci, C. B., Polat, O., ve Gupta, S. M. (2016). A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 242(2), 321-354.
- Kalaycılar, E. G. (2020). *A stochastic disassembly line balancing problem with hazardous tasks*. Middle East Technical University.

- Kalaycılar, E. G., Azizoğlu, M., ve Batun, S. (2024). Disassembly line balancing with hazardous task failures–Model based solution approaches. *Computers ve Industrial Engineering*, 190(110089).
- Kalaycılar, E. G., Azizoğlu, M., ve Yeralan, S. (2016). A disassembly line balancing problem with fixed number of workstations. *European Journal of Operational Research*, 249(592–604).
- Karaş, A. (2020). *Montaj hattı işçi atama ve yeniden dengeleme problemi için bir yapay arı kolonisi algoritması*. (Yüksek Lisans Tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Kaya, Ü. (2019). *Demontaj hattı dengelemeye yönelik sezgisel yöntemlerle esnek bir yazılım geliştirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Kizilay, D. (2022). A novel constraint programming and simulated annealing for disassembly line balancing problem with AND/OR precedence and sequence dependent setup times. *Computers ve Operations Research*, 146, 105915.
- Laili, Y., Li, Y., Fang, Y., Pham, D. T., ve Zhang, L. (2020). Model review and algorithm comparison on multi-objective disassembly line balancing. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 484-500.
- Lambert, A. J. D. (2007). Optimization disassembly processes subjected to sequence-dependent cost. *Computers ve Operations Research*, 46(2), 536–551.
- Li, C., Guo, X. W., Wang, J., Qin, S., Qi, L., ve Tang, Y. (2022). *Grey wolf algorithm for human-robot collaborative disassembly line balancing problem subject to dangerous components*. Paper presented at the 2022 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC).
- Li, Z., Çil, Z. A., Mete, S., ve Kucukkoc, I. (2020). A fast branch, bound and remember algorithm for disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3220-3234.
- Li, Z., Kucukkoc, I., ve Zhang, Z. (2019). Iterated local search method and mathematical model for sequence-dependent U-shaped disassembly line balancing problem. *Computers ve Industrial Engineering*, 137, 106056.
- Liang, P., Fu, Y., ve Gao, K. (2024). Multi-product disassembly line balancing optimization method for high disassembly profit and low energy consumption with noise pollution constraints. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 130(107721).
- Liu, H., Hai, J., Li, L., ve Yin, F. (2022). An efficient disassembly process generation method for large quantities of waste smartphones. *Procedia CIRP*, 105, 140-145.
- Luo, W., Zhou, M., Guo, X., Wei, H., Qi, L., ve Zhao, Z. (2020). *Improved artificial bee colony algorithm for solving a single-objective sequence-dependent disassembly line balancing problem*. Paper presented at the 2020 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC).

- McGovern, S., ve Gupta, S. (2007). Combinatorial optimization analysis of the unary NP-complete disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 45(18-19), 4485-4511.
- Mete, S., Cil, Z. A., Ağpak, K., Özceylan, E., ve Dolgui, A. (2016). A solution approach based on beam search algorithm for disassembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 188-200.
- Mutlu, S. (2021). *A multi-objective memetic algorithm for mixed-model two-sided disassembly line balancing problem*. (Master's Thesis), Eskişehir Technical University.
- Oğan, A. D. (2013). *Flexible U-shaped assembly line design problem*. Middle East Technical University (Turkey).
- Quan, O., ve Xu, H. (2015). *The study of comparisons of three crossover operators in genetic algorithm for solving single machine scheduling problem*. Paper presented at the 2015 6th International Conference on Manufacturing Science and Engineering.
- Ren, Y., Meng, L., Zhang, C., Lu, Q., ve Tian, G. (2019). Multi-criterion decision making for disassembly line balancing problem. *Procedia CIRP*, 80, 542-547.
- Wang, K., Guo, J., Du, B., Li, Y., Tang, H., Li, X., ve Gao, L. (2023). A novel MILP model and an improved genetic algorithm for disassembly line balancing and sequence planning with partial destructive mode. *Computers ve Industrial Engineering*, 186(109704).
- Wang, K., Li, X., ve Gao, L. (2019). Modeling and optimization of multi-objective partial disassembly line balancing problem considering hazard and profit. *Journal of Cleaner Production*, 211, 115-133.
- Wang, K., Li, X., Gao, L., Li, P., ve Sutherland, J. W. (2021). A discrete artificial bee colony algorithm for multiobjective disassembly line balancing of end-of-life products. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(8), 7415–7426.
- Yeni, F. B., Cevikcan, E., Yazici, B., ve Yilmaz, O. F. (2024). Aggregated planning to solve multi-product multi-period disassembly line balancing problem by considering multi-manned stations: A generic optimization model and solution algorithms. *Computers ve Industrial Engineering*, 196, 110464.
- Yin, T., Zhang, Z., ve Jiang, J. (2021). A Pareto-discrete hummingbird algorithm for partial sequence-dependent disassembly line balancing problem considering tool requirements. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 406-428.
- Zeng, Y., Zhang, Z., Liang, W., ve Zhang, Y. (2023). Balancing optimization for disassembly line of mixed homogeneous products with hybrid disassembly mode. *Computers ve Industrial Engineering*, 185, 109646.
- Zeng, Y., Zhang, Z., Yin, T., ve Zheng, H. (2022). Robotic disassembly line balancing and sequencing problem considering energy-saving and high-profit for waste household appliances. *Journal of Cleaner Production*, 381, 135209.